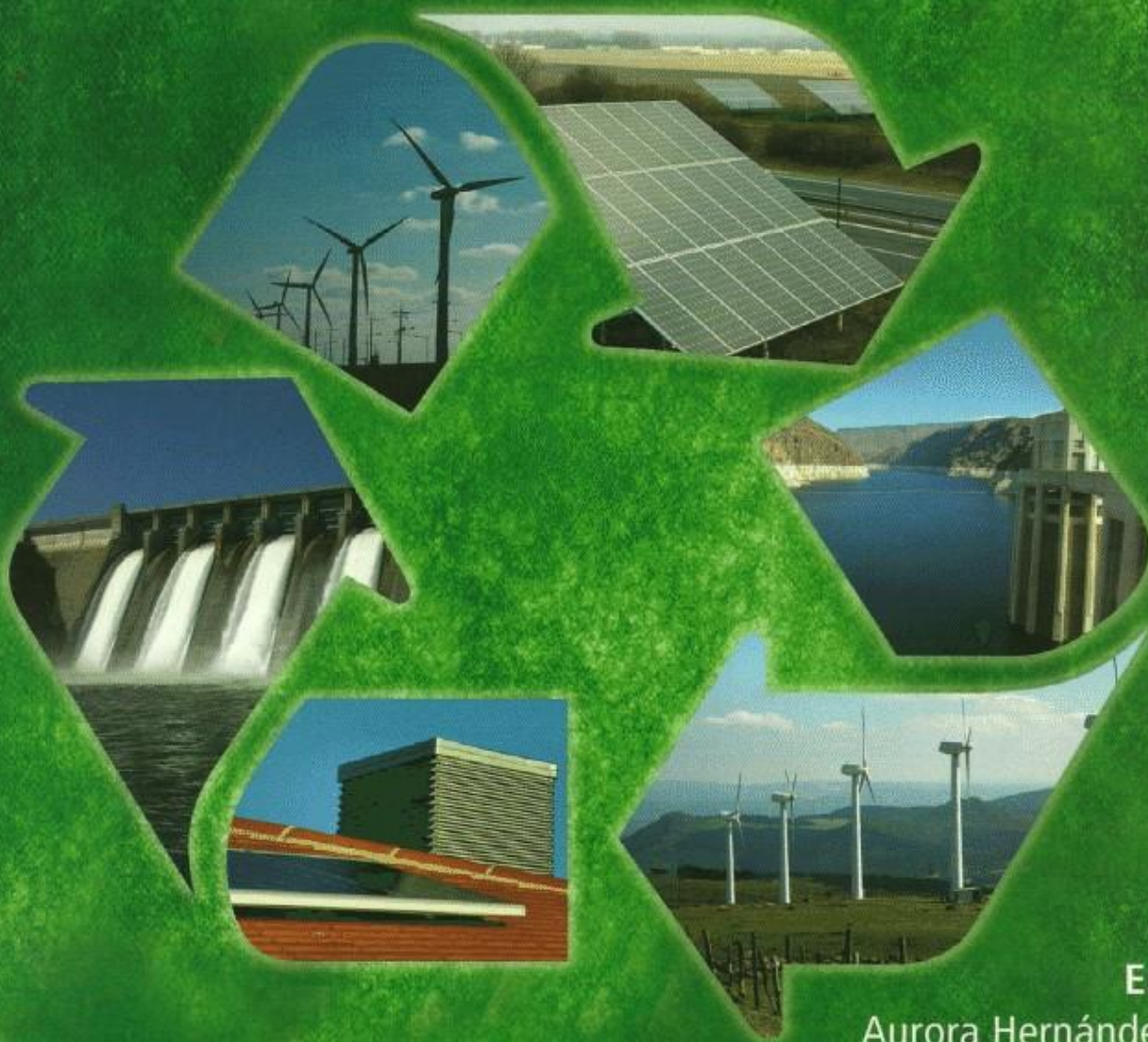


# Clima, Agua y Energía: pilares para el desarrollo sostenible



Editores

Aurora Hernández Ulate  
Rigoberto Rodríguez Quirós  
Andrea Suárez Serrano



# Clima, Agua y Energía: pilares para el desarrollo sostenible

**Editores**

Aurora Hernández Ulate

Rigoberto Rodríguez Quirós

Andrea Suárez Serrano







333.7

U5884c Universidad Nacional. Centro Mesoamericano de Desarrollo Sostenible del Trópico Seco (CEMEDE)

Clima, agua y energía: Pilares para el desarrollo sostenible /Centro de Recursos Hídricos para Centroamérica y el Caribe (HIDROCEC), Sede Regional Chorotega ; Editado por Aurora Hernández Ulate, Rigoberto Rodríguez Quirós, Andrea Suárez Serrano. – 1 ed. – Guanacaste, C.R. : CEMEDE, 2014.

272 p. : il. ; 22 X 28 cm.

ISBN: 978-9968-638-12-8

1. Recursos Energéticos Renovables. 2. Recursos Hídricos. 3. Desarrollo Sostenible. 4. Energía Solar. I. Centro de Recursos Hídricos para Centroamérica y el Caribe (HIDROCEC). II. Sede Regional Chorotega. III. Título.

Universidad Nacional, Campus Nicoya, Guanacaste, Costa Rica  
Teléfono: 2562-6212 / Fax: 2686-6262 / correo electrónico: cemedede@una.cr,  
sitio web: [www.cemedede.una.ac.cr](http://www.cemedede.una.ac.cr) / Apartado postal: 86-3000 Heredia

© Clima, Agua y Energía: pilares para el desarrollo sostenible

De conformidad con la Ley N° 6683 de Derechos de Autor y Derechos Conexos es prohibida la reproducción de esta publicación en cualquier forma o medio, electrónico o mecánico, incluyendo el FOTOCOPIADO, grabadoras sonoras y otros.

#### **Consejo Editorial:**

Dra. Andrea Suárez Serrano

Dr. Víctor Julio Baltodano Zúñiga

Dra. Aurora Hernández Ulate

Dr. Juan Carlos Picón Cruz

M.Sc. Rigoberto Rodríguez Quirós

Primera edición: Setiembre de 2014

“Las ideas, cuadros y figuras incluidas en los artículos contenidos en esta publicación son entera responsabilidad de cada uno de sus autores. Los editores, el Centro Mesoamericano de Desarrollo Sostenible del Trópico Seco (CEMEDE), el Centro de Recursos Hídricos para Centroamérica y el Caribe (HIDROCEC) y la Sede Regional Chorotega no se hacen responsables por la utilización de los mismos”.

Diseño y diagramación: Jade Diseños & Soluciones, [www.jadecr.com](http://www.jadecr.com), 2285-2636

# Índice

Introducción.....	13
<b>Una introducción al tema del clima, sus cambios y vinculaciones con el agua y la energía.....</b>	<b>15</b>
I. Sobre la ideología del crecimiento económico y sus límites ambientales.....	16
II. Clima: sus cambios.....	18
III. Cambio del clima y su relación con la disponibilidad y acceso al agua potable.....	22
IV. Clima y energía.....	26
V. Conclusiones.....	29
Referencias.....	30
<b>SECCIÓN A: CLIMA Y AGUA.....</b>	<b>33</b>
<b>Estrategias para el uso y aprovechamiento de los recursos hídricos en regiones semiáridas del occidente de México.....</b>	<b>35</b>
I. Introducción.....	35
II. Antecedentes.....	36
III. Usos del agua.....	41
IV. Aprovechamiento de los recursos hídricos.....	41
V. Conclusiones.....	49
Referencias.....	50
<b>Aplicación de huella hídrica y cosecha de agua de lluvia como medidas de mitigación y adaptación al cambio climático en la Región Chorotega, Costa Rica.....</b>	<b>53</b>
I. Introducción.....	54
II. Área de Estudio.....	55
III. Marco Teórico-Conceptual.....	57
IV. Marco Metodológico.....	58
V. Resultados y discusión.....	61
VI. Conclusiones.....	64
Referencias.....	65
<b>Uso de tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar en actividades económicas agropecuarias en Costa Rica.....</b>	<b>67</b>
I. Introducción.....	68
II. La energía del sol.....	72
III. Uso de la energía solar.....	73
IV. Formas de captación de la energía del sol.....	74
V. Configuración de la instalación.....	78
VI. Ventajas y desventajas de uno u otro sistema.....	80
VII. Conclusiones.....	83
Referencias.....	84



<b>Análisis preliminar de la variación espacio-temporal de isótopos estables en aguas meteóricas y subterráneas de Costa Rica.....</b>	<b>87</b>
I. Introducción.....	88
II. Área de estudio.....	90
III. Resultados y discusión.....	94
IV. Conclusiones.....	103
V. Agradecimientos.....	104
Referencias.....	104
<b>Evaluación de la calidad del agua y las áreas ribereñas en la subcuenca del Río Liberia, Guanacaste, Costa Rica.....</b>	<b>107</b>
I. Introducción.....	108
II. Metodología.....	110
III. Discusión de resultados.....	114
IV. Conclusiones y recomendaciones.....	121
Referencias.....	122
<b>Uso potencial de los nutrientes de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales mediante microalgas.....</b>	<b>125</b>
I. Introducción.....	126
II. Materiales y Métodos.....	128
III. Teoría/cálculos.....	129
IV. Discusión y Resultados.....	129
V. Conclusiones.....	135
VI. Agradecimientos.....	135
Referencias.....	135
<b>Remoción de nutrientes en un sistema alternativo de aguas residuales: experiencia a escala real.....</b>	<b>137</b>
I. Introducción.....	138
II. Metodología.....	139
III. Resultados y discusión.....	140
IV. Conclusiones.....	144
Referencias.....	144
<b>El cambio climático y las ciudades.....</b>	<b>147</b>
I. El cambio climático.....	148
II. El cambio climático en las ciudades.....	150
III. Alcance de la implementación de los planes de desarrollo con respecto al cambio climático.....	153
IV. Conclusión.....	156
Referencias.....	158

<b>SECCIÓN B: Clima y energía</b> .....	159
<b>Acciones para el desarrollo de fuentes renovables de generación eléctrica, la sostenibilidad y la adaptación al cambio climático</b> .....	161
I. Introducción.....	162
II. Un marco de referencia conceptual para la relación economía, ambiente y energía.....	162
III. Los recursos para generación y sus restricciones.....	165
IV. El riesgo climático en Centroamérica.....	170
V. Acciones estratégicas para el aprovechamiento sostenible del potencial de generación eléctrica.....	171
VI. Plan de Fuentes Renovables No Convencionales (PFRNC).....	174
VII. Lecciones aprendidas del subsector eléctrico de Costa Rica.....	175
Referencias.....	177
<b>Determinación de Potenciales de Energía Marina en Costa Rica</b> .....	179
I. Introducción.....	180
II. Metodología.....	181
III. Resultados.....	184
IV. Discusión.....	189
V. Conclusiones.....	190
Referencias.....	192
<b>Estudio de factibilidad de una planta solar fotovoltaica ubicada en el techo de un edificio en Liberia, Guanacaste</b> .....	193
I. Introducción.....	194
II. Metodología.....	195
III. Resultados y estudio del caso.....	195
IV. Discusión.....	207
V. Conclusiones.....	207
Referencias.....	208
<b>Eficiencia y simulación matemática de los parámetros operativos de la central eólica Tejona</b> .....	211
I. Introducción.....	212
II. Metodología.....	214
III. Resultados.....	225
V. Conclusiones.....	228
Referencias.....	229
<b>Determinación de potenciales de energía solar para generación eléctrica en Costa Rica</b> .....	231
I. Introducción.....	232
II. Aproximación conceptual.....	232
III. Metodología.....	233
IV. Resultados.....	236
V. Discusión.....	243
VI. Conclusiones.....	243
Referencias.....	244

<b>Planta de generación eléctrica de 4 MWe utilizando biomasa como combustible, en la Zona Norte del país.....</b>	<b>245</b>
I. Introducción.....	246
II. Metodología.....	247
III. Resultados.....	248
IV. Discusión.....	252
V. Conclusiones y recomendaciones.....	253
VI. Nomenclatura.....	254
Referencias.....	254
<b>Energías Renovables en Argentina: Oportunidades y desafíos.....</b>	<b>255</b>
I. Introducción.....	256
II. Ventajas comparativas de las energías renovables frente a las fuentes no renovables de origen fósil. Contribución a mitigar el cambio climático.....	257
III. Marco Normativo. Programas.....	260
IV. Situación y perspectiva de las Energías Renovables en Argentina.....	264
V. Conclusiones.....	272
Referencias.....	272
<b>Conclusiones generales.....</b>	<b>274</b>

## Índice de cuadros

<b>Cuadro 1.</b> Datos requeridos en el programa CROPTWAT. 8 de la FAO para el cálculo de la huella hídrica en el cultivo de arroz en las regiones estudiadas (Chorotega y Brunca) y fuentes consultadas para la obtención de la información.....	59
<b>Cuadro 2.</b> Potencial de recursos energéticos comerciales.....	71
<b>Cuadro 3.</b> Datos climáticos de la Zona Norte.....	81
<b>Cuadro 4.</b> Datos climáticos del Pacífico Norte.....	82
<b>Cuadro 5.</b> Unidades de producción lecheras seleccionadas hasta el momento ofrecida por la Cooperativa de productores “Dos Pinos”.....	83
<b>Cuadro 6.</b> Descripción de los sitios de muestreo incluyendo coordenadas geográficas (grados /decimales), elevación (m.s.n.m.), frecuencia de muestreo y año de instalación.....	91
<b>Cuadro 7.</b> Parámetros seleccionados en el modelo HYSPLIT para la determinación de las trayectorias de las masas de aire en los eventos diarios colectados en Heredia durante el 2013.....	92
<b>Cuadro 8.</b> Matriz de correlación Pearson entre la composición isotópica y variables meteorológicas.....	93
<b>Cuadro 9.</b> Localización de los puntos de muestreo en el río Liberia, Guanacaste.....	112
<b>Cuadro 10.</b> Clasificación de las riberas en base al puntaje obtenido durante la valoración de las áreas ribereñas.....	112
<b>Cuadro 11.</b> Asignación de clases de calidad del agua según el Sistema Holandés, basado en valores de PSO, DBO y nitrógeno amoniacal.....	113
<b>Cuadro 12.</b> Clasificación de calidad del agua superficial según el índice BMWP-CR.....	114
<b>Cuadro 13.</b> Puntaje y calidad asignados por el índice RQI en las siete zonas de muestreo a lo largo de la subcuenca del río Liberia.....	119
<b>Cuadro 14.</b> Tasa de crecimiento de <i>Chlorella vulgaris</i> en cada efluente.....	133
<b>Cuadro 15.</b> Costa Rica: Recursos energéticos renovables para generar electricidad.....	167



<b>Cuadro 16.</b>	Amplitudes de marea registradas en estaciones en ambas costas del país.....	187
<b>Cuadro 17.</b>	Parámetros para el cálculo de potencial teórico de las corrientes oceánicas.....	188
<b>Cuadro 18.</b>	Resumen de la configuración según los sectores para instalación de los paneles.....	202
<b>Cuadro 19.</b>	Resumen de las opciones simuladas con los detalles encontrados en cada una de ellas, a manera de comparación.....	205
<b>Cuadro 20.</b>	Variables para el análisis financiero.....	207
<b>Cuadro 21.</b>	Mediciones de campo en Tejona para el cálculo de la densidad atmosférica.....	216
<b>Cuadro 22.</b>	Datos características físicas de los aerogeneradores de Tejona.....	220
<b>Cuadro 23.</b>	Pronóstico de Viento para el Centro de Producción Tejona 10-jul-14.....	223
<b>Cuadro 24.</b>	Cálculos obtenidos en la simulación de potencia y coeficientes de potencia de aerogeneradores de Tejona.....	225
<b>Cuadro 25.</b>	Valores de $C_p(\lambda, \beta)$ para los aerogeneradores de la central Tejona.....	227
<b>Cuadro 26.</b>	Potenciales técnicos fotovoltaicos para diferentes regiones climáticas de Costa Rica.....	239
<b>Cuadro 27.</b>	Población abastecida para distintos niveles de consumo.....	240
<b>Cuadro 28.</b>	Principales datos de la central termoeléctrica de 4MW <sub>e</sub> .....	251
<b>Cuadro 29.</b>	Datos para el modelo económico.....	252
<b>Cuadro 30.</b>	Principales parámetros técnicos y económicos para la central termoeléctrica de 4 MW <sub>e</sub> .....	252
<b>Cuadro 31.</b>	Parámetros financieros para la central termoeléctrica.....	253
<b>Cuadro 32.</b>	Ranking Mundial 2013 Energía Eólica.....	268

## Índice de figuras

Figura 1.	Clima en la Tierra y los cambios en el conocimiento de su variación temporal: del cambio lento al cambio abrupto.....	19
Figura 2.	Distribución de las tierras secas en el mundo.....	36
Figura 3.	Distribución de la precipitación pluvial anual, 2012.....	37
Figura 4.	Distribución de las tierras secas de México.....	38
Figura 5.	Población en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas.....	39
Figura 6.	Disponibilidad natural media per cápita.....	40
Figura 7.	Disponibilidad media per cápita al 2030.....	40
Figura 8.	Bordo en Zacatecas (Calera de Víctor Rosales Zac).....	42
Figura 9.	Cosecha de lluvia en México.....	42
Figura 10.	Municipios del estado de Jalisco que conforman la sequía crítica.....	43
Figura 11.	Invernadero con hidroponía.....	44
Figura 12.	Interior de Invernadero con cultivos de tomate.....	45
Figura 13.	Cultivos con hidroponía.....	45
Figura 14.	Recarga artificial con agua residual tratada San Luis Río Colorado, Sonora México.....	47
Figura 15.	Lagunas de infiltración (al fondo).....	48
Figura 16.	Torreón Coahuila, zona de recarga sobre el lecho del río Nazas. Comarca lagunera.....	49
Figura 17.	Ubicación de las cuencas hidrográficas de la Región Chorotega tomadas en cuenta en los proyectos de Huella Hídrica y Cosecha de Agua, Costa Rica.....	56
Figura 18.	Precipitación media mensual (mm) en las Estaciones: La Ceiba, Nicoya, Liberia y Taboga (Bebedero).....	57
Figura 19.	Construcción de reservorio en Cerro Negro, Santa Cruz, Guanacaste.....	61
Figura 20.	Reservorio en Comunidad La Esperanza, Nicoya, Guanacaste.....	61
Figura 21.	Huella hídrica azul, verde y gris en la región Chorotega y la región Brunca (2008-2011).....	62
Figura 22.	Huella hídrica extendida del agua (2008-2011) calculada para el cultivo de arroz en la Región Chorotega.....	62

Figura 23.	Producción de repollo utilizando agua de lluvia en Cerro Negro, Santa Cruz, Guanacaste.....	63
Figura 24.	Producción de apio y tomate utilizando agua de lluvia en Cerro Negro, Santa Cruz, Guanacaste.....	63
Figura 25.	Cosecha de tilapia en reservorio de Cerro Negro, Nicoya, Guanacaste.....	63
Figura 26.	Preparación de tilapia cosechada en reservorio.....	63
Figura 27.	Costa Rica: Evolución del consumo de energía comercial.....	69
Figura 28.	Costa Rica: Estructura del consumo final de la energía comercial.....	69
Figura 29.	Escenario mundial del giro energético hacia las energías renovables hasta 2050.....	70
Figura 30.	Ejemplo comercial sistema termosifónico.....	77
Figura 31.	Configuración con fuente auxiliar interior.....	78
Figura 32.	Configuración con fuente auxiliar en la línea de distribución (exterior).....	79
Figura 33.	Esquema simplificado de sistemas forzado con intercambiador de calor.....	79
Figura 34.	Sistema de calentamiento de agua solar forzado, diseño especial para la planta de cosecha animal, con intercambiador de calor y con caldera de bunker.....	80
Figura 35.	Ubicación de puntos de muestreo. El recuadro presenta el punto de muestreo en la Isla del Coco. Los círculos oscuros denotan los sitios de muestreo diarios; los círculos grises representan los sitios de muestreo semanal.....	91
Figura 36.	Líneas meteóricas locales para los puntos diarios de muestreo hasta Junio 2014.....	95
Figura 37.	Variación temporal en la composición de $\delta^{18}O$ (‰) y exceso de deuterio (d-excess, ‰) para los puntos de muestreos diarios hasta Junio de 2014.....	96
Figura 38.	Líneas meteóricas locales para los puntos semanales de muestreo hasta Junio 2014.....	97
Figura 39.	Variación temporal en la composición de $\delta^{18}O$ (‰) y exceso de deuterio (d-excess, ‰) para los puntos de muestreos semanales en la zona intermontañosa de Heredia (968 – 2303 m.s.n.m.) hasta Junio de 2014.....	99
Figura 40.	Trayectorias de masas de aire (72 hrs) obtenidas con el modelo HYSPLIT para las muestras diarias colectadas en Heredia durante el 2013. Las líneas grises corresponden a la época lluviosa, mientras que las líneas negras representan los eventos en la época seca. ....	100
Figura 41.	Interpolación de la composición isotópica en aguas subterráneas del Valle Central de Costa Rica, basada en los datos históricos ISOHIS del Organismo Internacional de Energía Atómica. Las líneas grises representan las trayectorias de masas de aire en la época lluviosa, mientras que las líneas negras muestran las masas de aire durante la época seca. Los principales cuerpos de agua superficial corresponden a las líneas azules. La composición isotópica en aguas subterráneas está particularmente dividida en dos componentes, Pacífico (gris oscuro) y Caribe (gris claro).....	101
Figura 42.	Modelación lineal de la composición de $\delta^{18}O$ en eventos de precipitación diarios colectados en Heredia durante el 2013. Las variables incluidas en el modelo de regresión lineal son: precipitación (mm), humedad relativa (%) y las alturas de la zona de mezcla (m) y masa de aire (m).....	102
Figura 43.	Representación conceptual de las variables meteorológicas del modelo de regresión lineal y su correspondencia con la variación en la composición isotópica.....	103
Figura 44.	Subcuenca del río Liberia, Guanacaste, Costa Rica.....	111
Figura 45.	Ubicación de puntos de muestreo en la Cuenca del río Liberia, Guanacaste, Costa Rica.....	111
Figura 46.	Oxígeno disuelto en el río Liberia, expresado en porcentaje de saturación (PSO), por punto y época de muestreo.....	115
Figura 47.	Nitrógeno amoniacal en el río Liberia, por punto y época de muestreo.....	116
Figura 48.	Demanda bioquímica de oxígeno, expresada en mg/L	

	O <sub>2</sub> , en el río Liberia, por punto y época de muestreo.....	117
Figura 49.	Variación del Índice Holandés en la Subcuenca del río Libera, por puntos de muestreo: a) época seca b) época lluviosa c) Transición época lluviosa-seca d) Transición época seca-lluviosa. Guanacaste, Costa Rica.....	118
Figura 50.	Variación del Índice BMWP'-CR en la Subcuenca del río Libera, por puntos de muestreo (1 PRL, 2 PRL, 3 PRL, 5PRL, 7PRL).....	120
Figura 51.	Esquematación del experimento.....	128
Figura 52.	Concentración de DQO en el clarificador primario, reactor anaeróbico, reactor aeróbico y el clarificador secundario.....	130
Figura 53.	Concentración de fósforo en el clarificador primario, reactor anaeróbico, reactor aeróbico y el clarificador secundario.....	130
Figura 54.	Remoción de DQO durante el cultivo de microalgas.....	131
Figura 55.	Remoción de fósforo por <i>Chlorella vulgaris</i> .....	132
Figura 56.	Cinética de crecimiento de <i>Chlorella vulgaris</i> medida a DO <sub>750</sub> .....	133
Figura 57.	Contenido relativo de clorofila (OD <sub>680</sub> /OD <sub>750</sub> ).....	134
Figura 58.	Cinética del rendimiento cuántico durante el crecimiento de <i>Chlorella vulgaris</i> .....	134
Figura 59.	Humedales artificiales: a) flujo subsuperficial horizontal, b) flujo subsuperficial vertical, c) flujo superficial libre (Sánchez, 2010).....	139
Figura 60.	Esquema de distribución del sistema de humedales ubicado en el Hotel Diuwak, Costa Rica.....	140
Figura 61.	Porcentajes de remoción promedio de fósforo P-PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> en los diferentes sistemas para la II etapa de muestreos.....	141
Figura 62.	Porcentajes de remoción promedio de NTK en la II etapa de muestreos.....	142
Figura 63.	Porcentajes de remoción promedio de amonio en el sistema de humedales.....	143
Figura 64.	Porcentajes de remoción promedio de nitritos para el sistema de humedales.....	144
Figura 65.	Principales factores que impulsan el cambio climático (IPCC, 2013).....	149
Figura 66.	El efecto invernadero (IPCC, 2013).....	150
Figura 67.	Emisiones globales de CO <sub>2</sub> por sector.....	152
Figura 68.	Costa Rica: Potencial de generación hidroeléctrica según restricción.....	166
Figura 69.	Potencial de generación hidroeléctrica por cuenca hidrográfica, en MW y por tipo de área protegida (restricción).....	166
Figura 70.	SEN: Capacidad instalada por tipo al 31 de diciembre del 2013.....	168
Figura 71.	SEN: Generación por tipo (GWH) al 31 de diciembre del 2013.....	168
Figura 72.	Porcentaje de generación por fuente 2014-2035.....	169
Figura 73.	Acciones estratégicas del Plan de fuentes Renovables no convencionales (PFRNC).....	174
Figura 74.	Estructura y contenidos del Plan de fuentes Renovables no convencionales (PFRNC).....	175
Figura 75.	Localización del área de estudio, indicando la posición de los puntos obtenidos del modelo de re-análisis WWIII.....	182
Figura 76.	Valor medio de la altura significativa en la ZEE de Costa Rica obtenido a partir de los resultados del modelo WAVEWATCH III para el periodo 2000-2009.....	185
Figura 77.	Valor medio del periodo de pico en la ZEE de Costa Rica obtenido a partir de los resultados del modelo WAVEWATCH III para el periodo 2000-2009.....	185
Figura 78.	Valor medio de la potencia de las olas en la ZEE de Costa Rica obtenido a partir de los resultados del modelo WAVEWATCH III para el periodo 2000-2009.....	186
Figura 79.	Valores medios de velocidad y dirección de corriente a 40 metros de profundidad, en la ZEE de Costa Rica para febrero 2010 y marzo 2013.....	189
Figura 80.	Sitios seleccionados para la ubicación de boyas para una red de monitoreo.....	191
Figura 81.	Inclinación y orientación de techos de edificio en estudio.....	197
Figura 82.	Ejemplo de prospección de sombreado para un sitio utilizando Solar Pathfinder.....	198



Figura 83.	Escenarios de los promedios mensuales de (a) radiación horizontal global diaria y (b) temperatura diurna para Liberia, Guanacaste.....	199
Figura 84.	Vista superior del techo y sectores con su respectiva inclinación y orientación.....	200
Figura 85.	Vista superior de la disposición de 120 paneles fotovoltaicos sobre los sectores óptimos para el aprovechamiento del recurso solar disponible en el sitio.....	201
Figura 86.	Pantalla del software PVSyst utilizado para simular una plataforma con paneles fotovoltaicos sobre un techo.....	203
Figura 87.	Localización de la central eólica Tejona en Costa Rica.....	213
Figura 88.	Central eólica Tejona en Costa Rica.....	214
Figura 89.	Área de barrido del rotor.....	215
Figura 90.	Curva de potencia de un generador Vestas V47-660 KW.....	218
Figura 91.	Curva de eficiencia de un generador Vestas V47-660 KW.....	219
Figura 92.	Valores de Cp y velocidad viento unidades Tejona.....	221
Figura 93.	Diagrama bloques modelo matemático aerogeneradores.....	222
Figura 94.	Metodología para cálculo pre-despachos de energía.....	224
Figura 95.	Gráficas de potencia y coeficientes de potencias real y simulada.....	226
Figura 96.	Curvas de valores de Cp de turbinas eólicas respecto a variaciones de $\lambda$ y $\beta$ .....	226
Figura 97.	Valores de Cp de turbinas de la central Tejona respecto a variaciones de $\lambda$ y $\beta$ .....	228
Figura 98.	Curvas de potencia del fabricante (a) y simulada (b) para un aerogenerador VESTAS.....	228
Figura 99.	Mapas de restricciones para los potenciales.....	233
Figura 100.	Radiación global horizontal promedio anual.....	237
Figura 101.	Potencial teórico solar de Costa Rica por regiones.....	237
Figura 102.	Ángulos óptimos para regiones Pacífico Norte y Caribe.....	238
Figura 103.	Variación regional del potencial técnico.....	239
Figura 104.	Potencia aprovechable para distintos porcentajes de aprovechamiento del Área Ae.....	240
Figura 105.	Variación diaria de la potencia para el mes de octubre. Planta Garabito.....	241
Figura 106.	Radiación directa anual para cada región climática de Costa Rica.....	242
Figura 107.	Mejores zonas de Costa Rica para el desarrollo de proyectos Solares fotovoltaicos.....	243
Figura 108.	Esquema del ciclo de vapor de la central termoeléctrica con un calentador cerrado de baja presión.....	250
Figura 109.	Mapa Argentino donde se destaca las zonas mas favorables para el desarrollo de las distintas energías renovables.....	265

# Introducción

En la actualidad están en la palestra de discusión en las esferas científicas, tecnológicas y políticas tres temas fundamentales para el desarrollo de la sociedad a nivel mundial: el agua, el clima y la energía. Cada uno de estos es discutido por separado en distintos niveles, sin embargo, están intrínsecamente relacionados, y requiere un abordaje conjunto.

El agua, como elemento fundamental de la vida, se convierte en un eje central de discusión. Los problemas de contaminación, utilización y escasez son motivo de constante polémica y conflicto. Existe necesidad de explorar nuevas formas y tecnologías para su tratamiento, que permitan mayor eficiencia y mejor aprovechamiento, al tiempo que se conserva en calidad y cantidad.

El abordaje del clima, y particularmente el tema del cambio climático y sus consecuencias para la vida en el planeta, es crucial en la actualidad. Los sistemas productivos, la biodiversidad, el comportamiento de las especies, y en general los cambios provocados por la variabilidad climática, obligan a buscar medidas de mitigación y adaptación.

En estrecha relación con lo anterior se encuentra el abordaje del tema de la energía, y particularmente de las energías renovables, como forma de adaptarse a los efectos del cambio climático y de enfrentar problemas como los generados por la contaminación en aguas y mares.

Este trabajo libro, reúne el esfuerzo de varios investigadores, se elabora con el afán de aportar en el análisis de los tres temas. Los artículos aportan al análisis desde la perspectiva particular de cada investigador. Sin embargo, se enlaza con un capítulo introductorio general que expresa conceptos clave en torno a cada tema y discute sobre elementos teórico-conceptuales aportados por académicos y científicos, estructurado en cuatro secciones que son la revisión teórico-conceptual del desarrollo y las consecuencias ambientales, los cambios del clima y el debate que se genera, la discusión en torno al acceso al agua, y la relación e impacto del clima sobre el sector energía.

Posteriormente el documento presenta dos grandes secciones: a) clima y agua; b) clima y energía.

La primera sección agrupa temas que tienen que ver con investigaciones en torno a la utilización de agua y estrategias para su uso eficiente, especialmente en áreas donde existen problemas de escasez, como en algunas partes de México y de Costa Rica.

A grandes rasgos, los tópicos son: utilización de recursos hídricos en regiones semiáridas, hidroponía, tratamiento y re-utilización de aguas domésticas, riego eficiente, aplicación de huella hídrica y cosecha de lluvia como estrategias de adaptación al cambio climático, uso de tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar en actividades agropecuarias.

De la misma manera, artículos técnicos abordan temas más específicos como los análisis isotópicos en precipitación en un escenario tropical, aprovechando las ventajas que ofrece en este caso Costa Rica, por la presencia de diversos microclimas. Además, se realiza un análisis particular de los efectos del cambio climático en ciudades como las principales generadoras de cambio climático y se discuten algunos aspectos relacionados sobre formas de planeamiento y adaptación desde las ciudades.

La segunda sección versa en artículos que tienen que ver con el desarrollo de fuentes renovables de energía, como forma de adaptación al cambio climático y con el objetivo de reducir la dependencia de energías fósiles.

El primero de los artículos de esta segunda sección aborda temas como la generación eléctrica, la adaptación al cambio climático mediante el uso de fuentes renovables, gestión de cuencas, participación social y compromiso comunal y fuentes renovables no convencionales.

Luego, se discuten las posibilidades de utilización de energías marinas, específicamente con el uso de las olas, las mareas y las corrientes marinas. Igualmente, se aborda la factibilidad de una planta solar fotovoltaica, particularmente en Guanacaste por ser un área con mucha luminosidad. También se incluyen temas como modelaje de algunos parámetros operativos de la energía eólica, energía solar para generación eléctrica y utilización de biomasa como combustible.

El libro termina con algunas conclusiones generales que proponen los editores, considerando los temas abordados y retomando los tres ejes fundamentales que se incluyen, como lo son el agua, el clima y la energía.

Este documento es un esfuerzo del Centro Mesoamericano de Desarrollo Sostenible del Trópico Seco (CEMEDE), el Centro de Recursos Hídricos para Centro América y el Caribe (HIDROCEC), y la Sede Regional Chorotega (SRCH) de la Universidad Nacional, con el aporte de cada uno de los autores de los artículos aquí incluidos.

Se espera que se convierta en un aporte a la discusión y búsqueda de soluciones en cuanto al uso eficiente del agua, el entendimiento del clima y el uso de energías renovables, como medidas de adaptación a los efectos provocados por el cambio climático.



# Una introducción al tema del clima, sus cambios y vinculaciones con el agua y la energía

*Dr. Víctor Julio BaltodanoZúñiga<sup>1</sup>*

*Dra. Aurora HernándezUlate<sup>2</sup>*

*Dr. Juan Carlos Picón Cruz<sup>3</sup>*

*M.Sc. Rigoberto Rodríguez Quirós<sup>4</sup>*

*Dra. Andrea Suárez Serrano<sup>5</sup>*

Desde hace más de dos décadas, la ocurrencia de graves desastres asociados a los fenómenos naturales han alarmado a la población global y han requerido que el tema de las amenazas naturales sea visto como un tópico primordial en las agendas de las organizaciones internacionales y de los Estados. Muchos de estos desastres están asociados directamente con el clima, por ejemplo, con sequías, con inundaciones y con huracanes. Todos estos desastres afectan la vida cotidiana de las personas, destruyendo sus medios de vida y su medio ambiente (como casas, plantaciones, bosques naturales) y/o las capacidades instaladas para hacer frente a la subsistencia (como plantas de generación de energía y reservorios de agua naturales y artificiales).

En la actualidad existen grupos académicos que afirman que es un hecho científico que hay un aumento de la precipitación media y de las precipitaciones extremas en algunos lugares del mundo, mientras que otras regiones sufren de eventos de escasez (Van-Oosterom, Zlatanova, & Fendel, 2005). Sin embargo lo más importante, es que se ha señalado que estos eventos son cada vez más frecuentes (Van-Oosterom, Zlatanova, & Fendel, 2005). Además, se ha afirmado que el planeta está afectado por un proceso de calentamiento que es causado por el ser humano (IPCC, 2007).

Las nuevas preocupaciones sobre el clima y sus cambios han motivado el trabajo de los distintos sectores internacionales, gubernamentales y no gubernamentales orientados a la búsqueda de respuestas o medidas adaptativas. Hoy en día es frecuente escuchar o leer información sobre los cambios que afectan el clima en todos los niveles y medios de difusión, abordando aspectos como la identificación de los distintos tipos de riesgo, la mitigación, la adaptación, la conservación de recursos naturales y hasta sobre la prohibición (real o potencial) de prácticas e insumos para la producción de bienes que afectan, directamente o indirectamente, el clima global.

Indudablemente, estas situaciones ambientales demandan que los Estados desarrollen estrategias para abordar el riesgo y que las poblaciones se preparen con medidas adaptativas o de mitigación. Unido a esto, la comunidad científica debe ser capaz de aportar datos, soluciones, desarrollos tecnológicos adecuados al escenario actual de cambio climático y contribuir con la modelización de escenarios orientados a la prevención, la preparación y la respuesta, que son los tres ejes de la gestión de riesgos (Van-Oosterom, Zlatanova, & Fendel, 2005).

1 Dr. Catedrático de la UNA Costa Rica. Correo electrónico victor.baltodano.zuniga@una.cr

2 Dra. Académica de la UNA Costa Rica. Correo electrónico aurorahernandezulate@gmail.com

3 Dr. Académico de la UNA Costa Rica. Correo juan.picón.cruz@una.cr

4 M.Sc. Académico de la UNA Costa Rica. Director del Centro Mesoamericano para el Desarrollo Sostenible (CEMEDE). Correo electrónico Rigoberto.rodriguez.quirós@una.cr

5 Dra. Académica de la UNA Costa Rica. Coordinadora del Centro de Recursos Hídricos para Centroamérica y el Caribe (HIDROCEC). Correo electrónico andrea.suarez.serrano@gmail.com

En esta dirección y con un sentido de urgencia, la Asamblea de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEA), como máximo organismo internacional asociado al medio ambiente, hace un llamado urgente a cambiar la relación de la humanidad con el planeta. La UNEA advierte que:

“ante una previsión de empeoramiento con unas estimaciones de 10.000 millones de habitantes en 2050, considera inaplazable una actuación política firme para garantizar un desarrollo sostenible. No obstante, admitió que no será una tarea fácil, ya que la conservación del medioambiente choca con los intereses económicos de la industria energética, del sector agrícola y del comercio a gran escala, si bien los argumentos para intentarlo son evidentes” (Marín, 2014).

El objetivo de este capítulo introductorio es discutir elementos teórico-conceptuales que enmarquen los aportes de la comunidad de profesionales y académicos costarricenses e internacionales que han participado en el *“Congreso Internacional Clima, Agua y Energía: pilares para el desarrollo sostenible”* de la Universidad Nacional de Costa Rica.

Este primer capítulo se divide en cuatro secciones: la primera, es una revisión teórico/conceptual del desarrollo y sus consecuencias ambientales; la segunda trata sobre el clima: sus cambios y el debate alrededor del tema; la tercera, discute la vinculación del cambio del clima e introduce una discusión sobre la disponibilidad y acceso al recurso hídrico, principalmente en regiones secas y la cuarta parte trata el impacto del clima sobre el sector de la energía y cómo este se prepara con medidas de mitigación y nuevas tecnologías para enfrentarlo.

## I. Sobre la ideología del crecimiento económico y sus límites ambientales

Muchos sociólogos, economistas y otros científicos sociales han cuestionado la sociedad de consumo, aún más la del hiperconsumo, de la hipermodernidad (Lipovetsky, 2006) por su insostenibilidad con respecto al uso intensivo de los recursos, entre ellos los recursos naturales. La ideología del crecimiento ilimitado comienza a ponerse en entredicho, sobretodo, a partir del informe *Los Límites del Crecimiento* (1972) de Dennis Meadows y colaboradores, donde afirmaba que de seguir manteniéndose los incrementos de la población, la industrialización, la contaminación, la producción de alimentos y la explotación de los recursos naturales que habían en ese momento, en 100 años se alcanzaría el límite absoluto. Por supuesto, las críticas de los defensores de esta ideología no se hicieron esperar en contra del informe.

Lo que sí está claro, tal como lo afirma Wallerstein (2009, s.p.), es que:

“los dilemas ambientales que encaramos hoy son el resultado directo de la economía- mundo capitalista. Mientras que todos los sistemas históricos anteriores transformaron la ecología, y algunos de ellos llegaron a destruir la posibilidad de mantener en áreas determinadas un equilibrio viable que asegurase la supervivencia del sistema histórico localmente existente, solamente el capitalismo histórico ha llegado a ser una amenaza para la posibilidad de una existencia futura viable de la humanidad, por haber sido el primer sistema histórico que ha englobado toda la Tierra y que ha expandido la producción y la población más allá de todo lo previamente imaginable”.

Una posición similar sostiene Ruiz Marrero (2009) donde para él la crisis ambiental y energética no se soluciona con medidas de eficiencia y las fuentes energéticas renovables, sino que debe haber un cuestionamiento al sistema capitalista, de lo contrario, solo con adelantos tecnológicos no se llega a ninguna parte, excepto al suicidio colectivo como afirma Hinkelammert (2003).

Ahora bien, otros autores como Riechman (2004) sugiere que la única opción posible ante la actual crisis ecológica es vivir dentro de los límites y asumir “que somos criaturas de fronteras, ni animales, ni dioses, ni máquinas” (s.p) y que la única tarea fundamental de nuestra época y frente a los desafíos que vivimos es “la conquista del espacio interior y ni expansión ni crecimiento sino intensidad” (Elizalde, 2009, pág.59). De acuerdo con Riechman (2004) lo fundamental es imitar la naturaleza a la hora de reconstruir los sistemas productivos, con el fin de hacerlos compatibles con la biosfera, reconstruyendo ecológicamente, por medio de un entramado de colaboraciones, la economía imitando el funcionamiento de los ecosistemas. Este es el concepto de lo que él llama la biomímesis.

Hay otras posiciones que tratan de buscar salidas, a la crisis ambiental, desde la economía del desarrollo, pero siempre entendido como crecimiento. Así el capitalismo verde cree que el problema se puede resolver desde la iniciativa privada y el mercado como su regulador. Por lo tanto, creen que el mercado es compatible con el medio ambiente y que es la tecnología creada por la empresa privada la que solucione los problemas ecológicos. A nuestro parecer el capitalismo verde es demasiado optimista y tiene el gran problema de ser meramente microeconómico sin percatarse de que los problemas ecológicos son globales y sobrepasan las fronteras.

Otros pensadores apuestan por el decrecimiento. Esta propuesta es una oposición a la ideología dominante del crecimiento económico y al reduccionismo económico dominante. Es una corriente de pensamiento que pretende acabar con el mito del crecimiento económico, y que tiene implicaciones filosóficas, sociales, políticas y económicas. Es necesario reflexionar que:

“No es posible el crecimiento continuo en un planeta limitado. Cada vez es más claro que estamos superando muchos límites ambientales, por lo que la única estrategia que parece viable a medio y largo plazo es la del decrecimiento. No hablamos de un concepto en negativo, sería algo así como cuando un río se desborda y todos deseamos que ‘decrezca’ para que las aguas vuelvan a su cauce. Cuanto antes seamos conscientes de la necesidad de desprendernos de un modo de vida inviable, mejor para todos y para el planeta.” (Gisbert, 2008, pág.20).

Como se puede notar la propuesta del decrecimiento es un cambio radical en nuestra forma de vida, más acorde con los límites del planeta en el cual vivimos y que invita a abandonar la incesante búsqueda del crecer por crecer. De acuerdo con sus proponentes es “aprender a producir valor y felicidad, pero reduciendo la utilización de materia y energía” (Gisbert, 2008, pág. 22).

Existen otras visiones muy interesantes para entender la relación con la naturaleza, tal como es el caso del “SumayKasay” o el buen vivir (Dávalos, s.f.) que trata de vincular a las personas con la naturaleza en una relación de respeto; o la ética del consumo donde Adela Cortina (2002) plantea que el consumo de unos pocos es inhumano que genere la carencia de muchos. Es necesario una ética del consumo anclada en tres pilares básicos: la igualdad del consumo, la moderación del consumo compulsivo y el diseño de un pacto global sobre el consumo.

Como se puede argüir de lo tratado anteriormente, la sostenibilidad es el principal elemento sobre el cual recae el reclamo al estilo de desarrollo implementado, por encima incluso de la pobreza o la explotación o la violencia. Pero como afirma Elizalde:

“si bien uno se puede negar a ver la pobreza, la miseria, la violencia o la explotación (...) no puede hacer lo mismo con los problemas ambientales. (...) La contaminación se mete por debajo de las puertas, incluso de los ricos, lo mismo pasa con los cortes eléctricos, los racionamientos de agua, los vertidos de petróleo, los incendios forestales o el mal olor” (Elizalde, 2005, p.81).

Es por ello, que la sostenibilidad es un tema que es vital tener presente, pero que a la vez se debe manejar con el cuidado de no reafirmar la ideología dominante.

Costa Rica no escapa a esas realidades, a pesar de venderse al mundo como un país verde impulsor del desarrollo sostenible. El término desarrollo tiene una influencia de la economía neoclásica que acuña este concepto desde el eurocentrismo aunado a la idea del progreso y la modernización mediante la industrialización, es decir, desarrollo es el progreso de las economías (y las sociedades) atrasadas. Por lo tanto, el desarrollo sostenible es un híbrido compuesto por este componente de la economía neoclásica y la sostenibilidad, concepto esquivo al pensamiento neoclásico.

El concepto de desarrollo sostenible es polisémico y divergente. El capitalismo ha tratado de apropiarse del mismo, sin embargo, aún conserva ese carácter emancipador que tuvo en su origen. El desarrollo sostenible no solo se debe asociar con la conservación o la defensa ambiental sino que incluye todas las dimensiones sociales.

En el caso de una región costarricense como la Chorotega, que incluye en su totalidad a la provincia de Guanacaste, se ha tratado de impulsar un desarrollo sostenible priorizado en el turismo, como eje estratégico. Sin embargo, la apuesta en las empresas transnacionales turística, muchas de ellas españolas o estadounidenses, a veces, contradicen el esfuerzo. Por ejemplo, para Buades (2013, pág. 372):

“los compromisos ambientales de las ETN esquivan tres problemas clave de la crisis global que padece el Planeta: el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y el estrés hídrico. Normalmente, el énfasis suele ponerse en cómo el efecto invernadero puede afectar la viabilidad del negocio turístico en las diversas regiones del globo. Pero lo cierto es que cada vez resultan más preocupantes los cálculos oficiales sobre la contribución del turismo al deterioro del clima”.

Lo cierto es que en la región Chorotega esa ideología del crecimiento económico ha impulsado un cierto modelo que no es sostenible con los límites de usos responsables de los cuales son capaces de soportar los recursos, entre ellos, los naturales. Recursos como el hídrico sufren un estrés, como lo llama Buades (2013), y que acompaña, entre otras, a la industria turística impulsada en nuestra región. Y eso es claro cuando el consumo del agua en la industria turística es muy superior a la que hace la población permanente.

Por lo tanto, es necesario hacer un alto y comprender que no se puede consumir más allá de los límites, lo cual nos recuerda no solo las propuestas de los defensores del decrecimiento, o la ética del consumo de Cortina, sino también el “*SumayKasay*” de los pueblos indígenas de América del Sur.

## II. Clima: sus cambios

Cuando se leen datos sobre la huella que deja el ser humano en el planeta, resulta impactante observar como la sociedad actual está lejos del “*SumayKasay*” y como consecuencia debe regular su demanda de recursos, pues lo que se consume del medio natural en un año requiere de un tiempo de un año y cinco meses para regenerarse (Global Footprint Network, 2014). Se consume más de lo que el planeta es capaz de proveer anualmente, esto quiere decir que, de mantenerse las condiciones actuales de consumo, o si estas siguen aumentado, el escenario futuro solo puede ser de desabastecimiento y deterioro ambiental. Sin embargo, los cambios que esto produce en el ambiente sumado a la dinámica natural del planeta, tienen consecuencias que a veces se ha supuesto que no es posible observarlas en un par de años o décadas.

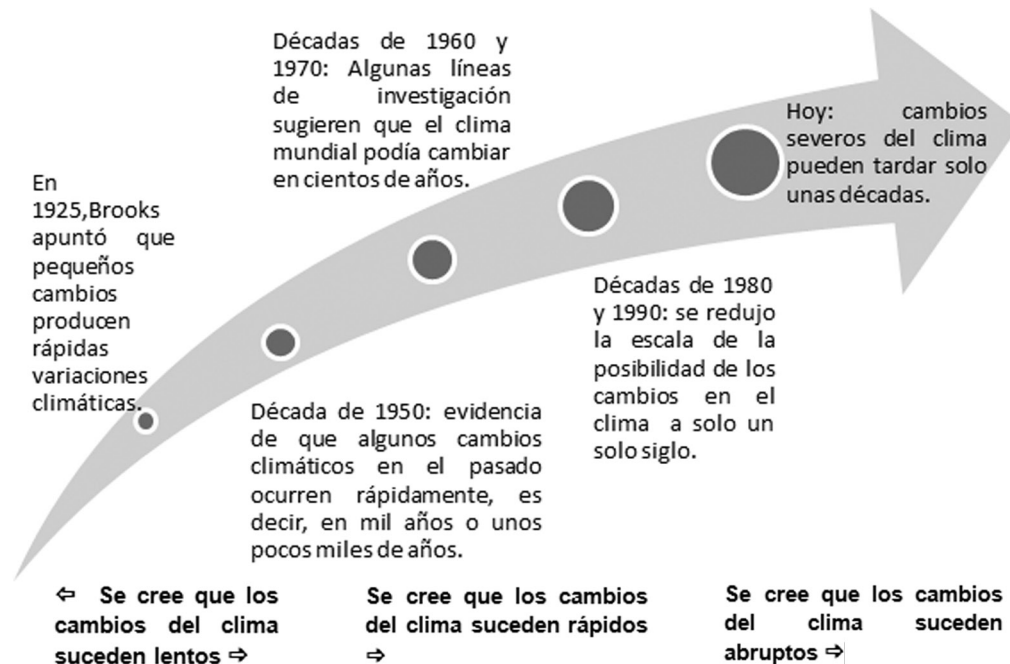
Hace 10 años un científico escribió lo siguiente sobre el clima en la Tierra: “Sólo en la última década los investigadores han valorado la posibilidad de cambios abruptos en el clima de la Tierra. A veces, se necesita un tiempo para ver lo que uno no está dispuesto a buscar”<sup>6</sup> (Weart, 2003, pág. 30). Esta publicación de Weart (2003) provee una perspectiva de lo que significaba el cambio climático hace

<sup>6</sup> Traducción del inglés por los autores.

dos décadas. También produce el deseo de reflexionar sobre un asunto tan importante y particularmente reciente.

Weart (2003) realizó un recuento de los trabajos que abordaban el estudio del clima y sus cambios, como resultado mostró cómo el conocimiento científico del clima en la Tierra está transformándose drásticamente en el último siglo. Así, señaló que en el pasado se creía que los grandes cambios en el clima tomaban decenas de miles de años. A inicios del siglo XX fue sugerido que un “pequeño cambio de las condiciones ambientales puede derivar en un cambio autosostenible entre los estados climáticos” (Weart, 2003, pág. 30) (figura 1). En su momento esto se consideró como algo absurdo (Weart, 2003). A mediados del siglo XX se encontró evidencia de cambios en el clima que habían tardado solo unos miles de años. Durante las décadas de 1960 y 1970 otros científicos apuntaron que el clima mundial podía cambiar en cientos de años, mientras que en las décadas de 1980 y 1990 los investigadores redujeron ese tiempo a solo un siglo. En el inicio del nuevo milenio (XXI) se afirmó que esto se reducía a una sola década (Weart, 2003). ¿Qué sugiere esto? Por lo menos tres aristas con relación al clima y sus cambios: a) la primera, que en la actualidad existen avances tecnológicos que permiten la observación, la recolección y el procesamiento de datos relacionados con el clima, que a su vez generan nuevos datos, con otros niveles de análisis y de precisión; b) que ya la humanidad vive en el tiempo de las “consecuencias” de la transformación humana del ambiente y que el clima se ve impactado por esto (IPCC, 2007) y c) como afirmó Weart (2003), que el viejo paradigma sobre el tiempo que tomaban los cambios en el clima global ya fue sustituido por uno de “cambios abruptos”.

*Figura 1. Clima en la Tierra y los cambios en el conocimiento de su variación temporal: del cambio lento al cambio abrupto.*



Fuente: Elaborado por los autores con información de Weart (2003).

### *¿Qué produce cambios abruptos en el clima?*

Desde el punto de vista científico, el cambio climático abrupto sólo puede aceptarse si se puede establecer una teoría válida para explicarlo. Pese a que la evidencia de los cambios en el clima podían producirse en períodos cada vez más cortos, fue hasta que se presentó el informe en 1993, del análisis



de los núcleos de hielo de Groenlandia (Weart, 2003), que las dudas se disiparon. Posteriormente, en el Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático del 2007 se lee que:

“El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar” (IPCC, 2007, pág. 2)

Este informe alerta sobre las consecuencias del calentamiento del clima sobre todos los ecosistemas del planeta. Así por ejemplo, en los ecosistemas árticos y antárticos ha tenido lugar un deshielo, que ha aumentado la cantidad y el tamaño de los lagos glaciares y produce inestabilidad en el permafrost y en las laderas de las regiones montañosas. Las comunidades humanas y ecosistemas naturales que dependen del abastecimiento del agua proveniente de las regiones congeladas del planeta, también se ven afectadas, pues los sistemas hidrológicos, tienen variaciones en la cantidad de agua y temperatura. Adicionalmente, el aumento de la temperatura hace que la flora y la fauna tropical se esté desplazando hacia los polos y hacia mayores altitudes (IPCC, 2007). Otro resultado del calentamiento global es la probabilidad de que ocurran olas de calor, que se produzca un aumento de las localidades afectadas por las sequías y que hayan otros sitios en el mundo que están en riesgo de ser afectados por las precipitaciones intensas (IPCC, 2007). A todas esas consecuencias, se le suman los cambios en los océanos y mares, en aspectos como circulación, salinidad, temperatura y nivel de mar, entre otros.

Como una de las causas del calentamiento climático el IPCC (2007, pág. 5) ha identificado que “la variación de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles en la atmósfera, y las variaciones de la cubierta terrestre y de la radiación solar, alteran el equilibrio energético del sistema climático”. El dióxido de carbono es el GEI más importante y sus emisiones han aumentado en un 80% desde 1970 al 2004 (IPCC, 2007). Este aumento en las emisiones y concentración mundial de este gas se debe especialmente al uso de combustibles fósiles y en menor medida, a las transformaciones del uso de la tierra (IPCC, 2007). Como se observa, ambas son causadas por el ser humano.

Para enfrentar el cambio climático se requiere de medidas de adaptación, que son políticas y acciones adoptadas como respuesta a situaciones reales o potenciales relacionados con los riesgos derivados del cambio en el clima. Entre las medidas de adaptación se deben tomar en cuenta por ejemplo, temas como el cambio energético y la disponibilidad y manejo del recurso hídrico. Estas medidas deben ser desarrolladas y aplicadas por los organismos internacionales, por los estados e incluso por las comunidades.

Las variaciones del clima conllevan que las poblaciones se encuentren en una situación de vulnerabilidad, pues producen no solo un aumento en la temperatura, sino que también ponen en riesgo la seguridad alimentaria y los modos de vida, por ejemplo. Esta vulnerabilidad frente al cambio climático puede verse desde dos perspectivas, una que la observa como un punto final y otra que la visualiza como un punto de partida (Kelly y Adger, 2000 citados por Green, Niall y Morrison, 2012). La primera aproximación, tiene su foco de interés en el impacto neto de un escenario de cambio climático dado en una sociedad o un ecosistema después de haber implementado las medidas adaptativas; y, la segunda, considera que es una característica o estado de un sistema generada por múltiples sociales y procesos ambientales, que son ellos mismos potencialmente exacerbados por los efectos del clima (Green, Niall, & Morrison, 2012).

### *El debate sobre el cambio climático y las acciones*

En el Informe del IPCC (2007) señala que se puede afirmar con un grado de confianza muy alto que el calentamiento que ocurre en el planeta es producto de las actividades humanas desarrolladas

desde 1750. La génesis de este proceso de cambio en el clima es producto del inicio y desarrollo de las actividades industriales y los grandes cambios en el uso de la tierra. Hoy en día, aunque no queda duda de que existe una amenaza por el cambio del clima a nivel mundial, la amenaza parece estar disminuida por la prioridad que se le da al crecimiento económico y a la acumulación de capital (Hamilton, 2012). Persiste en la relación del ser humano con la naturaleza una visión antropocéntrica, una comprensión totalmente instrumentalista de la relación entre los humanos y la naturaleza (Koch citado por Hamilton, 2012).

Existe una dualidad que debe superarse para poder implementar medidas de mitigación y adaptación al cambio climático. Por un lado existe una demanda pública de las medidas para reducir las emisiones nacionales de carbono que está constantemente frustrada por las corporaciones que ejercen el poder político (Hamilton, 2012). Por otro lado, existe una negación del cambio climático, considerándolo una “lucha hegemónica entre los intereses de oposición de grupos con diferentes recursos de poder” (Koch citado por Hamilton, 2012, pág. 722). Pese a existir grupos de presión que abogan por la aplicación de medidas que reduzcan el deterioro ambiental, muchos de sus participantes no se encuentran comprometidos, sino que asumen acciones simbólicas, que parecen restar importancia a las advertencias de los científicos del clima (Hamilton, 2012).

Hamilton (2010 citado en Hamilton 2012) señala que existe evidencia que muestra que en la década de 1990 surgió una fuerza política que trabajó por la negación de estos cambios en el clima, principalmente por asesores estadounidenses financiados por las empresas de combustibles fósiles. Pero lo más importante, es que este pensamiento ha crecido y se ha convertido en un movimiento político y cultural (Hamilton, 2012). Esto conlleva la necesidad de ampliar los procesos de educación ambiental, la difusión de la información científica sobre el tema del clima y sus cambios, el aumento en la inversión en investigación y el diseño de medidas adaptativas que reduzcan los riesgos de las poblaciones humanas y ecosistemas por el cambio climático.

En el mundo se han creado estrategias para enfrentar los procesos de degradación ambiental que afectan el clima. Desde hace casi dos décadas, los políticos de Estados Unidos y en otros lugares del mundo han supuesto que un precio a las emisiones de carbono sería una estrategia efectiva para enfrentar el cambio climático, sin embargo, el uso de combustibles fósiles sigue en aumento y el cambio tecnológico y la adopción de medidas para disminuir las emisiones de carbono son desestimulados en ocasiones por el costo del cambio tecnológico, la potencial pérdida de empleo y por desestimulo que podría sufrir la producción (Bonvillian, 2011).

Un problema que deben vencer los creadores de nueva tecnología en materia de energía, es cómo vencer la curva de precios inicial, que situará a la innovación energética en un costo mayor que la fuente de energía comúnmente utilizada (Bonvillian, 2011). Esto se constituye en un problema para el financiamiento de los procesos de investigación y desarrollo de nuevas energías y la introducción de estas en el mercado. Así, se prevé que pese a las consecuencias ambientales de su uso, sobre todo en términos del calentamiento climático, los combustibles seguirán en su posición de fuente de energía dominante hasta el 2030 (IPCC, 2007).

Las medidas de mitigación y adaptación del cambio climático requieren una serie de incentivos económicos para que las compañías introduzcan cambios en su modelo energético y desarrollar en todos los sectores de la sociedad una conciencia de la necesidad de ver en el ahorro energético y de los recursos naturales, especialmente, del agua, uno de los caminos que deben ser priorizados, pues no solo se debe trabajar en la dotación (cantidad) sino en la forma en que son consumidos.

### III. Cambio del clima y su relación con la disponibilidad y acceso al agua potable

Indudablemente es de vital importancia considerar las relaciones existentes entre los cambios del clima y sus efectos sobre la seguridad del agua, tanto para los humanos como para las demás especies de flora y fauna en la tierra. Por ello, la relación entre el cambio climático y los recursos de agua suscita una preocupación y un interés de primer orden (Bates, Kundzewicz, Wu, & Palutikof, 2008, pág. 7).

El clima, el agua y los sistemas biofísicos y socioeconómicos están intrincadamente interconectados, por lo que un cambio en uno de ellos induce un cambio en otro distinto. El cambio climático, ocasionado por las acciones humanas, aumenta la presión que están experimentando ya las naciones ante el problema de la utilización sostenible del agua (Bates, Kundzewicz, Wu, & Palutikof, 2008); (Wilk & Wittgren, 2009). Las repercusiones del cambio climático y los recursos hídricos será debida principalmente a los cambios en el ciclo hidrológico, el cuál será intensificado con una mayor evaporación y mayores precipitaciones distribuidas de manera desigual en todo el mundo y en algunas partes se podrán ver reducciones significativas en la precipitación, o alteraciones importantes en el tiempo de las estaciones húmedas y secas (Arnell, 1999).

Durante el Siglo XX, se observó una tendencia hacia las sequías más generalizadas en regiones como el sur de África, Centro América y el sur de Asia. Las sequías agravan las tierras áridas, zonas habitadas por el 34 por ciento de la población mundial y hogar de ocho de los 25 “puntos calientes” de biodiversidad observados en el mundo (Wilk & Wittgren, 2009, pág. 4). Por otra parte, en el siglo XXI la urbanización ha sido la tendencia más significativa, que está afectando al desarrollo económico global, el consumo de energía, el uso de recursos naturales y el bienestar humano en general (McDonald, 2014). Ambas tendencias en siglos diferentes han desencadenado una serie de desafíos para las naciones en el crecimiento de su desarrollo.

El acceso al agua para suplir las necesidades de las poblaciones y asegurar el desarrollo económico de las naciones sin perjudicar el medioambiente es un tema de gran relevancia. A nivel mundial, 3600 millones de personas viven en zonas urbanas y se proyecta que en las próximas décadas será el período más rápido de crecimiento urbano en la historia humana (PNUD, 2011). La FAO indica que para el 2025, 1800 millones de personas vivirán en países o regiones donde habrá escasez absoluta de agua (FAO, s.f.). Esto representa un gran reto para la sociedad, ya que los habitantes necesitarán agua y paradójicamente se desconoce de dónde estas grandes ciudades tomarán el preciado líquido y lo que implicaría la extracción del agua y la construcción de esta infraestructura necesaria sobre el ciclo hidrológico global (McDonald, 2014); (Padowski, 2013).

Según las proyecciones científicas el cambio climático tendrá un gran impacto en la distribución temporal y espacial de los recursos hídricos, mediante el aumento de los cambios anuales, inundaciones y sequías, entre otros desastres (Mac Donald *et al*, 2014); (Xianbai, 2013). Esto requiere reflexión y mejora en la gestión actual del agua, integrado con la gestión del riesgo ante desastres como inundaciones o sequías, por ejemplo es importante que se invierta en la elaboración en sistemas de gestión de emergencias y de alerta temprana para que de esta forma se prevengan grandes pérdidas humanas, económicas y ecológicas.

Es importante reconocer el vínculo existente entre la disponibilidad de agua para el desarrollo de las diferentes actividades humanas y el cambio climático. En este sentido, Xianbai (2013) indica que el cambio en la cantidad de agua determinará en forma importante la distribución entre agricultura, industria y uso doméstico. Debido a diferencias topográficas, geografía y circunstancias meteorológicas en territorios amplios, será más húmedo en algunos lugares, mientras que en otros será más seco (Xianbai, 2013, pág. 905).

Bates *et al.* (2008) indican que en las áreas que padecen estrés hídrico, las personas y los ecosistemas son particularmente vulnerables a una disminución o a una mayor variabilidad de la precipitación por efecto del cambio climático. Mac Donald *et al.* (2014) evaluaron la demanda de agua en ciudades con más de 750000 personas y para conocer cuál será el estrés hídrico y las causas de escasez de agua en las ciudades, demostrando que los modelos hidrológicos mundiales aplicados anteriormente ignoraban la infraestructura hidráulica urbana, lo cual sobreestimaba significativamente el estrés hídrico urbano. Sin embargo, es su estudio ellos aclaran que no incluyeron la estimación de las necesidades de flujo de aguas superficiales necesario para mantener saludables los ecosistemas de agua dulce, ya que existe una gran incertidumbre científica acerca de los requerimientos de los ecosistemas fluviales.

Los recursos hídricos, tanto en términos de cantidad como de calidad, están gravemente afectados por las actividades humanas, en particular: la agricultura y cambios de uso del suelo, la construcción y gestión de embalses, las emisiones de sustancias contaminantes, el mal manejo y disposición de aguas negras y/o la falta de saneamiento adecuado (Bates, Kundzewicz, Wu, & Palutikof, 2008). Todos estos factores atentan contra la seguridad hídrica en los países.

En la última década el concepto de seguridad hídrica ha evolucionado y recibido mayor atención, tanto en la política y los debates académicos (Bakker & Cook, 2012). La seguridad hídrica se define como la provisión confiable de agua cuantitativa y cualitativamente aceptable para la salud, la producción de bienes y servicios y los medios de subsistencia, junto con un nivel aceptable de riesgos relacionados con el agua (Grey & Sadoff, 2007).

En la seguridad hídrica se deben considerar tres aspectos: la cantidad, la calidad y la seguridad de las infraestructuras del agua (Xianbai, 2013). La calidad del agua puede ser afectada por el cambio climático y los cambios en la cantidad del agua. De acuerdo con Bates *et al.*, 2008, mencionado por (Xianbai, 2013, pág. 905), el IPCC predice que regiones enfrentando temperaturas más altas en el agua e incrementos en las precipitaciones, probablemente experimentarán incrementos en la contaminación del agua debido a sedimentos, nutrientes, productos químicos utilizados en agricultura y sustancias orgánicas disueltas<sup>7</sup>.

En términos generales, la calidad del agua superficial y subterránea ha disminuido en los últimos decenios, debido principalmente al crecimiento de la actividad agrícola e industrial (UN, 2006, mencionado por Bates *et al.*, 2008). Lo anterior atenta con la seguridad hídrica de las poblaciones y puede convertirse en un problema de salud pública.

La vinculación entre el acceso de agua en cantidad y calidad con la pobreza y por ende la seguridad alimentaria es crucial. De acuerdo con (DPR, 2012, pág. 19), en las diferentes regiones, los impactos del cambio climático ocurren desproporcionalmente en los países, en las cuencas transfronterizas y en los grupos sociales con menor capacidad para enfrentarlos. De acuerdo con Asia – Pacific Water Forum (2012), quienes carecen de seguridad en cuanto al agua (incluyendo seguridad para desastres relacionados con el agua) son mayoritariamente pobres, que viven geográficamente aislados, en lugares ecológicamente degradados o propensos a desastres, y no cuentan con beneficios de gobiernos locales e infraestructura (Asia - Pacific Water Forum, 2012, pág. 3).

Las medidas de gestión del agua necesitan diseñarse con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de la población más sensible. En ese sentido, es esencial ubicar el alivio de la pobreza en el centro de la adaptación al cambio climático.

América Latina y el Caribe (ALC) es un buen ejemplo sobre los cambios globales que están ocurriendo en el mundo, muchos países de ALC han experimentado un notable crecimiento económico a lo largo

<sup>7</sup> Traducción hecha del inglés por los autores

de la última década, estimulado en parte por el intenso desarrollo del sector primario y la creciente especialización en la producción y exportación de materias primas agrícolas y mineras para satisfacer la creciente demanda global (Willaarts, Garrido, & Llamas, 2014) y esto plantea importantes retos para los gobiernos en términos de seguridad hídrica y alimentaria.

En esta región se concentran además cuatro de las mega-ciudades más importantes del mundo (México D.F., São Paulo, Buenos Aires y Rio de Janeiro). Sin embargo, no se puede olvidar la situación en las áreas rurales donde el problema no acaba y más bien se vuelve más complejo en términos de cantidad, calidad y seguridad de las infraestructuras o inclusive falta en inversión de infraestructuras y estudios hidrológicos. Por ejemplo, en 2005 el 29% de la población urbana en ALC vivía en asentamientos informales (favelas, villas miseria), aunque las últimas cifras parecen apuntar a una mejora sustancial. El intenso y desordenado proceso de urbanización dificulta garantizar un adecuado acceso al agua y saneamiento en ALC (Willaarts, Garrido & Llamas, 2014). Los retos se incrementan principalmente en las grandes ciudades y sobre todo aquellas que crecen a tasas más aceleradas como las latinoamericanas.

### *Evolución y debate del tema*

La discusión sobre el acceso al agua se ha tornado cada vez más intensa en las esferas de la comunidad científica y política internacional. Los expertos dicen que los problemas que habrá que resolver en relación con el agua potable son: el exceso de agua, la escasez de agua, y el exceso de polución. Cada uno de esos problemas puede ser amplificado por el cambio climático (Bates, Kundzewicz, Wu, & Palutikof, 2008, pág. 7).

Los retos que afrontan los gestores del agua en general se acrecientan como consecuencia del grado de incertidumbre existente en las predicciones a largo plazo del cambio climático. Sin embargo, Eckstein (2010) mencionado por Xianbai (2013) indica que mientras que los modelos de cambio climático están plagados de gran incertidumbre, sus conclusiones son abrumadoramente consistentes: el cambio climático tendrá un impacto en las temperaturas, las tasas de precipitación y la consistencia de la precipitación.

En ese sentido, es muy interesante considerar las afirmaciones de expertos del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), cuando dicen que "...hasta la fecha, los problemas relacionados con los recursos hídricos no han sido adecuadamente abordados en los análisis del cambio climático, ni en la formulación de políticas sobre el clima. En la mayoría de los casos, no se han tenido en cuenta tampoco adecuadamente los problemas que plantea el cambio climático en relación con los análisis, la gestión o la formulación de políticas relativas a los recursos hídricos" (Bates, Kundzewicz, Wu, & Palutikof, 2008, pág. 7).

La gestión integrada de recursos hídricos (GIRH) debe abordarse como un elemento fundamental en el proceso de adaptación y mitigación de los impactos del cambio climático. DRP (2012) plantean que "la contribución y el papel central de la GIRH para enfrentar los impactos del cambio climático son ampliamente reconocidos. Tres elementos principales de la GIRH justifican esta visión: (i) la GIRH reconoce el ciclo hidrológico y a sus diferentes usuarios de forma holística y tiene como objetivo asegurar la participación de todos los actores con el fin de llegar a un plan integrado, en el que las actividades puedan llevarse a cabo de forma equilibrada. (ii) La GIRH fomenta el desarrollo de instituciones fuertes, que son esenciales en la gestión equitativa y eficiente del agua. (iii) La GIRH es una forma de gestión adaptativa que es inherentemente flexible a los cambios en la demanda y la oferta de agua (DPR, 2012, pág. 17).

Es importante considerar que un proceso efectivo y sostenido de adaptación al cambio climático en materia de agua no puede considerarse como responsabilidad única de los gobiernos, sino que



requiere de una participación amplia y organizada, desde el diseño hasta la implementación y monitoreo de políticas relevantes, en las que se enfatice la participación de las mujeres y de los grupos marginados de la sociedad (DRP, 2012, pág. 19).

Una buena gestión del agua es un tema mucho más amplio que el suministro de agua a poblaciones sedientas. Los ecosistemas y la biodiversidad, la agricultura y la seguridad alimentaria, el uso del suelo y la silvicultura, la salud humana y el saneamiento, los asentamientos y la industria de infraestructura y energía, todas dependen de una buena gestión del agua (Wilk & Wittgren, 2009, pág. 3)<sup>8</sup>

Los especialistas enuncian diversas medidas de adaptación en cuanto a la gestión del recurso hídrico. Wilk & Wittgren (2009) mencionan que la adaptación al cambio climático se puede dar de dos formas: a) estrategias que específicamente toman en cuenta el cambio climático y variabilidad (adaptación planificada) y b) aquellas estrategias con objetivos que no están específicamente relacionadas con el clima, pero que mejoran la resistencia al cambio del clima como un efecto adicional (adaptación autónoma). La adaptación autónoma es aquella principalmente utilizada por las poblaciones más relegadas y en condiciones de pobreza.

Dentro de las opciones de la adaptación autónoma se tienen (Wilk & Wittgren, 2009):

- Revivir el interés en sistemas tradicionales de cosecha de agua para complementar las prácticas de consumo para uso doméstico y riego
- Restauración de instalaciones de riego abandonadas o en mal estado para mejorar la eficiencia del agua y la equidad en el acceso
- Mantenimiento y establecimiento de humedales para atrapar nutrientes y proveer alimento y forraje para las personas y el ganado.

Otras medidas un poco más globales, que requieren el concurso de autoridades y tomadores de decisión incluyen:

- Aumento de los servicios de abastecimiento de agua y servicios de los ecosistemas.
- Disminución de la demanda de agua e incremento de la eficiencia en el uso y reúso del agua
- Mejoramiento de la protección contra inundaciones
- Creación de redes hidrometeorológicas
- Mejorar el conocimiento sobre el cambio climático y el agua y difundir buenas prácticas entre los países y las regiones (FAO, s.f.).

Además, es indispensable considerar temas de política y gobernanza en la gestión de recursos hídricos. Los principios de una buena gobernanza implican que los esquemas de adaptación estén orientados al consenso, sean participativos, efectivos, eficientes, responsables, transparentes, flexibles, equitativos, inclusivos y apegados a la ley. Estos son principios básicos que deben considerarse seriamente para lograr establecer procesos legítimos e instituciones confiables que den lugar a medidas eficaces de adaptación (DRP, 2012).

La Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) utilizada como herramienta de adaptación al cambio climático se muestra como una excelente forma de abordar las diferentes temáticas expuestas anteriormente. La participación y compromiso de los diferentes sectores involucrados en la gestión del agua es fundamental, este hecho puede hacer pensar que es una utopía y que probablemente no sea alcanzable. Sin embargo, las exigencias que plantea el cambio climático son reales y debe haber una respuesta seria para afrontar los problemas socio ambientales, así como, asegurar a las siguientes generaciones agua en calidad y cantidad aceptables para cubrir las necesidades de la población, el desarrollo económico y la salud de los ecosistemas.

<sup>8</sup> Traducción del inglés hecha por los autores

## IV. Clima y energía

En esta sección se desarrolla la relación del ser humano en la modificación del clima en el planeta, desde la perspectiva del uso de la energía en la producción y consumo. De manera específica, se analiza la modificación del clima a causa del estilo de vida moderno y los sistemas de producción industrial y post industrial.

La comunidad científica internacional ha evidenciado las graves consecuencias que se podrían experimentar en el planeta, a causa del cambio climático global y la cuota de responsabilidad social. También aclaran los resultados científicos que el calentamiento global y el efecto invernadero no tienen nada de nuevo, y que la misma naturaleza se ha encargado de aportar gases de efecto invernadero a la atmosfera, por ejemplo:

“el anhídrido carbónico que los volcanes arrojaban a la atmósfera, rescató al planeta de su fase bola de nieve. De hecho, si no fuera por el efecto invernadero, la temperatura media en la superficie terrestre sería de 20 grados bajo cero. En otras palabras, sin el efecto invernadero, los océanos llevarían mucho tiempo congelados y habría sido imposible la vida en el planeta” (Trefil, 2005, pág. 162).

Sin embargo, tal y como se explica en los apartados anteriores, el ritmo de crecimiento de la sociedad industrial y los estilos de vida de la sociedad moderna han acelerado los impactos ambientales negativos, generando efectos globales irreversibles. La sociedad actual está experimentando lo que se conoce como la crisis de la cultura moderna.

En este sentido y con la intención de invitar a la reflexión y al cambio socioambiental, se plantea el tema ambiental desde distintas miradas, superando el paradigma economicista que se ha encargado de ubicar al ser humano como centro y dominador de la naturaleza y por tanto tomador de cuanto pueda del medio ambiente natural.

Para profundizar en la comprensión de la dinámica socio-ambiental se aborda distintas líneas de estudio, entre ellas, las relaciones entre la sociedad y la naturaleza: las percepciones ambientales y la intersubjetividad ambiental. Entre las disciplinas que están generando grandes aportes al debate están los historiadores ambientales, quienes no solo se cuestionan “el ethos del mercado o del industrialismo como argumento central que hemos venido contándonos unos a otros durante los últimos doscientos o trescientos años: la historia del triunfo de la razón humana sobre el resto de la naturaleza” (Worster, 2006, pág. 169).

Ante la difícil situación ambiental que vivimos, el autor citado se pregunta ¿Qué podemos hacer entonces? ¿Cuál es la solución a la crisis ambiental generada por la modernidad y su materialismo? A lo cual responde: “la única salida verdadera que se abre ante nosotros consiste en empezar a trascender nuestra visión del mundo fundamental, en crear una visión postmaterialista de nosotros mismos y del mundo natural” (Worster, 2006, págs. 169-170).

Durand (2008) citado por Mojica (2010, pág. 106) se refiere a la noción de perspectivas ambientales como “la forma en que las personas conocen y entienden su entorno natural”. Durand, explica que “las perspectivas ambientales son el conjunto de normas, supuestos y valores derivados de la vivencia del entorno natural y permiten comprenderlo y explicarlo”. Por su parte, Mojica (p.106) explica que:

“desde la perspectiva de la intersubjetividad ambiental, los sujetos sociales son producto y productores de sentido y forman partes inseparables del medio natural. Ellos producen subjetividades relacionados con el orden o desorden social y ambiental; pueden ser conscientes o no de los procesos de degradación del ambiente”.

Toledo y Gonzáles de Molina (2007) establecen que en la relación entre la sociedad y la naturaleza (metabolismo social), se genera una situación de determinación recíproca, pues “la forma en que los seres humanos se organizan en sociedad determina la forma en que ellos afectan, transforman y se apropian de la naturaleza, la cual, a su vez, condiciona la manera como las sociedades se configuran”.

Es así como se explica el comportamiento social generalizado (imaginario social) relacionado al sentido o sin sentido que desarrolla el modelo de educación que legitima el uso y mal uso, apropiación, domesticación y explotación de la naturaleza, transformada en el modo capitalista a “recursos naturales”. En la visión capitalista no se reconoce la ambición materialista como un vicio, sino que exalta el éxito social en el “tener” sin reconocer que “el crecimiento económico o “desarrollo” ilimitado, se ha convertido en una embestida fanática contra la tierra” (Worster, 2006, pág. 170). Desde el punto de vista economicista de mercado, la naturaleza se ha estudiado desde la economía de los recursos naturales, asociado a la capacidad del ser humano para producir todo lo que las sociedades modernas necesitan para vivir en un máximo de comodidad. Esta es la tesis relacionada a gestionar la naturaleza, y parte de la idea de que el ser humano dispone de la naturaleza para su beneficio. Sin embargo, “estamos empezando a aprender que no podemos utilizar ese poder de manera tan segura como imaginábamos. No podemos prever todas las consecuencias de nuestro ingenio, y la codicia por racionalizada que esté- sigue siendo la fuente del mal y de la autodestrucción” (Worster, 2006, pág. 168).

Sin duda se debe lograr un cambio social que devuelva la esperanza. El autor citado menciona que no sabe si el compromiso de cambio debe aparecer primero en las sociedades industriales más avanzadas, donde tanta gente ha empezado a tener dudas acerca del mundo que han creado, o en las más atrasadas, donde la mayoría de la población aún está en un proceso de convertirse a la modernidad en medio de sus propias y grandes dudas” (Worster, 2006, pág. 170).

### *Vinculando el cambio climático con la energía*

Entre los desafíos globales el tema energético está en centro del debate. La preocupación está asociada a la búsqueda de un consenso mundial, que ponga en la balanza una verdadera evaluación de los impactos ambientales en el planeta y las medidas a adoptar en los años venideros. Según la ONUDI<sup>9</sup>, “el cambio climático y las políticas sobre energía están unidas de forma inevitable: dos tercios de las emisiones provienen de la energía que utilizamos. Por lo tanto, la Estrategia Energética de la ONUDI apunta a asistir a los países en desarrollo y a los países con economías en transición para alcanzar los siguientes objetivos:

- Aumentar la competitividad de sus industrias reduciendo la intensidad energética industrial.
- Reducir el impacto sobre el cambio climático disminuyendo las emisiones de carbono de sus industrias y fomentando tecnologías de energía renovable.
- Aumentar la viabilidad de sus empresas, especialmente en las áreas rurales, intensificando el uso de fuentes de energía renovable (ONUDI, 2014).

Es claro que las sociedades modernas basan el confort de vida en los servicios derivados de la producción de energía tanto para la producción como para el consumo. El nivel de dependencia se puede medir con solo recordar un apagón de electricidad en una ciudad moderna. El mayor problema está asociado al nivel de dependencia de fuentes energéticas contaminantes, entre ellas la quema de combustibles fósiles:

---

<sup>9</sup> ONUDI es una agencia especializada de las Naciones Unidas que promueve el desarrollo industrial para la reducción de la pobreza, la globalización inclusiva y el desarrollo sostenible.

“Las modernas economías industriales funcionan casi exclusivamente a base de combustibles fósiles: carbón, gas natural y petróleo. La contribución de la energía hidroeléctrica y nuclear, aunque existe, representa menos del 15 por ciento del presupuesto energético de un país como Estados Unidos. El resto de la energía utilizada en la calefacción de nuestros hogares, en los motores de nuestros coches y en el funcionamiento de nuestras fábricas procede de la quema de combustibles fósiles” (Trefil, 2005, págs. 162-163).

El tema de las externalidades ambientales negativas derivadas de los estilos de vida, producción y consumo de las principales economías del mundo está en el centro de la discusión. Distintas posiciones alzan la voz ante el mundo reclamando y denunciando los daños ambientales que causan los países de mayor desarrollo industrial y por tanto principales economías del mundo. En este aspecto, Sterner (2007, pág. 237) indica que se deben corregir las externalidades negativas mundiales, imponiendo una carga correctiva, y reconoce que el principal daño mundial es la emisión de dióxido de carbono hacia la atmósfera y el cambio climático consiguiente.

El consumo creciente de energía por parte de los países emergentes (principalmente China) y los países de mayor desarrollo industrial y económico, mantiene una alta tensión en las políticas energéticas de los países de América Latina. La dependencia y uso de hidrocarburos como fuente de energía se mantiene, mientras las fuentes de producción se agotan, provoca precios altos y la necesidad de diversificar las fuentes de energía. Frente a este escenario, aunado al aumento de los cambios climáticos globales, los países deben replantear las políticas públicas que permitan garantizar la seguridad energética y los objetivos de disminución de emisiones de gases efecto invernadero.

En esta dirección, la CEPAL indica que América Latina tiene poco peso en las emisiones globales de dióxido de carbono asociados al sector energético (3,5% al 2005) y no se proyectan variaciones en los planes al 2030. El informe indica que en la mayoría de los países las reformas del sector energético emprendidas desde la década de los noventa no han inducido suficiente movilización de inversión en infraestructura y servicios energéticos, por lo que se evidencian rezagos en infraestructura adecuada, frente a una demanda creciente (Acquatella, 2008, pág. 11).

Se agudiza el debate sobre la ética que debe guiar el comportamiento humano, tanto para conducir las prácticas de consumo como las prácticas de producción. Todo hace indicar que no existe una salida fácil, ya que la conservación del medioambiente choca con los intereses económicos de las principales potencias mundiales que lideran la política internacional asociado al tema medioambiental. Encontrar la mejor manera para enfrentar el cambio climático ha sido una parte importante del debate en torno a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) dentro de la Agenda de Desarrollo Post-2015. El “zerodraft” refleja los intentos por equilibrar el imperativo ambiental en relación a la reducción de las emisiones con el imperativo del desarrollo humano en aumentar el acceso a la energía (ICTSD, 2014).

### *Costa Rica en el escenario mundial: aportes y desafíos frente al cambio climático*

Costa Rica se ha presentado ante el mundo como un país ecológico. A través de su política pública y la ratificación de distintos tratados internacionales en materia ambiental, ha demostrado un fuerte compromiso en la disminución de la huella ecológica. A pesar de lo anterior el panorama actual se plantea difuso.

Por una parte, está el desafío de lograr la meta de carbono neutral en el año 2021, y por otro lado hay cuestionamientos por la incongruencia entre las políticas y compromisos ambientales internacionales adquiridos, y el desempeño exitoso de las medidas adoptadas. Por ejemplo, el Programa Estado de la Nación considera imprecisa la noción de considerar a Costa Rica como un país de energías

limpias, y que ha postergado por años los grandes objetivos de la política pública en esta materia, al indicar que:

“El 70% de la energía nacional proviene de hidrocarburos, lo que configura una matriz de altos impactos ambientales, sociales y económicos. La principal consecuencia de esta situación es la creciente huella de carbono, que es impulsada sobre todo por el uso de combustibles, no solo por parte del mayor consumidor de energía (el sector transporte, con un 60%), sino también por la generación eléctrica, dado el estancamiento en el desarrollo de fuentes limpias” (Programa Estado de la Nación , 2013).

La creciente huella de carbono está asociada a la emisión de gases contaminantes, sobre todo en el sector transportes. Ante esto, la política ambiental costarricense mantiene como propuesta para lograr la meta “carbono-neutralidad”, una serie de incentivos tales como: la promoción de energías limpias, créditos blandos para el sector transportes, “no obstante, entre el 2011 y 2012 se dio un incremento del 5,2% de los GEI (Gases Efecto Invernadero), de los cuales, un 56% son atribuibles a los hidrocarburos” (Programa Estado de la Nación , 2013). El mismo informe indica que para el 2012, el diesel, la leña, las gasolinas y la generación eléctrica térmica, produjeron las mayores emisiones de GEI.

## V. Conclusiones

Es una realidad que la sociedad de consumo está siendo cuestionada no sólo por la comunidad científica, sino por muchos otros sectores. En la actualidad, la sociedad de consumo, marcada por el hiperconsumo y la satisfacción de deseos más que de necesidades, conlleva un uso desmedido de los recursos disponibles en el planeta, una contaminación excesiva y ha llevado a la sociedad a vivir en la “era de las consecuencias”, es decir, a experimentar las externalidades negativas de este sistema de producción y mercado en la naturaleza, afectando aspectos tan sensibles como el clima.

Hace más de cuatro décadas de la primera llamada de atención hacia los aspectos de la industrialización y el crecimiento económico que perjudicaban el ambiente en el planeta y desde entonces el tema ambiental ha estado cada vez más presente en los foros y agendas internacionales. Pese a los esfuerzos orientados a la promoción del desarrollo sostenible y otras hacia la sostenibilidad promovidos por estados, organismos, instituciones y personas, las prácticas políticas, sociales y económicas que tanto daño hacen al medio natural siguen, en gran medida vigentes. A pesar de que el reclamo social por el deterioro ambiental se ha impulsado desde distintas agrupaciones civiles, las organizaciones internacionales que representan los intereses de los países de mayor desarrollo han tomado el control de la política internacional en materia ambiental. Es así como el tema ambiental se ha convertido en parte central del debate internacional, sin que hasta el momento se tomen medidas que verdaderamente pongan freno al deterioro ambiental del planeta. Es decir, el modelo de desarrollo capitalista controla la política mundial relacionada al medio ambiente, introduciendo el tema ambiental en las dinámicas del mercado.

La política pública como mecanismo con que cuenta la autoridad política, debe conducir y controlar las conductas de los agentes económicos, ambientales y sociales, con el propósito de lograr objetivos económicos, sociales y ambientales que la sociedad reclama. Si existe voluntad para enfrentar los problemas ambientales del país y del mundo, hay que avanzar con verdaderos instrumentos para la fiscalización directa o delegada que debe asumir el Estado como autoridad pública que tiene la mayor responsabilidad en lo que sucede, ya sea con incentivos y la existencia de control tanto en el consumo como en la producción sostenible.

Costa Rica al igual que la mayoría de los países del mundo han adoptado el modelo de desarrollo sostenible como paradigma de desarrollo, partiendo del reconocimiento de la crisis socioambiental



que vive la humanidad. Este país ha asumido compromisos internacionales ambiciosos en este sentido, generando una imagen ambiental positiva a nivel mundial, que le ha generado beneficios. Sin embargo, no debe caer en la autocomplacencia sobre sus políticas y conductas ambientales, y debe avanzar en la generación de evidencias que garanticen una evolución a una sociedad educada en materia ambiental.

## Referencias

Acquatella, J. (2008). Energía y cambio climático: oportunidades para una política energética integrada para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile: CEPAL.

Arnell, N. W. (1999). Climate change and global water resources. *Global Environmental Change*, S31-S49.

Asia - Pacific Water Forum. (2012). Framework Document on Water and Climate Change Adaptation. For leaders and policy makers in the Asia - Pacific Region. Phillipines.

Bakker, K., & Cook, C. (2012). Water security: Debating an emerging paradigm. *Global Environmental Change*, 94-102.

Bates, B., Kundzewicz, Z., Wu, S., & Palutikof, J. (2008). El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra.

Bonvillian, W. (2011). Time for Climate Plan B. *Issues In Science & Technology*, 27 (2), 51-58.

Buades, J. (2013). Turismo y bien común. La Responsabilidad Social Corporativa como escudo transnacional contra las sociedades anfitrionas y el ambiente. En Gascón, J; Morales, S y Tresserras, J (editores) (2013). Cooperación en Turismo. Nuevos Desafíos, nuevos debates. Colección Práxis, Cooperación en turismo. Nuevos desafíos, nuevos debates. Barcelona: Foro de Turismo Responsable - Xarxa de ConsumSolidari; COODTUR; Universitat Oberta de Catalunya - Laboratori del NouTurisme; Universitat de Barcelona.

Cortina, A. (2002). Por una ética del Consumo. La ciudadanía del consumidor en un mundo global. España: Taurus.

Dávalos, P. (s.f). SumakKawsay (La Vida en Plenitud).<http://www.puce.edu.ec/documentos/CuestionessobrelSumakKawsay.pdf>

Diálogo Regional de Política de Agua y Adaptación al Cambio Climático en las Américas. (2012). Agua y Adaptación al Cambio Climático en las Américas; Soluciones del Diálogo Regional de Política (DRP). [http://www.aguaycambioclimatico.org/fotos/evento\\_elemento/0ACC\\_DRP.pdf](http://www.aguaycambioclimatico.org/fotos/evento_elemento/0ACC_DRP.pdf)

Elizalde, A. (2005). Desarrollo Humano y Ética de la Sostenibilidad. Chile: PPC Editorial.

Elizalde, A. (2009). ¿Qué desarrollo puede llamarse sostenible en el siglo XXI? La cuestión de los límites y las necesidades humanas. *Revista de Educación*, Número extraordinario.

Ewing, M., & Donn, W. (1956). A Theory of Ice Ages. *Science*, 123 (3207), 1061-1066.

FAO. (s.f.). El cambio climático, el agua y la seguridad alimentaria. Roma, Italia.

Fultz, D. (1951). Experimental analogies to atmospheric motions. En T. Malone, Compendium of Meteorology (págs. 1235-124). Massachusetts: Waverly Press.

Gisbert, P. (2008). Decrecimiento: camino hacia la sostenibilidad. El ecologista, n° 55, invierno 2007/2008. [http://www.usc.es/entransicion/wp-content/uploads/2011/11/Decrecimiento-camino-a-la-sostenibilidad\\_Pepa-Gisbert.pdf](http://www.usc.es/entransicion/wp-content/uploads/2011/11/Decrecimiento-camino-a-la-sostenibilidad_Pepa-Gisbert.pdf)

Global Footprint Network. (28 de marzo de 2014). Huella Mundial. Recuperado el 20 de junio de 2014, de Global Footprint Network: [http://www.footprintnetwork.org/es/index.php/GFN/page/world\\_footprint/](http://www.footprintnetwork.org/es/index.php/GFN/page/world_footprint/)

Green, D., Niall, S., & Morrison, J. (2012). Bridging the gap between theory and practice in climate change vulnerability assessments for remote Indigenous communities in northern Australia. Local Environment. , 17 (3), 295-315.

Grey, D., & Sadoff, C. W. (2007). Sink or Swim? Water security for growth and development. Water Policy (9), 545-571.

Hamilton, C. (2012). Theories of Climate Change. Australian Journal Of Political Science , 47 (4), 721-729.

Hinkelammert, F (2003). Solidaridad o Suicidio Colectivo. Heredia: Ediciones Ambientico.

ICTSD. (06 de 07 de 2014). [www.ictsd.org](http://www.ictsd.org). Recuperado el 07 de 07 de 2014, de [www.ictsd.org](http://www.ictsd.org): [www.ictsd.org/themes/global-economic-governance/research/climate-change-trade-and-sustainable-energy-post-2015](http://www.ictsd.org/themes/global-economic-governance/research/climate-change-trade-and-sustainable-energy-post-2015)

IPCC. (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Ginebra, Suiza: IPCC.

Lipovetsky, G y Charles, S (2006). Los Tiempos Hipermodernos. España, Anagrama.

Marín, J. (28 de Junio de 2014). ONU urge a cambiar la relación de la humanidad con el planeta. La Nación, pág. Sección Vivir.

McDonald, R. W. (2014). Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure. Global Environmental Change, 27, 96-105.

Meadows, D; Randers, J y Meadows, D (2012, versión). Los Límites del Crecimiento. España: Taurus.

Mojica, F. (2010). Referentes conceptuales y metodológicos para el estudio de la colonialidad, intersubjetividad ambiental y resiliencia socioecológica. En J. Escalera, & N. Benavides, Turismo sostenible, desarrollo local y articulación regional transfronteriza en el río San Juan (Costa Rica-Nicaragua) (págs. 97-118). San José, Costa Rica: FLACSO. ONUDI. (06 de 07 de 2014). [www.unido.org](http://www.unido.org). Recuperado el 06 de 07 de 2014, de [www.unido.org](http://www.unido.org): [www.unido.org/index.php?id=1001964](http://www.unido.org/index.php?id=1001964)

Padowski, J. J. (2013). Water availability and vulnerability of 225 large cities in the United States. . 48 . Water Resource. Res, 48(12).

PNUD. (2011). World Urbanization Prospects: The 2011 Revision. New York: United Nations.

Programa Estado de la Nación. (2013). Decimonoveno Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. San José, Costa Rica: Programa Estado de la Nación.

Ruiz Marrero, C (2009). "El fin del crecimiento. Agencia Latinoamericana de Información. América Latina en Movimiento". <http://alainet.org/active/28556&lang=es>

Sterner, T. (2007). Instrumentos de política económica para el manejo del ambiente y los recursos naturales. Turrialba, Costa Rica: CATIE.

Toledo, V., & Gonzáles de Molina, M. (2007). El metabolismo social: las relaciones entre la sociedad y la naturaleza. s.p.

Trefil, J. (2005). Gestionemos la naturaleza. Barcelona: Prentice Halls

Van-Oosterom, P., Zlatanova, S., & Fendel, E. (2005). Geo-information for Disaster Management. Países Bajos: Springer.

Wallerstein, I. (2008). Ecología y Costes de producción capitalista: No hay salida. Publicado en Revista Futuros No.20, 2008 Vol. VI. [http://www.revistafuturos.info/raw\\_text/raw\\_futuro20/ecologia\\_capitalismo.pdf](http://www.revistafuturos.info/raw_text/raw_futuro20/ecologia_capitalismo.pdf).

Weart, S. (2003). The Discovery of Rapid Climate Change. *Physics Today*, 56 (8), 30-36.

Wilk, J., & Wittgren, H. (2009). Adapting water management to climate change. Swedish Water House Poliy, Brief Nr. 7. SIWI.

Willaarts, B. A., Garrido, A., & Llamas, R. M. (2014). Water for Food Security and Well-being in Latin America and the Caribbean. Glasgow: Routledge.

Worster, D. (2006). Transformaciones de la tierra. San José, Costa Rica: EUNED.

Xianbai, H. (2013). Mainstreaming adaptation in integrated water resources. *Water Policy*, 895-921.

# SECCIÓN A: CLIMA Y AGUA



Juntas del Río Quirimán - Nosara, Nicoya, Costa Rica





# Estrategias para el uso y aprovechamiento de los recursos hídricos en regiones semiáridas del occidente de México

MC Aldo Antonio Castañeda Villanueva<sup>10</sup>

## Resumen

En el presente trabajo se aborda la problemática de la escasez de los recursos hídricos en las regiones semiáridas del occidente de México, así como algunas estrategias que se están implementando para afrontar sus efectos. Utilizando como herramienta de análisis, los avances en la hidrogeología, se refuerzan los conocimientos de los ciclos naturales y la hidrodinámica en zonas áridas y semiáridas de los estados mexicanos de Querétaro, San Luis Potosí, Zacatecas, Chihuahua, Durango, Hidalgo, Sonora, Coahuila, Guanajuato y Jalisco, recopilando experiencias en la cosecha del agua de lluvia, la hidroponía, el tratamiento y el reuso de aguas residuales, la aplicación de biosólidos en suelos, la optimización de los sistemas de irrigación y la recarga artificial de acuíferos. Con la finalidad de identificar acciones que se pueden reproducir en otras latitudes y que contribuyan a la conservación de las actuales fuentes de abastecimiento de agua en las regiones semiáridas.

**Palabras claves:** escases de recursos hídricos, regiones semiáridas de México, estrategias de aprovechamiento del agua.

## Strategies for the use and development of water resources in semi-arid regions of western Mexico

### Abstract

In this paper we focus on the problem of shortage of water resources in semi-arid regions of western Mexico, as well as some strategies that are being implemented to address its effects are addressed. Using as an analytical tool in hydrogeology advances, the understanding of natural cycles and dynamics in arid and semiarid regions of the Mexican states of reinforcing Queretaro, San Luis Potosi, Zacatecas, Chihuahua, Durango, Hidalgo, Sonora, Coahuila, Guanajuato and Jalisco, collecting experiences in rainwater harvesting, hydroponics, treatment and reuse of wastewater, biosolids application on soil, the efficiency of irrigation and artificial recharge. In order to identify actions that can be played elsewhere and contribute to the conservation of existing sources of water supply in our regions.

**Keywords:** scarcity of water resources, semi-arid regions of Mexico, water use strategies.

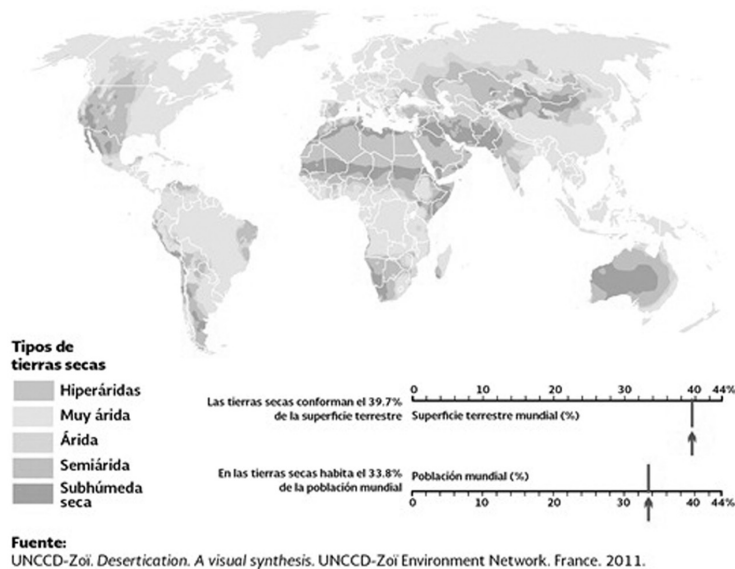
## I. Introducción

La distribución de las tierras secas (zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas) en el planeta, se caracteriza por que estas presentan condiciones climáticas particulares, como son la precipitación escasa e irregular, una gran diferencia entre las temperaturas diurnas y nocturnas, suelos con poca materia orgánica y humedad, además de una elevada evapotranspiración potencial. Estas características propician que los asentamientos humanos se establezcan alrededor de las pocas fuentes de agua disponibles (como ríos, manantiales o pozos) y que éstas sean muchas veces sobreexplotadas o

<sup>10</sup> Centro Universitario de Los Altos, Universidad de Guadalajara, México.

contaminadas (Atlas Mundial de la Desertificación. PNUMA, 1997). Según la Convención de las Naciones Unidas para el Combate a la Desertificación (UNCCD, 2011), el 12,1% de la superficie terrestre del planeta corresponde a zonas áridas, 17,7% a zonas semiáridas y 9,9% a subhúmedas secas. En ellas viven poco más de 2 000 millones de personas (aproximadamente 1 de cada 3 habitantes del planeta), la mayoría en países en vías de desarrollo. Además, las zonas secas albergan alrededor del 50% del ganado y el 44% de las tierras agrícolas del mundo, y son extensiones territoriales muy grandes que representan hábitats de gran valor para la vida silvestre. Las mayores extensiones de tierras secas se encuentran en Australia, China, Rusia, Estados Unidos y Kazajistán (figura 2).

Figura 2. Distribución de las tierras secas en el mundo.



En general, el clima semiárido se registra en las regiones del planeta donde las lluvias anuales están entre los 200 y los 400 milímetros (mm), una cantidad de lluvia inferior a los 200 mm anuales caracteriza a los climas áridos y corresponden a los desiertos y semidesiertos. En la Clasificación climática de Köppen, el clima seco (árido y semiárido) se caracteriza porque las precipitaciones anuales son inferiores a la evaporación. Para el cálculo hay que multiplicar la temperatura media anual por los doce meses y duplicarla, pues se considera un mes húmedo aquel en el que la precipitación en mm es más del doble la temperatura en °C, de modo que para un año habrá de multiplicarse la temperatura media anual por veinticuatro. Bajo estas condiciones se encuentran las estepas y los desiertos, este tipo de climas presentan dos grados de aridez (relación de precipitación y temperatura media) y dos de temperatura (mayor o menor de 18°C). Así, las precipitaciones están entre un 50% y un 100% de la temperatura media anual multiplicada por veinticuatro, en este esquema la vegetación es escasa. Este clima es conocido en algunas regiones como “mediterráneo seco” pues es, en muchas ocasiones, un clima de transición entre el mediterráneo y el desértico. Se da en zonas de estepas, semidesiertos, o zonas previas a los desiertos, en todos los continentes salvo en el antártico. El índice de aridez se obtiene del cociente entre la precipitación anual media y la evapotranspiración potencial media. Los valores entre 0,05 y 0,2 corresponden a zonas áridas; entre 0,2 y 0,5 a zonas semiáridas; y entre 0,5 y 0,65 a subhúmedas secas.

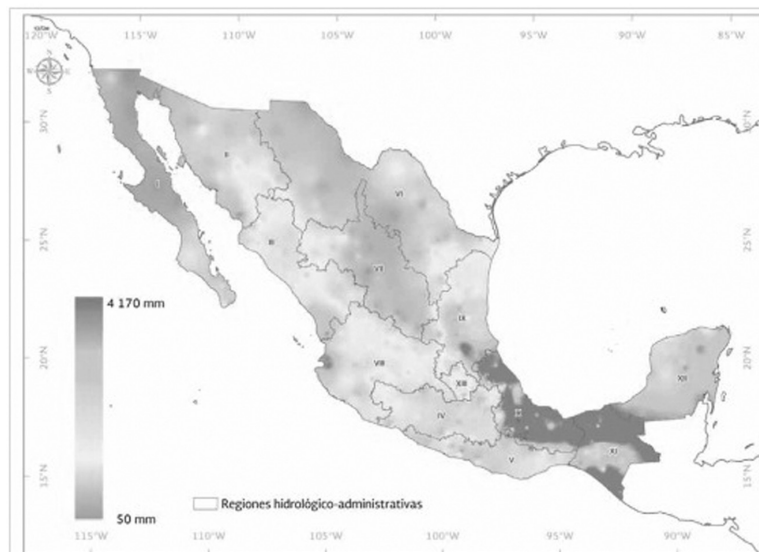
## II. Antecedentes

Las regiones áridas y semiáridas del centro-occidente de México, a la llegada de los españoles, se encontraban habitadas por pueblos indígenas que fundamentaban su alimentación en la caza y la

recolección, conocidos como “chichimecas”, nombre náhuatl para calificar a toda etnia en estado de barbarie. Los grupos chichimecas estaban formados por individuos que únicamente usaban pieles de fieras como vestimenta, manejaban hábilmente el arco y la flecha, presentaban una tecnología muy primitiva y habitaban en chozas humildes y cuevas (Alvear, 1968). Sin embargo, tenían limitados conocimientos de la agricultura rudimentaria, vagaban en pequeños grupos y practicaban la guerra de guerrillas. Gracias a su habilidad bélica, lograron detener todo intento de conquista realizado por los pueblos mesoamericanos. A mediados del siglo XVI, después de la caída de Tenochtitlán, los conquistadores españoles descubrieron ricos yacimientos de plata en Zacatecas. Powel (1977) señala que la colonización hacia el norte se hizo siguiendo la llamada “faja de plata”, que va desde Zacatecas hasta Chihuahua. Para satisfacer las necesidades alimenticias de los centros mineros establecidos en esta región, se configuraron en los lugares ecológicamente más favorables, pequeñas áreas donde se cultivaba maíz, trigo y otros cultivos (Salas, 2013). De manera simultánea se implementaron ranchos ganaderos que proveían animales para el trabajo, carne y otras necesidades, de tal forma que a la llegada de los españoles, el uso y abuso del pastoreo en tierras no adecuadas para la agricultura convencional, ocasiono una erosión acelerada en los suelos que aún no habían sido utilizados por los indígenas; con ello se generalizó esta problemática en vastas extensiones de las zonas áridas y semiáridas. A fines del siglo XVI, se logró la pacificación general de los grupos nómadas del norte, se concentraron en “villas”, bajo la custodia de misioneros y se avicindaron con indígenas traídos de Tlaxcala y Michoacán, a fin de que se les sirvieran de instructores. Con la decadencia de la producción minera, las actividades agrícolas recibieron un gran impulso, por lo que surgen las haciendas que modelaron la vida y tradiciones de grandes grupos rurales del occidente mexicano.

Por otra parte, en México se reporta un alto índice de expansión urbana, donde el agua subterránea representa la principal y en ocasiones la única alternativa de abastecimiento, más del 53% del territorio nacional se define como árido y semiárido, presentando condiciones de escasa precipitación entre 200 a 400 mm (figura 3), potencial elevado de evaporación, escasa presencia de agua superficial permanente y altos índices de contaminación. Además, en referencia a los aprovechamientos de agua, más del 75% (228 metros cúbicos por segundo) de los usos urbanos es de origen subterráneo, de igual forma sucede con los usos industriales donde más de 60 m<sup>3</sup>/s son del mismo origen, aunque para el riego en estas regiones solo el 30% es de agua subterránea, lo que en promedio representa 636 m<sup>3</sup>/s de extracciones de agua subterránea (Arreguín, 1998).

*Figura 3. Distribución de la precipitación pluvial anual, 2012*

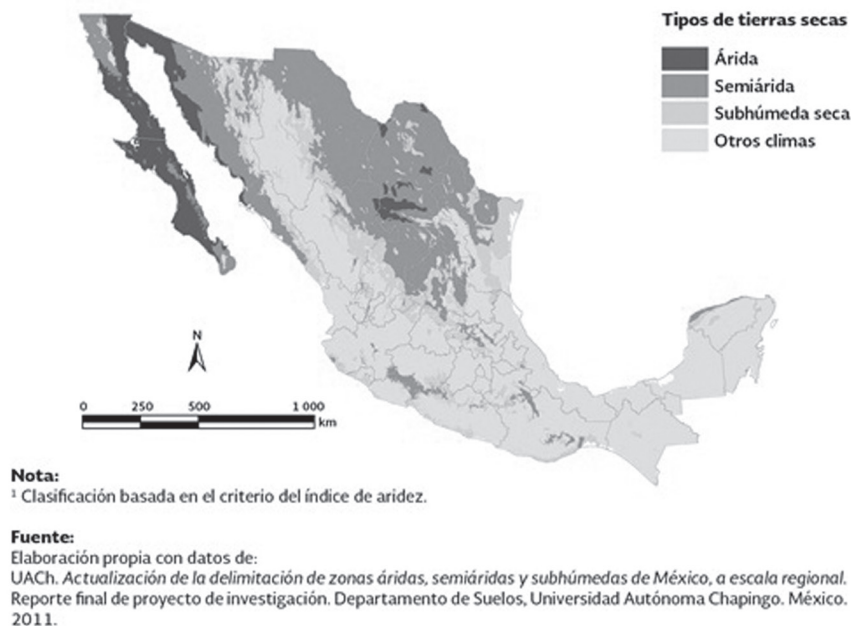


Fuente: CONAGUA. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional. 2013

Las regiones secas de México (áridas, semiáridas y subhúmedas secas), se encuentran principalmente en los desiertos Sonorense y Chihuahuense y en las regiones centrales influenciadas por el efecto de sombra orográfica generada por las Sierras Madre Occidental y Oriental. Con base en un estudio realizado por la Universidad Autónoma Chapingo (2011), estas ocupan aproximadamente 101,5 millones de hectáreas, poco más de la mitad del territorio nacional. De esta superficie, las zonas áridas representan el 15,7%, las semiáridas, el 58% y el 26,3% restante corresponde a las zonas subhúmedas secas (figura 4).

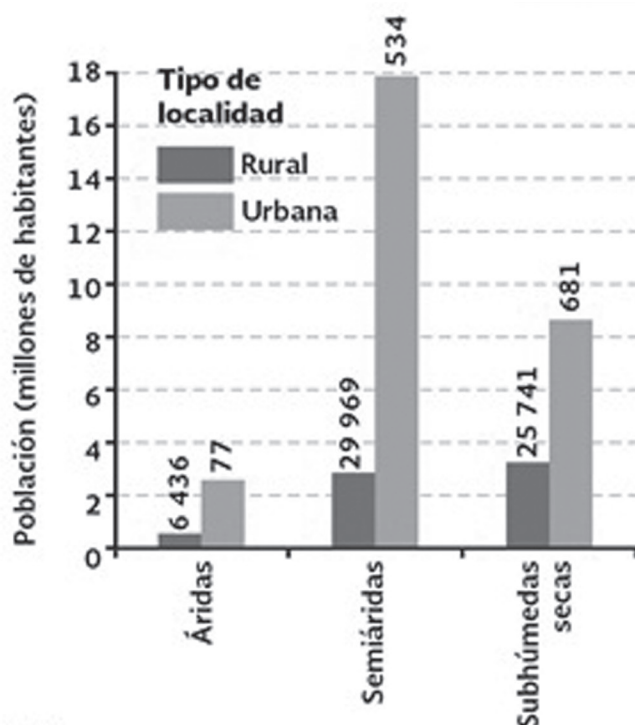
Las zonas semiáridas en el occidente mexicano son las comprendidas principalmente en la porción septentrional del altiplano mexicano, con altitudes variables entre 1 000 y 2 200 metros sobre el nivel medio del mar. Comprende parte de los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, Aguascalientes, Zacatecas, San Luis Potosí, Nuevo León y Tamaulipas, así como parte de Querétaro y una parte de Guanajuato, que colinda con la zona semiárida de Hidalgo, y la parte norte de Jalisco. Esta superficie está surcada por numerosas cadenas montañosas; abundan extensas cuencas endorreicas (de drenaje deficiente).

*Figura 4. Distribución de las tierras secas de México*



En las zonas semiáridas y subhúmedas secas se concentra alrededor de 91,5% de la población que habita en las zonas secas de México, debido probablemente a que en ellas existe menor déficit de agua, lo que permite una mayor actividad económica. De hecho un poco menos del 50% de la superficie agrícola del país y casi un 30% de los pastizales inducidos o cultivados están en este tipo de zonas, de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2011), en las tierras secas de México habitaban 33.6 millones de personas, que equivalían al 30% de la población del país, de estas el 18,1% radicaban en localidades rurales y el 81,9% en localidades urbanas (figura 5).

Figura 5. Población en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas



**Nota:**

<sup>1</sup> Las cifras que aparecen en la parte superior de cada barra corresponden al número de localidades asentadas en cada tipo de zona seca.

**Fuentes:**

Elaboración propia con datos de:  
 INEGI. *Censo de Población y Vivienda 2010*. México. 2011.  
 UACH. *Actualización de la delimitación de las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas de México, a escala regional*. Reporte final de proyecto de investigación. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. México. 2011.

Debido originalmente al crecimiento de la población, la **disponibilidad de agua** ha disminuido de manera considerable: **en 1910 era de 31 000 metros cúbicos (m<sup>3</sup>)** por habitante al año; para 1950 había disminuido hasta un poco más de 18 000 m<sup>3</sup>; en 1970 se ubicó por debajo de los 10 000 m<sup>3</sup>, en 2005 era de 4 573 m<sup>3</sup> y para 2010 disminuyó a 4 230 m<sup>3</sup> anuales por cada mexicano (figura 6).



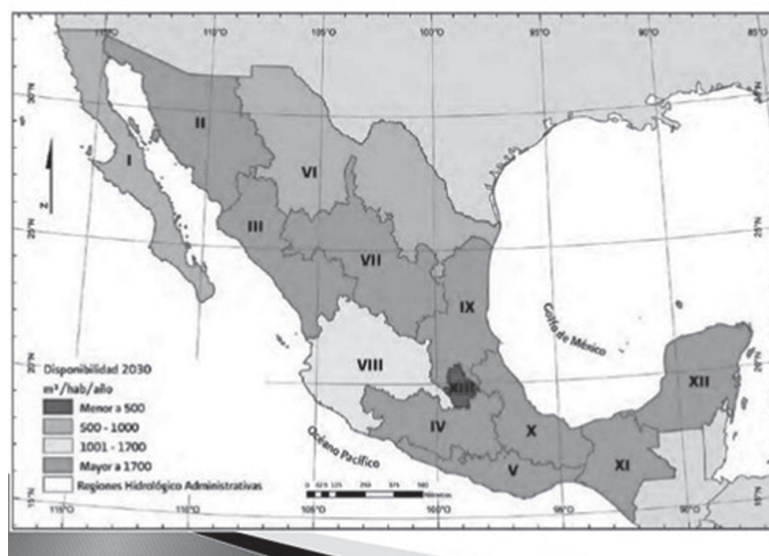
Figura 6. Disponibilidad natural media per cápita.



Fuente: SEMARNAT, 2008.

Como se ha mencionado, más de la mitad del territorio de México está conformado por tierras secas, de las cuales el 0,2 son zonas hiperáridas, 23,7% zonas semiáridas, y 17,6% son zonas subhúmedas secas, las cuales se encuentran distribuidas en el centro y noreste del país. La población en tierras secas es de 22 millones de habitantes. El principal impacto en este tipo de hábitat es a causa de la ganadería y la agricultura (INECC, 2014). Se pronostica que para el año 2030 la superficie de tierras secas en todo el país, lleguen a mas de 128 millones de hectáreas secas en el país, lo que representa aproximadamente el 65,2% del territorio, afectante directamente a la disponibilidad media per cápita (figura 7).

Figura 7. Disponibilidad media per cápita al 2030



### III. Usos del agua

En México, los volúmenes de aguas nacionales concesionados o asignados a los usuarios, se inscriben en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), agrupándose para fines prácticos en usos consuntivos y no consuntivos.

Los usos consuntivos (extractivos) del agua, son aquella fracción de la demanda de agua que no se devuelve al medio hídrico después de su uso, siendo consumida por las actividades, descargada al mar o evaporada. Los principales usos consuntivos son: el abastecimiento urbano, el industrial, las termoeléctricas, el riego, la agricultura y la ganadería. El 63% del agua para uso consuntivo proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos), el resto de aguas subterráneas. Del total del volumen concesionado para usos agrupados consuntivos, al 2009 el 76,7% le correspondía al agrícola (CONAGUA, 2011). El uso no consuntivo es aquella fracción de la demanda de agua que se devuelve al medio hídrico sin alteración significativa de su calidad. Incluye: la generación hidroeléctrica, sistemas de refrigeración, acuicultura, efluentes domésticos, retornos de riego y caudales medioambientales (CONAGUA, 2009). El uso no consuntivo condiciona fuertemente y limita el suministro de los usos consuntivos, pues precisa que el recurso hídrico se encuentre disponible en tiempo y espacio con la calidad adecuada.

### IV. Aprovechamiento de los recursos hídricos

En la zona de estudio, las principales estrategias para el aprovechamiento de las limitadas fuentes de abastecimiento de agua son las siguientes:

#### *a) Captación de agua de lluvia*

Con observaciones precisas y detalladas realizadas durante muchas generaciones, los antiguos habitantes de la tierra llegaron a comprender empíricamente, los diferentes procesos y etapas que componen al ciclo hidrológico. En especial los pobladores de las zonas áridas desarrollaron una serie de métodos y técnicas que les permitieron coleccionar, almacenar y conservar el agua de las escasas y mal distribuidas lluvias, así la práctica de la cosecha de agua de lluvia es ancestral. Se cree que esta técnica se utilizó por primera vez en Irak hace más de 5 000 años, donde la agricultura se inició aproximadamente 8 000 años Antes de Cristo (Hardan, 1975). Por otra parte, Velasco (1991) sostiene que al parecer la cosecha de agua de lluvia tiene sus inicios en el desierto de Néguev, hace aproximadamente 4 000 años. Durante la época de la ocupación romana, estas granjas de escurrimiento (colección de agua de lluvia e irrigación de áreas situadas en las partes bajas) evolucionaron en sistemas relativamente sofisticados que cubrieron una gran porción de las tierras altas de Néguev. Existe además cierta evidencia de que sistemas de cosecha de agua menos complicados fueron usados por los indios del área del valle de México, los valles centrales de Oaxaca y el valle del yaqui en Sonora hace alrededor de 800 años.

Muchos de los pastizales y matorrales del norte de México han sido clasificados ya sea como áridos, semiáridos o áreas con una corta temporada de agua, cuentan con un potencial para el uso de técnicas de cosecha de agua. Existen diversas técnicas para la cosecha de agua, que actualmente están siendo promovidas por los diferentes niveles de gobierno entre campesinos y ganaderos, para proporcionar agua al ganado doméstico o para el uso por la fauna silvestre (figura 8). En el mundo, el desarrollo de estas estructuras ha recibido diversos nombres, los cuales incluyen el de trampas de agua, cuencas de captación, cuencas de drenaje asfaltadas, tanques falsos, bebederos y bordos. Términos adicionales provenientes de Australia son los de caminos de captación y tanques en plano inclinado. La importancia de esta actividad se pone de manifiesto si se considera que 10 mm de lluvia equivalen a 100 000 litros de agua por hectárea, además de que se puede utilizar en regiones con precipitación

nes pluviales tan reducidas como los 50 a 80 mm anuales en promedio. Cabe destacar que los suelos arcillosos o equivalentes, son ideales para la instrumentación de estas técnicas, ya que después de una lluvia se forma una costra que incrementa su coeficiente de escurrimiento (National Academy of Sciences, 2001). En ocasiones, el escurrimiento puede colectarse por medio de las represas naturales, otras veces es necesaria la construcción de estanques en pequeñas depresiones.

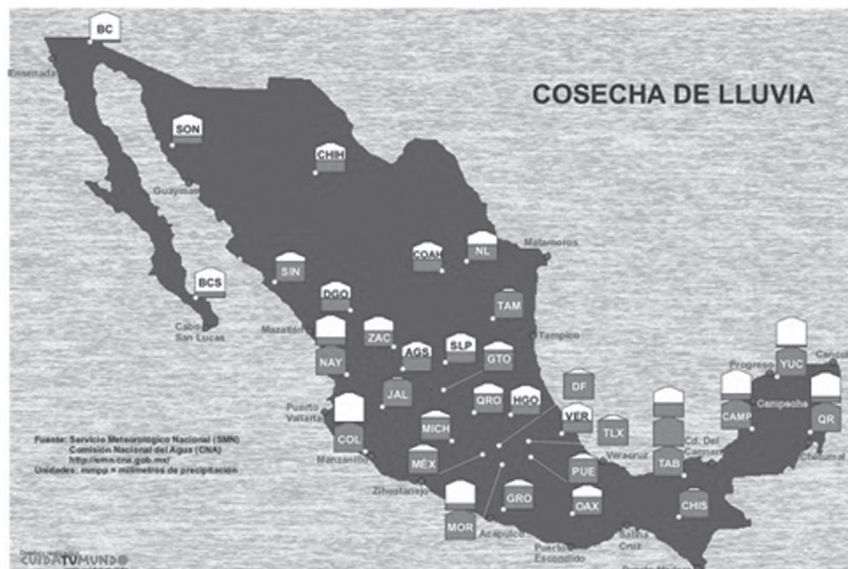
*Figura 8. Bordo en Zacatecas (Calera de Víctor Rosales Zac).*



Fuente: SAGARPA 2012

La captación de agua de lluvia es considerada como la recolección o cosecha de la escorrentía superficial para propósitos de uso doméstico, producción agropecuaria y forestal. Las prácticas de captación de lluvia, reducen el riesgo de erosión al disminuir la escorrentía libre del agua sobre las tierras, sin embargo estas técnicas de captación de lluvia están poco extendidas entre los productores (figura 9).

*Figura 9. Cosecha de Lluvia en México*







y es fácilmente controlable para evitar contaminación, plagas y enfermedades. Los nutrientes se encuentran en el agua que se usa como solución nutritiva de la hidroponía, la importancia radica en tener las soluciones nutritivas adecuadas para cada cultivo en sus diferentes etapas, desde los semilleros, la germinación, el brote, el crecimiento, la floración, la polinización, la producción de la fruta y la cosecha. Sus ventajas son variadas e incluyen principalmente: el no despendedor de las estaciones de forma estricta debido a que se puede hacer en invernaderos, es independiente de la calidad de los suelos del área geográfica en cuestión, es posible controlar la calidad de los nutrientes de forma más adecuada, permite la producción de semilla certificada, se pueden controlar las plagas, parásitos, bacterias, hongos y virus, genera un mejor uso del agua, es posible disminuir la utilización de agentes tóxicos, no requiere del uso de maquinaria pesada, es posible la automatización del proceso, se puede proteger de los efectos del clima, se puede estimar el retorno económico con un margen de error menor que en cultivo tradicional, las frutas y vegetales tienden a crecer de forma regular (todos con el mismo promedio de tamaño), además permite la implementación de cultivos en zonas urbanas y sub-urbanas o huertos familiares.

A manera de ejemplo, se cita el caso del semidesierto de Jalisco donde en una superficie de cinco mil metros cuadrados, productores de Los Altos, generan cada año más de 12,5 toneladas de fresa con hidroponía, con un precio estimado de 30 pesos por kilogramo, además se explotan otras especies como el nopal de tuna, diversas variedades de flores, plantas medicinales, la frambuesas, hortalizas como el tomate y la lechuga, entre otros productos (2013), complementado el proceso con instalaciones de alta tecnología, y el sistema para la captación de agua (figuras 11, 12 y 13).

*Figura 11. Invernadero con hidroponía*



Fuente: [www.xipeyasociados.org](http://www.xipeyasociados.org)

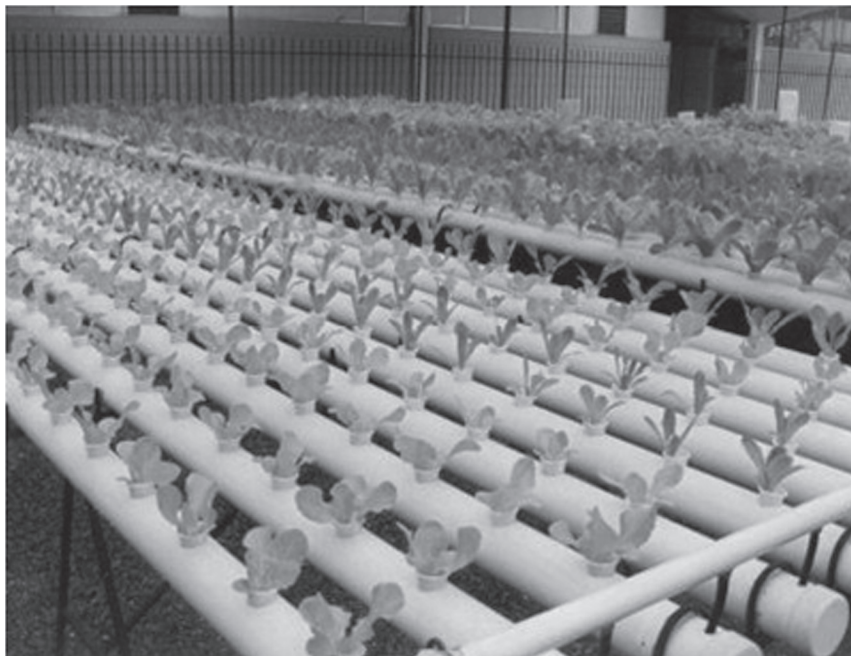


*Figura 12. Interior de Invernadero con cultivos de tomate.*



Fuente: [www.xipeyasociados.org](http://www.xipeyasociados.org)

*Figura 13. Cultivos con hidroponía.*



Fuente: [www.xipeyasociados.org](http://www.xipeyasociados.org)

- *Tratamiento y reuso de aguas residuales domésticas*

La creciente demanda de agua en las regiones semiáridas hace que sea necesaria la utilización y a veces reutilización repetida, de los flujos de retorno de las aguas; antes de que sea posible esta reutilización, normalmente es esencial hacer un tratamiento para mejorar la calidad. Las técnicas para el tratamiento del agua varían de acuerdo con la naturaleza de la contaminación, las cantidades y el

objetivo para el cual ha de reutilizarse. Las aguas negras no tratadas se han utilizado tradicionalmente para riego sin ninguna restricción, sin embargo estas aguas no tratadas o parcialmente tratadas pueden ser peligrosas para la salud. Los procesos de tratamientos físico-químicos y biológicos eliminan una parte importante de materia orgánica, pueden destruirse muchos organismos patógenos, haciendo útil el agua para ciertas actividades como el riego; no obstante pueden seguir significando un riesgo latente el consumo directo de estas aguas.

En las zonas de estudio, además de los tratamientos convencionales de aguas, se están implementando tratamientos alternativos que demanda menos energía, mantenimiento y mano de obra especializada, tales son los casos de los Humedales Artificiales (HA) y los Biodigestores Anaeróbicos (BA). Algunos ejemplos son:

1) En la población alteña de Ojo Zarco (municipio de Jesús María, Jalisco), se ha instalado y operado un sistema para el tratamiento y reuso de las aguas residuales domesticas mediante un HA con plantas macrófitas de la propia región, obteniéndose disminuciones de contaminantes importantes en parámetros tales como sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno, organismo coliformes fecales, grasas y aceites, nitrógeno y fosforo totales, en rangos de temperatura que varían de 10 a 28°C, con tiempos de retención hidráulica de 4 a 5 días, el agua tratada se reutiliza en el riego de cultivos (Castañeda y Flores, 2013).

2) Para el tratamiento de desechos pecuarios como el estiércol vacuno y las excretas de cerdo se han diseñado e instalado en muchas granjas BA, los cuales además de proporcionar un tratamiento efectivo para las aguas residuales, generan biogás; el cual se utiliza para la cogeneración eléctrica, energía que se reutiliza en las mismas explotaciones pecuarias (Castañeda, 2012)

- *Aplicación de Biosólidos en suelos semiáridos*

Muchos de los sistemas para el tratamiento de las aguas residuales generan gran cantidad de lodos orgánicos (biosólidos), estos contienen altos porcentajes de nutrientes, que se pueden reutilizar como fertilizantes naturales en suelos. En varias regiones del norte y el occidente de México estos biosólidos están siendo aplicados en terrenos áridos y semiáridos, mejorando su contextura y posibilitando la eventual producción de pastizales para ganado, de hecho se han reportado efectos positivos sobre la fertilidad del suelo y sobre la producción de otros cultivos específicos como; el haba y la coliflor (Jurado, 2006). En Chihuahua se reportan efectos benéficos sobre la producción de maíz forrajero (*Zea mays*) con la aplicación de biosólidos incorporados al suelo. Los efectos de la aplicación de biosólidos en pastizales áridos y semiáridos se han estudiado en Estados Unidos (Jurado y Wester, 2001), de dichos trabajos se concluye que los biosólidos aplicados superficialmente en pastizales nativos muestran efectos positivos, como incrementos en la producción y la calidad de forraje de zacates (Jurado et al., 2004), y negativos, como una ligera pérdida de biodiversidad de plantas. Se han aplicado biosólidos provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la ciudad de Aguas calientes, evaluando el rendimiento de forraje de zacates nativos en pastizales semiáridos del municipio de Ojuelos Jalisco (Jurado et al., 2007), con una temperatura media anual de 17 °C y una precipitación media anual de 425 mm.

En la fertilización de maíz forrajero en el municipio de Tepatitlán de Morelos Jalisco, se han utilizado biosólidos generados en la propia planta de tratamiento de la cabecera municipal, con incrementos productivos mayores al 30%, sin afectaciones al suelo y/o al ambiente (Castañeda, 2006).

- *Eficiencia en la irrigación*

Según la Comisión Nacional del Agua (2012) de los usos consultivos del agua en México, el que demanda mayores volúmenes es la agricultura (77%), por lo que resulta importante y estratégico, para las regiones semiáridas principalmente, mejorar las diferentes técnicas de esta actividad. Una de las principales es la agricultura de temporal, la cual es la variante más generalizada y consiste en el aprovechamiento *in situ* del agua de lluvia. En este sistema los rendimientos son, generalmente, bajos y solo se obtiene una cosecha por año (en algunas zonas solo es posible producir cultivos en años alternos). Además, en el occidente se tiene la agricultura en bajíos donde el suministro de humedad se da mediante el manejo de los escurrimientos superficiales que se canalizan hasta las partes bajas o depresiones endorreicas conocidas como “bajíos”; esto implica el tener que coleccionar los escurrimientos de las laderas y conducirlos hasta los terrenos agrícolas. Gracias a los aportes adicionales de humedad, aumentan las posibilidades de éxito en la producción de los cultivos y se puede tener más de un ciclo de producción por año.

Actualmente la Secretaría de Agricultura, Ganadería Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), se encuentra implementando programas para el desarrollo agropecuario de las regiones áridas y semiáridas de todo el país, en los que se incluyen: la agricultura de conservación, sistemas de almacenamiento agrícola y sistemas tecnificados de riego, entre otros. En este sentido se destacan acuerdos de colaboración con Argentina, Chile Israel y Estados Unidos.

- *Recarga artificial de acuíferos*

El uso de las aguas tratadas para recargar el agua subterránea, en vez de reutilizarlas inmediatamente, constituye un factor considerable de seguridad, debido a que se reduce el número de microorganismos y el líquido se diluye más.

En el norte y occidente de México se están realizando diversos proyectos con esta finalidad algunos de estos son:

- Recarga de acuífero en San Luis Río Colorado en el estado de Sonora (figuras 14 y 15).

*Figura 14. Recarga artificial con agua residual tratada  
San Luis Río Colorado, Sonora México.*



Fuente R. Chávez (CONAGUA, 2011).

Figura 15. Lagunas de infiltración (al fondo).



Fuente: Fuente R. Chávez (CONAGUA, 2011).

- El proyecto de recarga del acuífero de la comarca lagunera en Torreón Coahuila, donde el agua utilizada para la recarga artificial provino de la presa Francisco Zarco, la cual se condujo a través del canal Sacramento y se derivó por los canales de desfogue, para descargar finalmente a los embalses de infiltración (figura 16). En cada caso se seleccionó una red de pozos para la observación y el monitoreo del proceso. El balance de masas en 1991 muestra que se derivaron 3,4 Millones de metros cúbicos ( $Mm^3$ ) del canal Sacramento, de los cuales se estima se infiltraron 3,2  $Mm^3$ , durante 18 días. El balance de masas del experimento del 2 000 muestra que el volumen vertido al sistema de embalses ascendió a 5,1  $Mm^3$ , de los cuales se estima se infiltraron 3,7  $Mm^3$  al embalse No. 1 y 1,4  $Mm^3$  en el embalse No. 2. La duración del evento fue de 65 días. El balance se efectuó considerando la precipitación ocurrida durante el experimento y cuyos valores ascienden a 66,2 mm y la evaporación registrada fue de 160 mm. Los resultados obtenidos en los estudios llevados a cabo por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) muestran que el experimento de recarga artificial vía embalses de infiltración es viable técnicamente y que los sitios son adecuados, ya que poseen características hidrogeológicas apropiadas, áreas libres, y cuenta con la infraestructura hidráulica necesaria para el manejo y conducción del agua a los embalses de infiltración (Gutiérrez y Ortiz, 2005).



*Figura 16. Torreón Coahuila, zona de recarga sobre el lecho del río Nazas. Comarca lagunera.*



Fuente R. Chávez (CONAGUA, 2011).

## V. Conclusiones

En la exploración, captación, explotación y distribución del agua tanto subterránea como superficial en las regiones áridas y semiáridas, la incorporación de técnicas adecuadas, así como la generación y aplicación de conocimiento nuevo y actual, son fundamentales para afrontar los retos de administrar y gestionar este recurso escaso, evidenciando la necesidad de potenciar sus usos y reutilización. Incorporando los avances en la hidrogeología, como herramienta de estudio que refuerza el conocimiento de los ciclos naturales y la hidrodinámica en estas zonas. En general se debe reconocer y determinar científicamente la importancia del agua subterránea como agente geológico y su interacción con el medio natural y humano, así acciones como la captación del agua de lluvia, la hidroponía, el tratamiento y reuso de las aguas residuales, el aprovechamiento de los biosólidos, la mejora en los sistemas de irrigación y la recarga artificial de acuíferos entre otras “han cobrado mayor importancia para la sustentabilidad hídrica en el medio semiárido de México, interés que beneficia directamente a otras regiones y en especial a las grandes ciudades con problemas de abastecimiento y agotamiento de acuíferos como la Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey, por mencionar algunas”.

Partiendo de lo anterior y teniendo en cuenta que más del 50% del territorio nacional corresponde a tierras secas, es imprescindible la difusión y divulgación de estas estrategias para el uso y aprovechamiento del agua en todas sus versiones, enfrentando los requerimientos de mayores volúmenes con calidades adecuadas para la población actual y futura.

Por último, la incorporación de políticas y programas gubernamentales, así como la concientización social, bajo estas ópticas en las regiones áridas y semiáridas del país, se consolidan como estrategias complementarias para el abastecimiento de la demanda de agua potable, evitando la sobreexplotación de los acuíferos y propiciando un modelo para el desarrollo sustentable de estas zonas, ya que el adecuado aprovechamiento de esas técnicas para reacondicionar los suministros de agua, coadyuva a la implementación y desarrollo de nuevas fuentes económicas, como la producción de más y mejores cultivos alternativos, procurando la conservación diacrónica del recurso.



## Referencias

Alvear, A. (1968). Historia de México: época precortesiana, colonial e independiente. México. Editorial JUS.

Arreguín, J. (1998). Aportes a la Historia Geohidrológica en México 1890-1995. CIESAS, México Asociación Geohidrológica Mexicana A.C.

Atlas Mundial de la Desertificación (1997). PNUMA. Recuperado de: <http://www.pnuma.org/>

Cámara Nacional de la Industria de la Transformación CANACINTRA. (2013). CANACINTRA y la CEA se suman para el Proyecto Agua de Niebla. Recuperado de: <http://canacintragro.org.mx/v1/canacintray-la-cea-se-suman-para-el-proyecto-agua-de-niebla/>

Chávez, R.(CONAGUA) (2011). La recarga artificial de acuíferos en México. Jornadas técnicas. Instituto de Ingeniería UNAM. Recuperado de: [http://www.agua.unam.mx/assets/acuiferos/pdfs/presentaciones/rubenchavez\\_conagua.pdf](http://www.agua.unam.mx/assets/acuiferos/pdfs/presentaciones/rubenchavez_conagua.pdf)

CONAGUA (2009). Registro Público de Derechos de Agua (REPGA). México.

CONAGUA (2010). Estadísticas del agua en México. Capítulo 3: Usos del agua. Recuperado de: [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Capitulo\\_3.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Capitulo_3.pdf)

CONAGUA (2012). Distribución de la precipitación pluvial anual. Coordinación General de Servicio Meteorológico Nacional. México.

CONAGUA (2011). Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) - Estadísticas del Agua en México Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=60&n3=87&n4=34>

CONAGUA (2013). Municipios del estado de Jalisco que conforman la sequía crítica. iTerritorial 2013

CONAGUA (2014). Disponibilidad media *per cápita* al 2030. México. Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/ciclo13.html>.

Castañeda, A. (2006). Efectos de la aplicación de lodos orgánicos o biosólidos sobre el suelo y la productividad de maíz forrajero en Tepatitlán de Morelos Jalisco, México. México. CUAltos. Universidad de Guadalajara.

Castañeda, A. (2012). *Diseño, implementación y desarrollo de biodigestores*. En programa especial de ciencia y tecnología en materia de agua. Documento básico de líneas prioritarias de investigación, desarrollo tecnológico y formación de recursos humanos en materia de agua en México. México. CONACyT-IMTA-CONAGUA.

Castañeda, A. y Flores, H. (2013). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales doméstica en Los Altos de Jalisco. En: El reto del abastecimiento de agua potable; Calidad del agua y su gestión. México. Editorial Universidad de Guadalajara. CUAltos. ISBN: 978-607-8193-50-9.

Gutiérrez, C. y Ortiz, G. (2005). Proyectos de recarga artificial de acuíferos en la comarca lagunera, México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Hardan, A. (1975). Proceedings of water harvesting Symposium, Phoenix, Arizona, USA. Discussion Session 1

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2014. Zonas ecológicas. Recuperado de: <http://www.inecc.gob.mx/con-eco-ch/387-hc-zonas-ecologicas>.

INEGI (2011). Censo de Población y Vivienda 2010. México.

Jurado, P. (2006). Respuesta de un pastizal mediano abierto a la aplicación combinada de quema y fertilización en el noreste de Jalisco. Mexico. Revista Manejo Pastizales Núm. 4

Jurado, P. y Wester, D. (2001). Effects of biosolids on tobosograss growth in the Chihuahuan desert. USA. Journal Range Manage 54.

Jurado, P., Luna L. y Barretero H. (2004). Aprovechamiento de biosólidos como abonos orgánicos en pastizales áridos y semiáridos. México. Revista Técnica Pecuaria Núm. 42.

Jurado, P., Arredondo, T., Flores, E., Olalde, V. y Frías, J. (2007). Efecto de los biosólidos sobre la humedad y los nutrimentos del suelo y la producción de forraje en pastizales semiáridos. México. En TERRA Latinoamericana, Vol. 25, Núm. 2. UACH.

National Academy of Sciences. (2001). More Water for Arid Lands: Promising Technologies and Research Opportunities. Honolulu, Hawaii USA. U. P. Pacific, Ed.

SAGARPA (2012). Mantienen capacidad productiva con obras de captación de agua en zonas áridas. Recuperado de: <http://sagarpa.gob.mx/saladeprensa/boletines2/paginas/2012B051.aspx>

Salas, C. (2013) La cosecha de agua de lluvia en zonas áridas y semiáridas. México. Tesis Universidad Autónoma Chapingo.

SEMARNAT (2012) Informe de la situación del medio ambiente en México. Capítulo 3: Suelos. Recuperado de: [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_12/03\\_suelos/cap3\\_3.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/03_suelos/cap3_3.html)

SEMARNAT (2008) Informe de la situación del medio ambiente en México. Disponibilidad natural media per cápita. Capítulo 7: Agua. Recuperado de: [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_04/07\\_agua/index\\_agua.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/07_agua/index_agua.html)

Servicio Meteorológico Nacional. CNA. (2008) Cosecha de lluvia en México. Recuperado de: <http://smn.cna.gob.mx/>

The United Nations Convention to Combat Desertification UNCCD (2011). Desertification. A visual synthesis. UNCCD-Zoï Environment Network. France.

Universidad Autónoma Chapingo (2011). Actualización de la delimitación de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas de México. Reporte final de investigación. Departamento de suelos UACH.

Velasco, H. (1991). Las zonas áridas y semiáridas: sus características y manejo. México. Editorial Limusa.



# Aplicación de huella hídrica y cosecha de agua de lluvia como medidas de mitigación y adaptación al cambio climático en la Región Chorotega, Costa Rica.

*Andrea Suárez Serrano<sup>11</sup>  
Rigoberto Rodríguez Quirós<sup>12</sup>  
Christian Golcher Benavides<sup>13</sup>*

## Resumen

El cambio climático amenaza con afectar en forma severa la resiliencia de sistemas de producción, la biodiversidad, la disponibilidad y el abastecimiento de agua para los distintos usos derivados de la actividad humana. En el trópico seco mesoamericano existe una problemática de escasez de agua, especialmente durante la estación seca. El objetivo principal de este artículo es presentar la aplicación de la huella hídrica y la cosecha de agua de lluvia como medidas de mitigación y adaptación en la Región Chorotega. Se utilizó el cálculo de la Huella Hídrica como indicador de uso del agua para la mejora y eficiencia del recurso, específicamente en la producción de arroz en dos regiones productivas de Costa Rica (Brunca y Chorotega). Los sistemas de captación y aprovechamiento de agua de lluvia ayudan a resolver en parte los problemas de abastecimiento para uso doméstico y agropecuario en comunidades de Guanacaste, como por ejemplo en Cerro Negro, Santa Cruz y la comunidad La Esperanza, Nicoya en la provincia de Guanacaste. La aplicación de estas acciones trae beneficios directos en la seguridad alimentaria, en aspectos ambientales relacionados con el manejo de los recursos hídricos, tales como la disminución de erosión, la recarga de acuíferos, la disminución de la presión sobre el aguas subterránea y las fuentes superficiales, la eficiencia en su utilización (por ejemplo en abrevaderos para animales) y contribuyen con la belleza escénica. En conclusión, es urgente la implantación de iniciativas como estas en el trópico seco, pues son un medio de adaptación a las condiciones de variabilidad climática existente y las condiciones de cambio climático previstas a futuro.

**Palabras clave:** huella hídrica, cosecha de agua, cambio climático, seguridad alimentaria, Guanacaste, Región Chorotega

**Water footprint application and rainwater harvesting as mitigation and adaptation measures to climate change in the Chorotega Region, Costa Rica**

## Abstract

Climate change threatens with severely affect the resilience of production systems, biodiversity, availability and supply of water for different uses derived from human activity. In the Mesoamerican dry tropics there is a problem of water shortages, especially during the dry season. The main objective of this paper is to present the use of the water footprint and rainwater harvesting as mitigation and

11 PhD. Coordinadora General, Centro de Recursos Hídricos para Centroamérica y El Caribe (HIDROCEC-UNA), Campus Liberia, Sede Regional Chorotega, Universidad Nacional. Liberia, Guanacaste.

12 MSc. Director Ejecutivo, Centro Mesoamericano de Desarrollo Sostenible del Trópico Seco (CEMEDE-UNA). Campus Nicoya, Sede Regional Chorotega, Universidad Nacional, Nicoya, Guanacaste.

13 MSc. Académico-Investigador. Centro de Recursos Hídricos para Centroamérica y El Caribe (HIDROCEC-UNA), Campus Liberia, Sede Regional Chorotega, Universidad Nacional. Liberia, Guanacaste.

adaptation measures in the Chorotega Region. Water footprint was used as an indicator of water use and for the improvement of water use efficiency, specifically in rice production in two regions of Costa Rica (Brunca and Chorotega). Rainwater harvesting systems help to partially solve the water scarcity problem for domestic and agricultural use, in Guanacaste communities such as Colas de Gallo and Cerro Negro in Santa Cruz. The implementation of these actions brings direct benefits in food security, environmental issues related with water resources management, such as reduction in erosion, groundwater recharge, reduction in the pressure on groundwater and surface sources, the efficiency in its utilization (for example in troughs for animals) and contribute to the scenic beauty. In conclusion, is urgent the implementation of these kind of initiatives in the dry tropic, since they are ways of adapting to existing climate variability conditions and climate change in the future.

**Key words:** water footprint, rainwater harvesting, climate change, food security, Guanacaste, Chorotega Region.

## I. Introducción

El cambio climático es un fenómeno hidrometeorológico que amenaza con afectar en forma severa la resiliencia de los sistemas de producción, la biodiversidad, la disponibilidad y el abastecimiento de agua para los distintos usos derivados de la actividad humana. En la actualidad, “Debido al calentamiento global, los patrones de lluvia se han visto afectados durante los últimos años, y fenómenos como el Niño y la Niña han encrudecido las situaciones de sequía e inundaciones” (Molares & Rodríguez, 2010, pág. 1).

Este fenómeno posee una serie de repercusiones sobre el agua, el cual es un recurso esencial para la salud pública, para la salud integral de los ecosistemas, el bienestar y el mejoramiento de la calidad de vida de las personas. En Centroamérica se estima una abundante oferta hídrica de 723072 Mm<sup>3</sup>/año y una demanda de 58414 Mm<sup>3</sup>/año (GWP, 2011). Sin embargo, 4,5 millones de personas del istmo no tienen acceso al agua y unos 12,2 millones de personas no cuentan con saneamiento básico (Programa Estado de la Nación, 2011). Aunque se puede decir que Centroamérica posee abundante agua, en zonas como la vertiente del Pacífico durante la época seca poseen problemas de escasez; esta zona se caracteriza por presentar una distribución de las lluvias muy marcada.

En un periodo de 28 años, la población de los siete países de América Central se duplicó y se estima que la población en la región seguirá creciendo, al menos hasta el año 2075 (Programa Estado de la Región, 2008). Para el año 2010 y 2015, se estima que en esta región habitan 43,7 y 47,8 millones, respectivamente (Fetzek, 2009). El crecimiento poblacional es de carácter preocupante en términos de enfrentar los problemas sociales y ambientales (demanda de recursos: agua, alimentos, energía, transporte, espacio, entre otros) de la región. A este escenario, se le deben agregar los impactos del cambio climático en aspectos como el aumento de la frecuencia e intensidad de los eventos hidrometeorológicos y su repercusión sobre los recursos naturales, la infraestructura existente o futura (ej: captación, almacenamiento, potabilización, sistemas de distribución, saneamiento, drenajes de aguas pluviales) y el sector productivo agrícola, el cual es muy vulnerable ante la variabilidad del clima y consecuentemente, atenta sobre la seguridad alimentaria de la región.

Centroamérica se encuentra entre las regiones más vulnerables del mundo (ERCC, 2010), tal y como lo ejemplificó la magnitud del huracán Mitch en 1998. Una respuesta a esto, es la unión de esfuerzos entre los países de la región centroamericana para la creación de políticas y estrategias regionales con el fin de reducir y prevenir el riesgo de desastres y con esto contribuir con una visión de desarrollo integral y seguro en Centroamérica. Ejemplos de ello son la Alianza para el Desarrollo Sostenible (ALIDES) firmada en 1994 y en el 2010 la Política Centroamericana de Gestión Integral de Riesgo de Desastres (PCGIRD), que incorpora el enfoque de gestión de riesgos en el cambio climático a través



del impulso a la línea de acción de fortalecimiento de las capacidades para la adaptación al cambio climático, considerando las vulnerabilidades desde los territorios, lo cual es una gran necesidad en la Región. También se puede mencionar la publicación de la Estrategia Regional de Cambio Climático (ERCC) elaborada por la Comisión Centroamericana de Ambiente (CCAD) del Sistema de Integración Centroamericana (SICA) en noviembre del 2010. A pesar de la existencia de estas y otras políticas y estrategias en la región, es urgente la implementación de acciones de adaptación acordes con las necesidades actuales y futuras para enfrentar los impactos del cambio climático.

La mayor parte de las ciudades centroamericanas se asientan en la vertiente del Pacífico, pero el 70% del recurso hídrico se sitúa en la vertiente del Atlántico, lo cual provoca una distribución desigual del agua en cantidad y un porcentaje muy alto del agua aprovechable no posee una calidad adecuada para consumo humano (CCAD, 2005).

En la región Chorotega de Costa Rica, que al igual que el Pacífico Mesoamericano posee un Bosque tropical seco, cuenta con un régimen hídrico que implica un desbalance en la distribución de agua, debido a que llueve durante 6 o 7 meses y los restantes son meses totalmente secos. Por lo tanto, en el periodo seco hay una gran escasez de agua. Según las proyecciones, el cambio climático tenderá a agudizar esta situación, lo que implica una gran problemática, tanto para productores agropecuarios como para los hogares, especialmente aquellos de zonas rurales, debido a la poca disponibilidad de agua en verano.

En ese sentido, es necesario buscar soluciones científicas y tecnológicas, que permitan el mejoramiento de la calidad de vida en la región, al tiempo que se reducen las presiones sobre el recurso hídrico.

Existen algunas medidas de adaptación y mitigación que es posible utilizar con el fin de enfrentar la amenaza del cambio climático, como ejemplos de medidas de mitigación y adaptación se están el cálculo de la huella hídrica y la cosecha de agua de lluvia. El objetivo principal de este artículo es presentar opciones de aplicación de la huella hídrica y cosecha de agua de lluvia como medidas de mitigación y adaptación en la región Chorotega, producto de los procesos de investigación, desarrollo e innovación que llevan a cabo los centros especializados CEMEDE e HIDROCEC de la Universidad Nacional.

## II. Área de Estudio

La región Chorotega, correspondiente con la provincia de Guanacaste, tiene una extensión de 10.140,71 km<sup>2</sup>, cuenta con 11 cantones (Liberia, Santa Cruz, Nicoya, Nandayure, Carrillo, La Cruz, Cañas, Bagaces, Tilarán, Abangares y Hojancha) (Tenorio, 2009), su población es de 326 923 habitantes (INEC, 2011).

Se ubica en el noroeste de Costa Rica. Sus límites son al norte con Nicaragua y la provincia de Alajuela; al este con la provincia de Alajuela y la provincia de Puntarenas; al sur con el golfo de Nicoya y el océano Pacífico y al este con el océano Pacífico. El relieve en la región es variado, con cuatro zonas bien definidas: Faldas occidentales de la Cordillera de Guanacaste, llanuras del río Tempisque, región montañosa de Nicoya, costas y área insular (IFAM, 2003).

A la hora de realizar acciones de investigación, desarrollo e innovación científico-tecnológica en materia de gestión integrada de los recursos hídricos, es conveniente tomar en cuenta un enfoque geográfico determinado por las cuencas hidrográficas, ya que determinan las interacciones agua-seres humanos en el territorio. La Región Chorotega comprende las siguientes cuencas hidrográficas determinadas por el Instituto Geográfico Nacional: Ríos Costa Pacífico Norte, Ríos de la Península de Nicoya (costa externa y costa interna), Río Tempisque, Río Bebedero y Río Abangares y otros (figura 17).

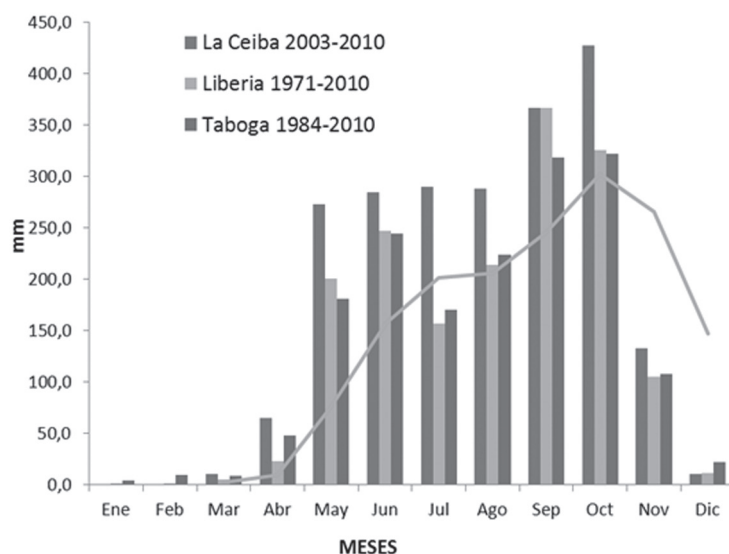
Figura 17. Ubicación de las cuencas hidrográficas de la Región Chorotega tomadas en cuenta en los proyectos de Huella Hídrica y Cosecha de Agua, Costa Rica.



Fuente: Elaboración propia, basándose en el mapa de cuencas hidrográficas del Costa Rica, del Instituto Geográfico Nacional (IGN) (2008).

La región presenta una estación lluviosa que va de mayo a noviembre y una estación seca bien definida desde diciembre hasta abril. La Figura 18. Muestra los promedios de precipitación mensual para las estaciones meteorológicas La Ceiba, ubicada en Nicoya observados durante 11 años (2000-2011), Taboga ubicada en Bebedero (1978-2010) y estación Liberia (1971-2010).

Figura 18. Precipitación media mensual (mm) en las Estaciones: La Ceiba, Nicoya, Liberia y Taboga (Bebedero)



Fuente: IMN, 2012.

De acuerdo con la figura anterior, los meses de noviembre hasta abril son de particular importancia en cuanto al abastecimiento de agua para los pobladores, debido a su relativa escasez.

### III. Marco Teórico-Conceptual

Es escaso el conocimiento que existe a nivel mundial sobre la relación presente entre el consumo y contaminación del agua a lo largo de las cadenas de valor en la producción de bienes y servicios de consumo final, ignorándose entonces el cómo está estructurado el manejo y contaminación de las fuentes de agua en las sociedades de un mundo cuyos países están altamente interconectados particularmente desde un punto de vista comercial.

La Huella Hídrica (HH) es un indicador desarrollado conceptualmente para cuantificar el consumo y contaminación del agua a la hora de generar algún bien o servicio determinado con el fin de brindar luz sobre estos patrones de impacto. Tanto a nivel mundial como en la región de estudio, se observa como la producción agrícola es la actividad de mayor demanda de agua y por consiguiente el sector de la economía que tiene mayor impacto sobre la gobernanza de un recurso que es crítico para el desarrollo de cualquier otra actividad humana (Water Footprint Network, 2009).

El concepto de huella hídrica ha sido desarrollado por Hoeskstra (2003), considerando más allá de la sola extracción, el uso directo e indirecto del agua, determinando así para un producto el volumen de agua requerido para su producción a lo largo de la cadena de valor, por medio de un indicador multi-dimensional indicativo del consumo de volúmenes de agua por fuente y por tipo de contaminación determinados específicamente para un espacio y un tiempo dados. Esto se realiza por medio de la sumatoria de las huellas hídricas azul, verde y gris.

La Huella Hídrica Azul se refiere al consumo proveniente de fuentes de agua superficiales y subterráneas. Esto es, las pérdidas de agua de una determinada fuente de un área de recarga o cuenca producto de la evaporación, trasvase, transferencia al mar o incorporación en el producto. La Huella Hídrica Verde la constituye los consumos de agua que provienen de aguas llovidas capturadas en la

humedad del suelo. La Huella Hídrica Gris es la que expresa la contaminación y se refiere a las cantidades de agua requeridas para que el agua pueda asimilar cargas de contaminantes en el ámbito de estándares establecidos por normativas ambientales vigentes (Hoekstra, A.Y.; Chapagain, A.K.; Aldaya M.M.; Mekonnen M.M., 2009).

Otra herramienta de creciente interés como medida de mitigación y adaptación de los efectos del cambio climático lo constituye la utilización de agua proveniente de la lluvia. La cosecha de agua puede definirse como la captura de lluvia y agua de escorrentía que se traslada por las pendientes y que puede ser utilizada por el hombre con fines productivos, especialmente en épocas secas (Pulver, Contreras & Moreira). También es definida como “*la recolección y concentración de agua de escorrentía, para usos productivos como cultivos, pastos, árboles frutales y maderables, animales, acuicultura, recarga acuífera, belleza escénica y para usos domésticos*” (Ibraimo & Munguambe, 2007; mencionados por Rodríguez, Morales, & Obando, 2010, pag. 3); También FAO (2000) mencionado por Salinas, Rodríguez, & Morales, 2010, pag. 3) dice que “es la recolección de escorrentía superficial para su uso productivo, y que puede lograrse de las superficies de tejados, así como de corrientes de agua intermitentes o efímeras”.

Salinas indica que la cosecha de lluvia puede convertirse en una tecnología de adaptación al cambio climático ya que estas técnicas permiten dar solución al desabastecimiento en hogares y producción agropecuaria (Salinas, Rodríguez, & Morales, 2010).

Dentro de los beneficios de la utilización de agua de lluvia se pueden mencionar los aumentos en la producción, aportes a la seguridad alimentaria, permite la recarga de acuíferos, se puede utilizar para purificar y potabilizar. En ese sentido “la implementación de opciones de captura de agua se convierte en una herramienta que puede alivianar los efectos del calentamiento global y a la vez les dé más opciones de producción a los productores agrícolas en el país” (Molares & Rodríguez, 2010, pag. 1), lo que al tiempo es un aporte al mejoramiento de la seguridad alimentaria.

Otros autores mencionan beneficios que tienen que ver con un incremento de la actividad económica de la zona, se promueve una generación de empleos, integración familiar, reducción de la pobreza y producción de más y mejores alimentos. Además, no es necesaria la afectación de ríos y requiere de poca inversión (Pulver, Contreras, & Moreira).

Prinz (1994) enumera una serie de beneficios con la utilización de la tecnología de agua de lluvia entre las que vale destacar un incremento en la producción de los cultivos y una reducción en los riesgos de producción, permite un mayor grado de producción de alimentos, es una herramienta contra la degradación del suelo, se hace un mejor uso de los recursos hídricos disponibles, recarga de acuíferos, entre otros (Prinz, 1994).

## IV. Marco Metodológico

### *Huella Hídrica*

Los cálculos de la huella hídrica fueron desarrollados utilizando las bases de datos oficiales del Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio de Agricultura y Ganadería, Corporación Arrocera Nacional (CONARROZ) y las bases de datos de la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO/CROPWAT). Se tomaron en consideración las producciones de arroz de la Región Chorotega en condiciones de producción bajo riesgo y se contrastó con la producción de secano de la Región Brunca así como otros resultados internacionales desarrollados por Champagain y Hoekstra (2010) que funcionan como parámetros de referencia. A continuación se presenta el cuadro 1 con los datos requeridos y las fuentes de información de los mismos.

*Cuadro 1. Datos requeridos en el programa CROPTWAT. 8 de la FAO para el cálculo de la huella hídrica en el cultivo de arroz en las regiones estudiadas (Chorotega y Brunca) y fuentes consultadas para la obtención de la información.*

Datos		Archivo/Fuente
Climáticos	Evapotranspiración de referencia mensual	Base de Datos IMN
	Precipitación mensual	
Cultivo	Fecha siembra	MAG (Boletín Estadístico 22 SEPSA)/CONARROZ
	Coeficiente de Cultivo $K_c$	
	Duración etapas de desarrollo	
	Profundidad radicular	
	Agotamiento crítico	
	Factor respuesta rendimiento	
	Altura del cultivo	
Suelo	Humedad del suelo disponible (CC-PM)	FAO (CROPWAT)
	Tasa máxima de infiltración	
	Profundidad radicular máxima	
	Agotamiento inicial humedad del suelo	
Económicos	Rendimiento ( $m^3/ha$ )	MAG (Boletín Estadístico 22 SEPSA)
	Precios ( $colones/m^3$ )	

Una vez recopilada la información se llevaron a cabo los cálculos de huella hídrica como se detalla a continuación: primero se calcularon las necesidades hídricas del cultivo de arroz de acuerdo a las condiciones edafo-climáticas de cada región (Chorotega y Brunca) productora utilizando el software CROPWAT 8.0, desarrollado por la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Las huellas hídricas verde y azul de la producción agrícola se estimaron siguiendo el marco de referencia de Hoekstra y coautores (Hoekstra, Chapagain, Aldaya & Mekonnen, 2009). La Huella Hídrica Verde (HHcultivo verde  $m^3$  tonelada<sup>-1</sup>) se calculó como el componente verde en el uso del agua para los cultivos (CWUverde,  $m^3$  ha<sup>-1</sup>), dividido por el rendimiento de los cultivos (R, ton ha<sup>-1</sup>). La Huella Hídrica Azul (HHcultivo azul  $m^3$  tonelada<sup>-1</sup>) se calculó de manera similar.

El componente gris en la huella hídrica de un cultivo (HHcultivo, gris  $m^3$  tonelada<sup>-1</sup>) se calcula como la tasa de aplicación de productos químicos en el campo por hectárea (AR, kg ha<sup>-1</sup>) por la fracción de lavado y escorrentía ( $\alpha$ ) que para el nitrógeno es un 10%, dividido por la concentración máxima aceptable ( $C_{max}$ , kg  $m^{-3}$ ) de acuerdo con la normativa nacional, menos de la concentración natural de los contaminantes considerados ( $C_{nat}$ , kg  $m^{-3}$ ) y luego se divide por el rendimiento del cultivo (R, ton ha<sup>-1</sup>).

Finalmente se calculó la Huella Hídrica extendida, la cual presenta la productividad aparente del agua azul utilizándose los precios determinados para el arroz en granza para el período de estudio.



A continuación se presenta el desglose de la metodología de cálculo:

ET del agua azul y verde

$ET_{\text{azul}} = \text{Lámina neta total} - \text{pérdida total de riego}$

$ET_{\text{verde}} = \text{Uso real del Agua} - ET_{\text{azul}}$

HH en términos totales ( $\text{m}^3\text{año}^{-1}$ ):

$HH_{\text{verde}} = 10 * \sum ET_{\text{verde}} * A$

$HH_{\text{azul}} = 10 * \sum ET_{\text{azul}} * A$

$HH_{\text{gris}} = L / (C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}) * 10^3$

Donde,

ET: Evapotranspiración del cultivo ( $\text{mmaño}^{-1}$ )

A: Superficie del cultivo (ha)

L: Carga del contaminante ( $\text{kgaño}^{-1}$ )

$C_{\text{max}}$ : Estándar de calidad ambiental ( $\text{mgl}^{-1}$ )

$C_{\text{nat}}$ : Concentración natural del fondo ( $\text{mgl}^{-1}$ )

HH por unidad de producto ( $\text{m}^3\text{ton}^{-1}$ ):

$HH_{\text{verde}} = 10 * \sum (ET_{\text{verde}}) / Y$

$HH_{\text{azul}} = 10 * \sum (ET_{\text{azul}}) / Y$

$HH_{\text{gris}} = HH_{\text{gris}}(\text{m}^3) / P$

Donde,

Y: Rendimiento del cultivo ( $\text{ton ha}^{-1}$ )

P: Producción del cultivo (ton)

HH extendida (productividad aparente del agua azul) ( $\text{Colones/m}^3$ ):

$\text{AWP} = \text{Precio por tonelada} / HH_{\text{azul}}$

### *Cosecha de lluvia*

Mediante una iniciativa de varias universidades públicas (UNA-CEMEDE, UNED, UCR, TEC) financiada con fondos de la Comisión Nacional de Rectores (CONARE) y denominada "Fortalecimiento de la seguridad alimentaria mediante el desarrollo y fomento de reservorios artificiales de aguas precipitadas, para la utilización en agricultura sostenible, en la región Chorotega de Costa Rica", se construyeron cuatro reservorios en la Región Chorotega, en comunidades de Nicoya y Santa Cruz.

El objetivo de estos reservorios era el de contribuir a la seguridad alimentaria mediante el cultivo de granos básicos, desarrollando y fomentando el uso de reservorios de aguas precipitadas para ser empleadas en producción agrícola sostenible en épocas de escasez del recurso hídrico.

Las estructuras se establecieron considerando diversas condiciones de terreno, suelo, pendiente, precipitación, brillo solar, entre otras (figura 19 y 20).

*Figura 19. Construcción de reservorio en Cerro Negro, Santa Cruz, Guanacaste*



*Figura 20. Reservorio en Comunidad La Esperanza, Nicoya, Guanacaste*



Se trabajó con productores locales en la construcción de los reservorios, así como en el diseño e instalación de sistemas de riego utilizando el agua recolectada, para ser utilizada en cultivos aledaños al área de reserva.

Los productores hicieron las preparaciones de terreno para sembrar cultivos como maíz, culantro y tomate, entre otros. Los cultivos fueron sembrados iniciando la época seca y para su riego se utilizó el agua del reservorio.

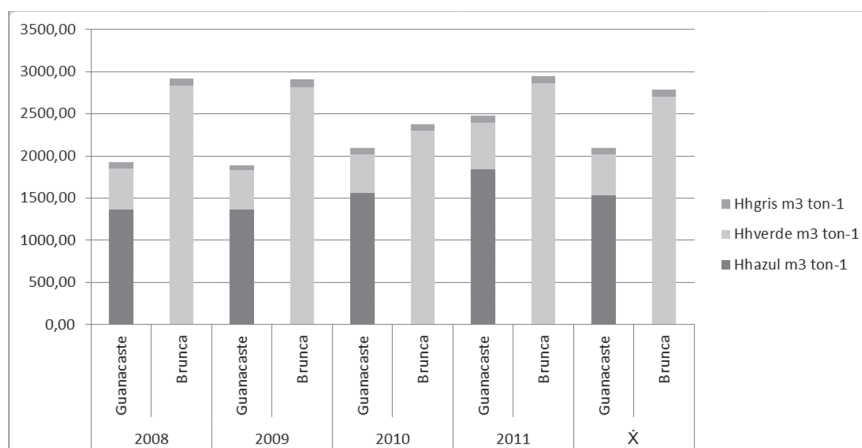
## **V. Resultados y discusión**

### *Aplicación del Cálculo de la Huella Hídrica del Cultivo del Arroz*

El cultivo del arroz es sustento de la seguridad alimentaria, por ser uno de los tres principales granos básicos del país. El arroz producido por los 1 340 productores significó un 72,97% del área sembrada en 2011 por granos básicos en Costa Rica, la cual cubrió una superficie del 22,2% del total del área cultivada a nivel nacional. Sin embargo, aun así fue requerida la importación de 123 885 ton. de arroz en granza para satisfacer el consumo por persona de 50,98 Kg.

En la figura 21 se observa el comportamiento de la Huella Hídrica en la Región Chorotega es uniforme variando entre  $1\ 892,70\ m^3\ ton^{-1}$  y  $2\ 476,53\ m^3\ ton^{-1}$ , con un promedio de  $2\ 096,27\ m^3\ ton^{-1}$ . En las dos regiones productoras, Región Chorotega y Región Brunca, a lo largo del período estudiado (2008-2011) se observa una mayor participación de la huella verde que de la huella gris, la cual tiene un promedio en la región Chorotega de  $75,57\ m^3\ ton^{-1}$ . Sin embargo, para los sistemas de riego generalizados en la región Chorotega, la Huella Hídrica Azul constituye su componente más importante, en promedio 73,12 %. Se encontró que la Huella Hídrica de esta región es menor a la de la Región Brunca principalmente por razones de rendimiento. Esto implica que los mayores rendimientos observados en la región Chorotega diluyen los volúmenes totales de agua requeridos entre el mayor tonelaje producido.

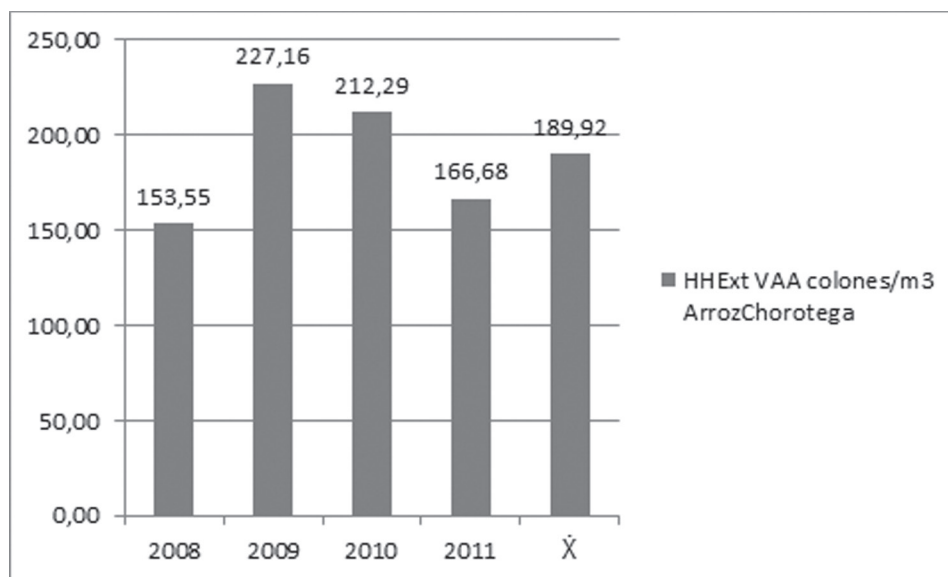
Figura 21. Huella hídrica azul, verde y gris en la región Chorotega y la región Brunca (2008-2011).



### Huella Hídrica Extendida

La producción de arroz en la Región Brunca no utiliza sistemas de riego generalizados por lo que no se posee un cálculo de huella hídrica azul fundamental para realizar el cálculo de huella hídrica extendida, por lo tanto la huella hídrica extendida fue solamente calculada para la Región Chorotega. El valor extendido del agua se observa con una variación de entre 153,55 colones/m³ en 2008 y 227,16 colones/m³ en 2009 presentando un promedio de 189,92 colones/m³ (figura 22).

Figura 22. Huella hídrica extendida del agua (2008-2011) calculada para el cultivo de arroz en la Región Chorotega.



### Cosecha de agua

Con la implementación de cosecha de agua mediante reservorios se han logrado importantes resultados que vienen a contribuir con aspectos como la seguridad alimentaria y la adaptación al cambio climático.

Los beneficiarios directos de los reservorios instalados en las comunidades de La Esperanza, Colas de Gallo y Cerro Negro han logrado obtener productos como culantro, tomate, apio, ajo, maíz, frijol, lechuga, entre otros, en la época seca (figuras 23 y 24).

*Figura 23. Producción de repollo utilizando agua de lluvia en Cerro Negro, Santa Cruz, Guanacaste*



*Figura 24. Producción de apio y tomate utilizando agua de lluvia en Cerro Negro, Santa Cruz, Guanacaste*



Otro de los resultados importantes logrados mediante la utilización de la tecnología de cosecha de agua de lluvia es la producción de tilapia, en el periodo en el cual no se utiliza el agua para riego. En algunos de los reservorios se sembró tilapia, la cual tiene un periodo de desarrollo de unos cinco meses, en los cuales alcanzaron unos 500 gramos de peso al momento de la cosecha. En las figuras 25 y 26 se ilustra la cosecha de tilapia y su preparación, respectivamente.

Con el aprovechamiento de la tilapia en la dieta familiar, además de la venta de la producción excedente, se mejora la condición socioeconómica de la familia y se contribuye a mejorar la seguridad alimentaria.

*Figura 25. Cosecha de tilapia en reservorio de Cerro Negro, Nicoya, Guanacaste.*



*Figura 26. Preparación de tilapia cosechada en reservorio.*



También es posible lograr aumentos en la producción de una importante variedad de cultivos, ya que se logra producir durante un ciclo más, normalmente en verano, cuando las condiciones de luminosidad son mejores para los cultivos. Además, en esta época el ataque de plagas naturales es menor debido a una humedad más baja. Morales & Rodríguez (2010) hicieron proyecciones sobre

los aumentos en rendimientos productivos en algunos productos en diversas regiones del país, incluyendo la región Chorotega, e indican que en varios cultivos se podría aumentar al menos un ciclo productivo al año (maíz, frijoles, cebolla, otros). Estos permiten mayor utilidad para los productores y por consiguiente un mejoramiento en la calidad de vida.

## VI. Conclusiones

La Región Chorotega presenta una situación particular de régimen lluvioso, en donde existe una gran precipitación anual (alrededor de 2000 mm), pero distribuidos de manera tal que llueve mucho durante 6 meses y los otros 6 meses soy muy secos. Esta característica ocasiona un problema de escasez de agua en la época seca, tanto para la producción agropecuaria como para los pobladores.

Aunado a lo anterior, el fenómeno del cambio climático tiende a agravar la situación. Esto hace necesaria la búsqueda de opciones de adaptación. Dentro de las medidas que se pueden adoptar están la utilización de la tecnología de cosecha de lluvia para utilizarla en producción y potabilización en verano, así como la medición de la huella hídrica, como una forma de tener claro el panorama sobre cuánto se está utilizando y cuanto se puede ahorrar del recurso hídrico y de esta forma hacer un uso más eficiente del agua.

El cálculo de la huella hídrica es un indicador que debe aplicarse a lo largo de una cadena de valor y en su ideal debe alcanzar al consumidor final. Sin embargo, en este estudio se presenta el indicador a nivel de arroz en granza y limpio por lo que es necesario desarrollar más investigaciones sobre este tema con el fin de dilucidar inclusive el valor del agua generado por esta actividad a nivel de consumidor.

Se observó como el rendimiento es un elemento determinante en el valor de las huellas hídricas, naturalmente, más allá de las condiciones edafo-climáticas, de tal manera que se ha observado que el riego, al impactar favorablemente los rendimientos por hectárea, favorecen el valor del agua y mitigan la huella hídrica, ya que implica una mayor eficiencia en el consumo del agua.

De previo a medidas de adaptación ante el cambio climático, en la Región Chorotega se tiene una carencia de indicadores productivos agropecuarios que permitan prever impactos económicos en las actividades productivas, producto de las mermas en las precipitaciones esperadas para la región. Es por ello, que el dar un indicador de impacto y de valor del agua puede favorecer la identificación y el establecimiento de sistemas agropecuarios más sostenibles y resilientes, cómo se observa en los sistemas anegados de Guanacaste.

La cosecha de agua de lluvia ha permitido, en algunos casos en la región, la obtención de diversos productos agrícolas en verano. Esto viene a colaborar con la dieta familiar y por lo tanto con la seguridad alimentaria. Además, desde el punto de vista económico, los productores se ven beneficiados puesto que logran vender parte de su producción.

Además, la cosecha de agua de lluvia presenta otros beneficios como lo son la disminución de la presión sobre los recursos hídricos, la disminución en la erosión, la utilización más eficiente del agua al usar técnicas de riego como el riego por goteo.



## Referencias

FAO. (2000). *Manual de captación y aprovechamiento de agua de lluvia. Experiencias en América Latina. Serie Zonas Áridas y Semiáridas*. Santiago, Chile: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Fetzek, S. (2009). Climate-related impacts on national security in Mexico and Central America. Interim Report. . London, England: Royal United Services Institute.

GWP. (2011). Situación de los recursos hídricos en Centroamérica: hacia una gestión integrada. . Tegucigalpa, Honduras: Impresiones Industriales.

Hoekstra, A. (2003). Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. *Value of Water Research Report Series No. 12*. Delf, The Netherlands: UNESCO-IHE.

Hoekstra, A.Y. and Chapagain, A.K. (2008) Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources, Blackwell Publishing, Oxford, UK.

Hoekstra, A.Y.; Chapagain, A.K.; Aldaya M.M.; Mekonnen M.M. (2009). Water Footprint Manual. State of the Art. Water Footprint Network. Enschede, The Netherlands.

Ibraimo, N., & Munguambe, P. (2007). *Rainwater harvesting technologies for small scale rainfed agriculture in arid and semi-arid areas*. Mondlane, Mozambique: Department of Rural Engineering, Faculty of Agronomy and Forestry Engineering, University Eduardo.

IFAM. (2003). Regiones y Cantones de Costa Rica. *Serie Cantones de Costa Rica No. 2*.

INEC. (Recuperado de Abril de 2011). Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Obtenido de Características Demográficas: <http://www.inec.go.cr/Web/Home/GeneradorPagina.aspx>

Molares, D., & Rodríguez, R. (2010). Alternativas rentables productivas por región. Costa Rica.

Nación, P. E. (2011). Informe Estado de la Región en Desarrollo Humano Sostenible. Capítulo 2: Panorama Demográfico. San José, Costa Rica.

Prinz, D. (1994). Water Harvesting: Past and Future. Karlsruhe, Germany.

Programa Estado de la Nación. (2008). Informe Estado de la Región en Desarrollo Humano Sostenible. Capítulo 2: Panorama Demográfico. San José, Costa Rica.

Programa Estado de la Nación. (2008). Informe Estado de la Región en Desarrollo Humano Sostenible. Capítulo 6: El desafío de no expulsar a los habitantes. San José, Costa Rica.

Programa Estado de la Nación. (2011). Informe Estado de la Región en Desarrollo Humano Sostenible. Capítulo 2: Panorama Demográfico. San José, Costa Rica.

Pulver, E., Contreras, J., & Moreira, S. (s.f.). *Cosechando el agua en el Trópico Húmedo de México*. Proyecto desarrollado con la colaboración de CMA, SAGARPA, CONAGUA y el Comité Nacional Sistema Producto Arroz, A.C.

Rodríguez, R. (2011). Fortalecimiento de la seguridad alimentaria mediante el fomento y desarrollo de reservorios artificiales de aguas precipitadas, para la utilización en agricultura sostenible en la Región Chorotega. *Memoria Jornadas Académicas*. Costa Rica.

Rodríguez, R., Morales, D., & Obando, L. (2010). *Propuesta de estrategia nacional de desarrollo de las opciones técnicas para la cosecha de lluvia y su utilización en sistemas de riego*.

Salinas, A., Rodríguez, R., & Morales, D. (2010). *Manual de especificaciones técnicas básicas para la elaboración de estructuras de captación de agua de lluvia (SCALL) en el sector agropecuario de Costa Rica y recomendaciones para su utilización*. Centro Mesoamericano de Desarrollo Sostenible del Trópico Seco. Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).

Tenorio, L. A. (2009). *Geografía Turística de la Región Chorotega*. Costa Rica: EUNED.

Waterfall, P. (1998). *Harvesting rainwater for landscape use*. Arizona: Arizona Department of Water Resources, University of Arizona.

# Uso de tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar en actividades económicas agropecuarias en Costa Rica

*Dr. Tomás de Jesús Guzmán Hernández<sup>14</sup>*

## **Resumen**

En la actualidad existe una gran preocupación para poder utilizar energías limpias en todo el país y especialmente el uso de la energía solar térmica y fotovoltaica las cuales como tecnologías renovables no son despreciables. La presente idea se propone con el fin de generar datos de interés que nos muestren la potencialidad que nos permita aprovechar la energía solar en diferentes actividades productivas agropecuarias en la zona rural de la región Huetar Norte y Chorotega de Costa Rica a través de sistemas fotovoltaicos y térmicos: termosifónicos y forzados de calentamiento de agua para aplicarlos en sistemas agropecuarios.

Se propone diseñar, implementar y evaluar sistemas fotovoltaicos, termosifónicos y forzados de calentamiento de agua para ser usados en lecherías, plantas de matanza y bajar la factura de pago de electricidad en las instalaciones productivas agropecuarias buscando sistemas más amigables con el ambiente y bajar la huella de carbono local y regional. Las instalaciones agropecuarias a utilizar serán lecherías y planta de cosecha animal de vacunos, porcinos y ovejas. Las empresas seleccionadas para la aplicación de estas tecnologías serán “Dos Pinos” y el Instituto Tecnológico de Costa Rica en su Sede Regional de San Carlos, así como fincas en Florencia, Santa Clara, Zarceros y Guanacaste.

A su vez se instalará un equipo móvil digital de medición de parámetros climáticos tales como temperaturas (medias, mínimas y máximas), insolación, irradiación solar, que nos permita correlacionar datos agroclimáticos con captación de energía solar día a día.

Al sistema de almacenamiento de energía se conectará una computadora para registrar la entrada y salida de la energía, para los sistemas productivos, con vistas a registrar a partir de termopares y controladores de volumen de agua, el llenado y uso de la energía. Se instalará un programa en sistema digital directamente a una computadora para almacenar una base de datos climáticas, que nos permita establecer una relación viable entre captación solar y ahorro neto de energía. Finalmente se establecerá una correlación entre producción potencial de energía solar y factura eléctrica, en donde se visualizará la tendencia entre ambas variables, así como la comparación entre instalaciones con y sin el sistema.

Al final del proyecto se podrá vincular la producción de leche en Costa Rica, como un sistema productivo con una reducción importante de la huella de carbono.

Al mismo tiempo el proyecto se utilizará como un campo tecnológico demostrativo de visita para estudiantes, productores y empresarios del país.

---

<sup>14</sup> Área Académica del Doctorado, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos. Correo elect. [tjguzman@itcr.ac.cr](mailto:tjguzman@itcr.ac.cr), [tjguzman@gmail.com](mailto:tjguzman@gmail.com)

**Palabras clave:** Energía solar, sistemas termosifónicos y forzados, sistemas agropecuarios, calentamiento y uso de agua caliente industrial.

## **Abstract**

At present we must work on the implementation of clean energy such as solar energy, the use of biomass and other renewable sources as an alternative to climate change and local carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect.

This project proposes to generate interesting data showing the potential of solar energy in agricultural activities in the Huétar Norte and Chorotega region of Costa Rica through solar thermal systems and photovoltaic uptake water heating and energy production respectively, using solar energy.

The facility would use dairies and other agricultural production units. Selected for the application of these technologies companies will Cooperative Milk Producers “Dos Pinos RL” and the Technological Institute of Costa Rica in their Regional Headquarters San Carlos.

It is proposed to design, implement and evaluate Thermosiphonic water heating systems with solar energy and photovoltaic systems for generating electrical energy consumption, for use in the sterilization of equipment, lighting systems and power supply and cooling equipment lower electricity bill payment in these production facilities, looking for more environmentally friendly systems and lower the footprint of local and regional carbon.

Must install a digital mobile measurement equipment climatic parameters such as temperature (average, minimum and maximum), sunshine, sunlight, etc., allowing agroclimatic data correlate with solar energy every day.

The system of water storage and energy production will connect a computer to the temperature values at the entrance and exit of overlooking recorded from thermocouples, filling and energy use with differential tank temperature, and the recording of electrical production and usage.

A program was installed on the computer to store a data base of climate and energy harvesting to enable us to establish a viable relationship between solar gain and net savings. Finally a correlation between production potential of solar energy and electric bill, where the trend between the two variables is displayed, and the comparison between facilities with and without the system is established.

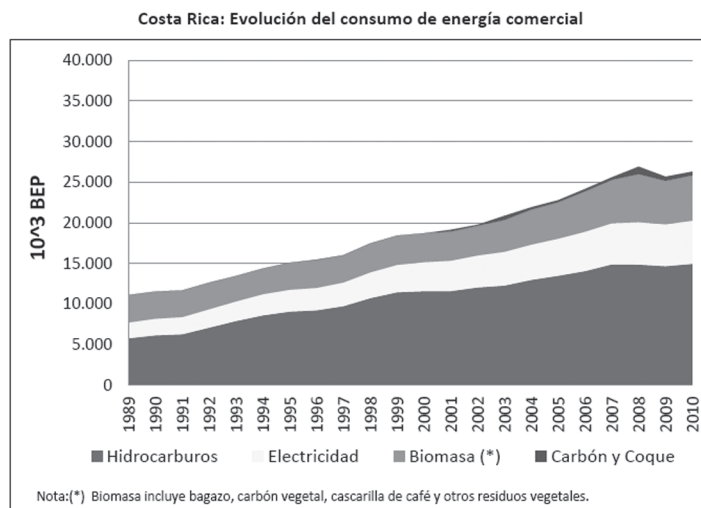
At the end of the project will be to link milk production in Costa Rica, as a production system with a significant reduction in carbon footprint. At the same time the project will be used as a technological demonstration field visit for students, producers and entrepreneurs of both áreas.

**Keywords:** Solar, thermosiphonic and photovoltaic systems, water heating and agricultural production processes

## **I. Introducción**

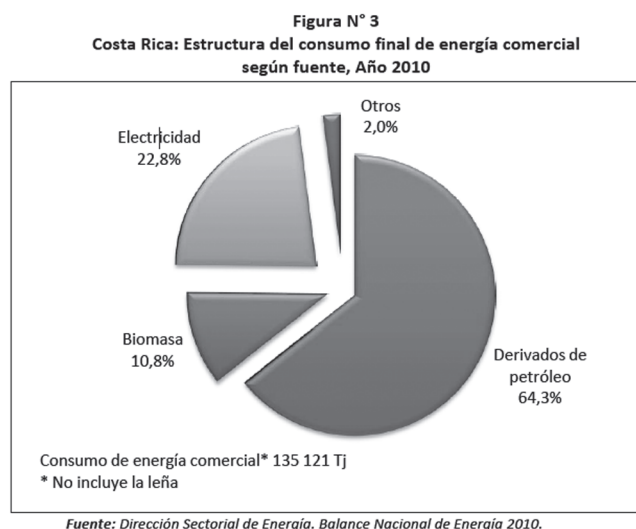
Según el VI Plan Nacional de Energía 2012-2030 del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAET) “Costa Rica es un país rico en recursos naturales renovables que podrían utilizarse con fines energéticos; sin embargo, basa su desarrollo en el uso de los derivados del petróleo (...) El crecimiento promedio del consumo de hidrocarburos en los últimos 20 años fue del 4,7% anual y el de la electricidad del 5,3% anual (figura 27).

Figura 27. Costa Rica: Evolución del consumo de energía comercial



Con estas tasas de crecimiento, la demanda de electricidad se duplicará en 13 años y la de hidrocarburos en 15 años (...). La dependencia petrolera ha aumentado hasta alcanzar, en el 2010, el 64,3% del consumo de energía comercial; la electricidad atiende el 22,8% de la demanda, la biomasa 10,8% y 2% otros productos (figura 28).

Figura 28. Costa Rica: Estructura del consumo final de la energía comercial



Esta alta dependencia, resultado de políticas impulsadas en el pasado cuando los precios internacionales del petróleo presentaban niveles mínimos históricos, nos hace cada vez más vulnerables y agrava la incertidumbre y riesgos para la garantía del suministro de la energía que el país requiere para su desarrollo sostenible, con los consecuentes impactos ambientales negativos.

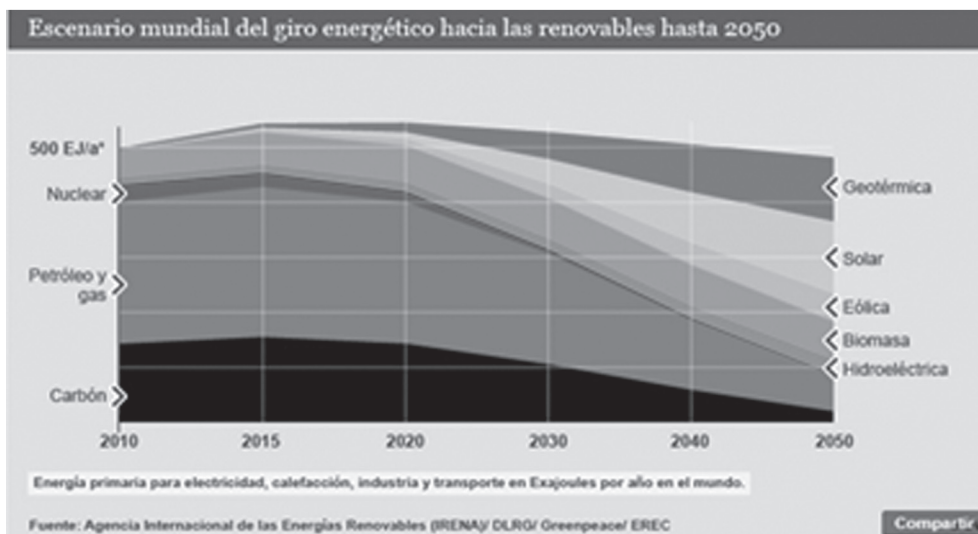
Cada fuente de energía tiene un potencial de emisiones de CO<sub>2</sub> diferente, por lo que, la composición de la matriz de la oferta de energía y las tecnologías de los equipos de consumo (vehículos, equipos industriales y agrícolas, entre otros) determinarán el nivel de emisiones del sistema energético del país.



Ante la gran dependencia energética de los combustibles fósiles cuyo consumo produce altos niveles de emisiones, es necesario impulsar medidas de uso racional y eficiencia energética;”

Así mismo la tendencia internacional de uso de energía, desde la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA), consciente del problema energético global plantea el siguiente y necesario escenario mundial del giro energético (figura 29):

*Figura 29. Escenario mundial del giro energético hacia las energías renovables hasta 2050*



Queda clara la necesidad de optar por sistemas de producción que opten por las fuentes renovables de energía. Costa Rica, tal y como aparece en este plan de MINAET, presenta un potencial teórico en el caso de fuente solar de 10.000MW, en el cual el grado de utilización es mínimo (cuadro 2):

Cuadro 2. Potencial de recursos energéticos comerciales

Fuente	Potencial Teórico	Identificado	Grado de utilización
Hidroeléctrico	25.500 MW	6.633 MW	21%
Geotérmico	865 MW	257 MW	64%
Eólico	600 MW	274 MW	35%
Solar	10.000 MW	0,14 MW	mínimo
Residuo Vegetal		7.953 X 10 <sup>3</sup> Tm	13%
Bagazo de caña		1 290 X 10 <sup>3</sup> Tm	96%
Leña	25.000 X 10 <sup>3</sup> Tm	783 X 10 <sup>3</sup> Tm	98%
Biogás	9.981 TJ	5 206 TJ	1%
Alcohol	32.556 X 10 <sup>6</sup> lt	115 X 10 <sup>6</sup> lt	0%
Biodiesel	22.851 X 10 <sup>6</sup> lt	176 X 10 <sup>6</sup> lt	mínimo
Carbón Mineral	27X10 <sup>6</sup> TM		0%
Petróleo (*)	91,7-2.910X10 <sup>6</sup> bbl		0%

Fuente: ICE, Plan de expansión 2008

Wright J., Estudio del potencial solar en Costa Rica, DSE-ICE, noviembre 2006

DSE, Encuesta de oferta y consumo energético a partir de biomasa, 2006

DSE, Potencial dendroenergético de Costa Rica, 1990

DSE, Diagnóstico Dirección Sectorial de Energía. Balance Nacional de Energía 2010.

MINAET, Programa Nacional de Biocombustibles

Western Atlas International, Inc., Exploration strategies report for RECOPE, 1988

LAICA, información estadística

Ante esta situación, enmarcados en la línea de acción de la estrategia 2.2 del MINAET para el sector Energía: *Promover programas de ahorro energético en los macro-consumidores*, Se apuesta por la utilización e introducción de la tecnología disponible en energía solar y su adecuación y validación del rendimiento en el sector agropecuario de Costa Rica.

La ganadería es responsable del 18% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) de acuerdo al informe presentado por la FAO sobre el impacto ambiental de la actividad. Sin lugar a duda, la preocupación atañe con actualidad al sector y urge acciones de reorientación en los procesos productivos. Es urgente mitigar y para ello, como dice Laura Finster, investigadora del equipo de Gases de Efecto Invernadero del Instituto de Tecnología Agroalimentaria INTA: "Mitigar es pensar cómo la producción de carne y leche debe mejorar su eficiencia energética para reducir las emisiones de GEI por unidad de producto".

Así mismo, desde esta misma institución se anima y cita de esta forma: "Para hacer frente a esta situación, los investigadores recomendaron reducir las emisiones de metano provenientes del ganado vacuno mediante diversas estrategias que no impliquen grandes costos para los productores y cuya tecnología se encuentre disponible."

Además, ha quedado patente según la FAO que la ganadería genera más gases de efecto invernadero que el transporte. Así pues, urge acciones tanto de capacitación como de introducción de tecnologías que minimicen este impacto generado en los procesos productivos del sector. En este sentido y contando con la alianza de un macroproductor como es la cooperativa de productores de leche Dos Pinos, se desea impactar en el sector lechero para mitigar el impacto ambiental y huella de carbono del sector.

En San Carlos se encuentran el 55% de los productores asociados de la cooperativa Dos Pinos, con un total de 850 productores de leche y una producción de más del 50% nacional (0.6 millones de kilos de leche). Entre los procesos productivos del sector ganadero y lechero que genera huella de carbono se encuentra el consumo eléctrico de las plantas agroindustriales relacionadas, ya sean plantas de matanza como lecherías.

En esta situación se han estudiado las alternativas y estrategias de eficiencia energética del proceso productivo, oportunidades y potencial presentes en la zona y se ha decidido optar por la tecnología solar presentada como alternativa más viable y efectiva; es necesario validarla en la región, estimándose un impacto a medio plazo considerable. Tal y como se presenta en el documento y estudio de caso presentado de la lechería de la Sede Regional, con una media de producción diaria de leche de 500 Kg, la reducción de emisiones de carbono a la atmósfera con la alternativa presentada sería de 5 a 10 toneladas por año, Cuadro 2. Extrapolando a la producción diaria de leche, tan solo en San Carlos, se presentaría un potencial de reducción de emisiones de carbono de hasta 4.380.000 Toneladas anuales. (Se estima una emisión media de 0.94 Kg de CO<sub>2</sub> por Kw de electricidad generado con combustibles fósiles).

Las variables de riesgo han sido consideradas positivamente; la tecnología disponible ya utilizada en otras aplicaciones, sectores y países, es confiable y sólida para la asimilación por los productores; el coste de inversión es asequible y los plazos de recuperación y amortización de la inversión son atractivos. Definitivamente se necesita la validación de esta tecnología en la región e introducirla en los procesos de innovación por parte de los productores lecheros.

El Instituto Tecnológico de Costa Rica desde su Sede de San Carlos tiene una amplia, reconocida y continua misión de extensión para el desarrollo de la región norte con diversos planes y programas de sensibilización y capacitación en sistemas de producción limpia. La alianza con los productores lecheros de la región lleva años produciéndose y creemos oportuno y necesario la introducción innovadora y definitiva de fuentes de energía limpias como esta propuesta en un sector tan dinámico como es el lechero, contribuyendo al ánimo nacional y la meta de Carbono Neutralidad.

Así mismo, la formación de nuestros estudiantes, futuros desarrolladores de la región, deben ser formados con estos principios de sostenibilidad y sistemas de producción con energías renovables. De esta forma y en este ámbito, se ha diseñado y visualizado cada uno de los objetivos, metas y todas y cada una de las actividades de esta propuesta.

## II. La energía del sol

La mayoría de las fuentes de energía usadas por el hombre derivan indirectamente del sol.

El sol ha sido motivo de adoración en diferentes culturas en el mundo, debido a que nos brinda luz, calor y a través de la fotosíntesis alimentos, combustibles fósiles, entre otros servicios ambientales, tales como la evaporación del agua que participa directamente en el ciclo del agua.

El Sol es la principal fuente de energía para todos los procesos en el sistema tierra - atmósfera - océano. La radiación solar que llega al sistema tierra - atmósfera, se conoce también con el nombre de radiación de onda corta, por los valores de longitud de onda en los que se concentra el máximo de emisión de energía solar. La atmósfera es mayormente transparente a la radiación solar entrante.

Del 100 % de radiación solar, sólo un 25% llega directamente a la superficie de la Tierra y un 26% es dispersado por la atmósfera como radiación difusa hacia la superficie, esto hace que un 51 % de radiación llegue a la superficie terrestre. Un 19 % es absorbido por las nubes y gases atmosféricos. El otro 30 % se pierde hacia el espacio, de esto, la atmósfera dispersa un 6 %, las nubes reflejan un 20 % y el suelo refleja el otro 4 %. Entonces la radiación solar que llega a la atmósfera puede ser dispersada, reflejada o absorbida por sus componentes. Esto depende de la longitud de onda de la energía transmitida y del tamaño y naturaleza de la sustancia que modifica la radiación (Taiz, 2002 y Camejo, 2012).

Ese porcentaje de energía que alcanza la superficie del planeta, es la que pone en marcha todos los procesos en la tierra, pues calienta la atmósfera, los océanos y los continentes, genera los vientos, mueve el ciclo del agua, hace crecer las plantas a través de la fotosíntesis, proporciona alimento a los animales, e incluso en el pasado generó los combustibles fósiles (Taiz, 2002).

La radiación solar siempre ha sido utilizada por el hombre de muy diferentes formas entre las que podemos mencionar: secado de semillas y frutas, secado de los utensilios del hogar, la ropa, se ha utilizado la energía de la madera para producir calor, para alejar animales, para cocinar, entre otras.

Hoy día la energía solar se puede utilizar para los mismos fines que en el pasado utilizando diferentes sistemas tecnológicos. La energía del sol puede aprovecharse por medio de captadores de células fotovoltaicas y colectores térmicos, que pueden transformarla en electricidad o calor.

La energía del sol se considera energía renovable o limpia, que puede hacer considerables contribuciones para resolver los más urgentes problemas que afronta la humanidad, dentro de los sistemas humanos sostenibles (Shyam, 2005; Camejo, 2012 y Berriz, 2012).

Sin embargo, su desarrollo está aún muy limitado en muchos países, dentro de éstos España, a pesar de ser el país europeo con mayor radiación solar. Algunas de las causas de la escasa implantación de este tipo de energía son la falta de concienciación ecológica y la necesidad de realizar una inversión inicial alta que no todo el mundo está dispuesto a asumir. No obstante, durante los últimos años los costes se han abaratado de manera importante y, además, las instalaciones solares cuentan con importantes ayudas y subvenciones por parte de las instituciones para intentar fomentar su consumo (Landa, 2005).

### III. Uso de la energía solar

La energía del sol puede ser usada hoy día de muchas maneras, entre las que podemos citar, calentamiento de agua, a través de colectores solares, para producir corriente eléctrica a través de celdas fotovoltaicas, a través de reflectores solares para aumentar la eficiencia. Las ventajas de la energía solar son numerosas respecto a las energías convencionales. En primer lugar es la fórmula energética más respetuosa con el medio ambiente y sus recursos son inagotables, por lo que reduce la dependencia energética de energías fósiles y contaminantes como el petróleo (Landa, 2005; Román, 2007; Rizk y Nagrial (2008); Torpey, 2009; Tinajeros, 2011 y Swift, 2011).

Según Landa (2005), “la demanda de energía aumenta cada año en nuestra sociedad, a pesar de que los recursos energéticos son limitados. De ahí la importancia de potenciar energías renovables como la solar, que permite diferentes usos tales como: la demanda de energía aumenta cada año en nuestra sociedad, a pesar de que los recursos energéticos son limitados. De ahí la importancia de potenciar energías renovables como la solar, que permite diferentes usos:

“**Energía solar fotovoltaica:** la energía solar se transforma en electricidad a través de paneles solares fotovoltaicos. Se usa tanto en sistemas aislados como conectados a la red eléctrica. **Energía solar térmica:** se capta la energía del sol para conseguir agua caliente y calefacción por medio de colectores solares. **Aprovechamiento pasivo del sol:** la simple orientación de la vivienda y su forma constructiva permiten obtener ganancias solares sin necesidad de ningún elemento técnico. Secado pasivo de semillas y otros productos agrícolas y animales y pesqueros” (Berriz, 2012).

En este apartado se debe establecer el problema que se espera solucionar con el proyecto o en su defecto el conocimiento que se espera generar a partir del mismo y los antecedentes y preocupaciones que le dieron origen. Se deberá establecer la importancia del desarrollo del proyecto, aportando

información y datos que respalden esa importancia. En general, se deberán definir, claramente las razones que justifican la realización del proyecto, el impacto, los beneficios.

Se sabe que tanto para la supervivencia como para el desarrollo, son imprescindibles los recursos energéticos, los cuales pudieran clasificarse en agotables (los hidrocarburos y los reactivos nucleares) y renovables, o sea, los que tienen como fuente primaria la radiación solar, es decir, los portadores de la energía hidráulica o del agua, la eólica o del viento, la bioquímica o de la biomasa, la luminosa o de la luz, la solar térmica o calórica, la solar fotovoltaica o fotoeléctrica, y algunas marinas. Es evidente que el desarrollo sostenible tiene que estar basado en una energética que sea también sostenible (Berriz, 2012).

A continuación se analizarán algunos aspectos relacionados con los recursos energéticos y su relación con el uso de la energía solar: Desde el punto de vista de su disponibilidad, los hidrocarburos pudieran abastecer totalmente las necesidades energéticas del mundo durante algún tiempo, pero no durante mucho tiempo. Los hidrocarburos están contaminando el mundo y poniendo en peligro, la vida en el planeta. Por ello, es imposible imaginarse un desarrollo sostenible basado en el petróleo o el carbón. Desde el punto de vista de su disponibilidad, la radiación solar pudiera abastecer totalmente las necesidades energéticas del mundo indefinidamente. La radiación solar es la energía que mantiene el equilibrio térmico y permite la vida en el planeta. La radiación solar llega a todos los pueblos del mundo. Pertenece a todos. No puede ser bloqueada, no puede ser utilizada por nadie para su uso exclusivo, o como medio de dominación. Costa Rica puede llegar a ser una potencia energética basada en el uso de las fuentes renovables de energía y en el desarrollo del conocimiento y de esta la tecnología aplicada a los sistemas de producción agrícola.

Resulta imposible concebir un desarrollo sostenible que no esté basado en las fuentes renovables de energía en sus diferentes manifestaciones. Existe una unidad indisoluble entre energía, medio ambiente y desarrollo.

De acuerdo a todo lo anterior la energía del sol puede utilizarse en el país con ventajas en aplicaciones en pequeña y gran escala para el calentamiento de agua y aire a baja temperatura (25 -100 ° C) así como para producir corriente eléctrica.

En el caso de la energía solar, esta podría ser usada para producir agua caliente que podría ser utilizada dentro de cualquier instalación o en algunas unidades productivas, tales como en las lecherías, las plantas de matanza y en otras unidades, En el caso de la zona Norte, existen una gran cantidad de productores de leche, que usan de manera sistemática agua caliente en sus unidades, calentadas a través de resistencias eléctricas.

En este sentido este proyecto se estaría centrando en dos de las variantes de captación de la energía solar, el calentamiento de agua y la producción de energía a nivel local, que ayude a los pequeños y medianos productores a ser más amigables con el ambiente.

#### **IV. Formas de captación de la energía del sol**

Los paneles solares son dispositivos que aprovechan la energía que llega a la Tierra en forma de radiación solar, los componentes principales de los paneles solares son las células de silicio policristalino, el cobre, el aluminio, pvc y otros materiales. Debemos hablar de dos tipos distintos de paneles solares dependiendo de su utilización: el primero es el panel solar para el calentamiento del agua, que puede ser de circuito abierto y cerrado, normalmente para uso doméstico (colectores solares), visible en techos y azoteas de casas y edificios, el cual, a través de un circuito cerrado calienta el agua, y ésta es almacenada en un depósito para su posterior uso. En las primeras, el agua de



consumo pasa directamente por los colectores solares. Este sistema reduce costos y es más eficiente (energéticamente hablando), pero presenta problemas en zonas con temperatura por debajo del punto de congelación del agua, así como en zonas con alta concentración de sales que acaban obstruyendo los paneles. En las instalaciones de circuito cerrado se distinguen dos sistemas: flujo por termosifón y flujo forzado. Los paneles solares térmicos tienen un muy bajo impacto ambiental (Res & Rue Dissemination, 2005; Khan, 2010 y Quirós, 2011).

**Calentadores de agua:** El agua caliente se utiliza para uso doméstico, comerciales, hospitales, centros de recreo, hoteles, e industrias, etc. También puede ser usada en sistemas agropecuarios. Varios opciones de calentadores solares de agua pueden ser diseñados y construidos dependiendo de la disponibilidad de los materiales (como placa, tubo, pintura, cobertor y aislantes, etc.) y la necesidad directa de donde se irá a utilizar; pero el principio básico es el mismo para todos los diseños, el colector solar ha sido ya descrito (Guzmán, 1987).

### *Colector solar. Colector solar plano*

Para cualquiera de las aplicaciones de la energía solar la parte principal del sistema es el colector. Dependiendo de los requerimientos, la energía solar puede ser transformada en calor, usando los colectores solares planos, que pueden lograr temperaturas entre 65° – 130° C, con una eficiencia promedio 40 – 60%.

Los captadores solares son los elementos que capturan la radiación solar y la convierten en energía térmica, en calor. Como captadores solares se conocen los de placa plana, los de tubos de vacío y los captadores absolvedores sin protección ni aislamiento. Los sistemas de captación plana o de placa plana) con cubierta de vidrio son los comunes mayoritariamente en la producción de agua caliente sanitaria ACS. El vidrio deja pasar los rayos del Sol, estos calientan unos tubos metálicos que transmiten el calor al líquido de dentro. Los tubos son de color oscuro, ya que las superficies oscuras calientan más.

El vidrio que cubre el captador no sólo protege la instalación sino que también permite conservar el calor produciendo un efecto invernadero que mejora el rendimiento del captador. Están formados de una carcasa de aluminio cerrada y resistente a ambientes marinos, un marco de aluminio eloxat, una junta perimetral libre de siliconas, aislante térmico respetuoso con el medio ambiente de lana de roca, cubierta de vidrio solar de alta transparencia , y finalmente por tubos soldados ultrasónicos.

Los colectores solares se componen de los siguientes elementos (Bracamonte-Baran y Baritto 2012):

- **Cubierta:** Es transparente, puede estar presente o no. Generalmente es de vidrio aunque también se utilizan de plástico ya que es menos caro y manejable, pero debe ser un plástico especial. Su función es minimizar las pérdidas por Convección y radiación y por eso debe tener una transmitancia solar lo más alta posible.
- **Canal de aire:** Es un espacio (vacío o no) que separa la cubierta de la placa absorbente. Su espesor se calculará teniendo en cuenta para equilibrar las pérdidas por convección a las altas temperaturas que se pueden producir si es demasiado estrecho.
- **Placa absorbente:** La placa absorbente es el elemento que absorbe la energía solar y la transmite al líquido que circula por las tuberías. La principal característica de la placa es que tiene que tener una gran absorción solar y una emisión térmica reducida. Como los materiales comunes no cumplen con este requisito, se utilizan materiales combinados para obtener la mejor relación absorción / emisión.

- **Tubos o conductos:** Los tubos están tocando (a veces soldadas) la placa absorbente para que el intercambio de energía sea lo más grande posible. Por los tubos circula el líquido que se calentará e irá hacia el tanque de acumulación.
- **Capa aislante:** La finalidad de la capa aislante es recubrir el sistema para evitar y minimizar pérdidas. Para que el aislamiento sea el mejor posible, el material aislante deberá tener una baja conductividad térmica.

El alma del sistema es una verja vertical de tubos metálicos, para simplificar, que conducen el agua fría en paralelo, conectados por abajo por un tubo horizontal en la toma de agua fría y por arriba por otro similar al retorno.

La parrilla viene encajada en una cubierta, como la descrita más arriba, normalmente con doble vidrio para arriba y aislante por detrás.

En algunos modelos, los tubos verticales están soldados a una placa metálica para aprovechar la insolación entre tubo y tubo (Guzmán e Iglesias, 1989; RES & RUE DISEMINATION, 2005 y Sopianet *al*, 2007).

### *Captadores solares de tubos de vacío “todo vidrio”*

En este sistema los tubos metálicos del sistema precedente se sustituyen por tubos de vidrio, introducidos, de uno en uno, en otro tubo de vidrio entre los que se hace el vacío como aislamiento. Las grandes ventajas que presentan estos tipos de captadores son su alto rendimiento y que, en caso de que uno de los tubos se estropeará, no hay que cambiar todo el panel por uno nuevo, sino que sólo hay que cambiar el tubo afectado. Por el contrario, como inconveniente se tiene que, en relación con los de placa plana, estos resultan más caros.

### *Captadores solares de tubos de vacío con “tubos de calor” por cambio de fase*

Este sistema aprovecha el cambio de fase de vapor a líquido dentro de cada tubo, para entregar energía a un segundo circuito de líquido de transporte.

Los elementos son tubos cerrados, normalmente de cobre, que contienen el líquido que, al calentarse por el sol, hierve se convierte en vapor que sube a la parte superior donde hay un cabezal más ancho (zona de condensación), que en la parte exterior está en contacto con líquido transportador, que siendo más frío que el vapor del tubo en capta el calor y provoca que el vapor se condense y caiga en la parte baja del tubo para volver a empezar el ciclo.

El líquido del tubo puede ser agua que, habiendo reducido la presión haciendo un vacío parcial, tendrá un punto de ebullición bajo para trabajar incluso con la insolación de los rayos infrarrojos en caso de nube.

El tubo de calor se puede envolver con una chaqueta de materiales especiales para minimizar las pérdidas por irradiación.

El tubo de calor se cierra dentro de otro tubo de vidrio entre los que se hace el vacío para aislar. Se suelen emplear tubos de vidrio resistente, para reducir los daños en caso de pequeñas granizadas. En estos casos se logra, una eficiencia del 163% comparada con los con colectores de serpentín.

Estos autores han planteado en sus artículos, ponencias y manuales todo lo anterior, relacionado con los sistemas de captación de energía solar (Shyam, 2005; Landa, 2005; Uribe, 2007; UPC, 1999; Quirós, 2011).

### *Calentador de agua, uso doméstico (circulación natural o termosifón)*

En la figura 30 se presenta un calentador de agua. El colector plano se coloca mirando hacia el sur con una inclinación de 15-20 grados respecto a la horizontal. Los tubos del colector, por los que circula el agua, se colocan longitudinalmente de manera que el agua fría (la cual proviene de un tanque proviene de un tanque de almacenamiento) entre por la parte baja y una vez que se calienta por la radiación solar, sale por la parte superior del colector debido a su menor densidad. Dichos procesos (de entrada y salida de agua) continúa hasta que haya una cantidad mínima de la radiación solar. De esta manera el agua caliente se acumula en el tranque, la cual puede ser utilizada cuando exista necesidad.

*Figura 30. Ejemplo comercial sistema termosifónico.*



Sistema por termosifón y tubos de vacío

Fuente: [http://www.mimacsolar.es/equipos\\_forzados.html](http://www.mimacsolar.es/equipos_forzados.html)

Además el número de colectores requerido en un sistema solar depende de la cantidad de agua que se necesite calentar, su temperatura y el clima del lugar; sin embargo con un metro cuadrado de un colector plano, en el clima de varios lugares de Costa Rica, se puede calentar un promedio de 75 litros de agua, diariamente, aumentando su temperatura de 20 grados hasta 55 – 60 grados centígrados.

Con estos sistemas se puede calentar 200 litros de agua de 20 grados centígrados, en la mañana hasta 40 – 60 grados centígrados a las 5 de la tarde dependiendo de la radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento, etc. Durante la noche el agua del tanque pierde calor equivalente  $\frac{1}{2}$  - 1 grado centígrado por hora.

Debido a que la radiación solar no es siempre suficiente para calentar agua (a la temperatura necesaria) todos los días durante el año, es recomendable conectar el sistema solar con un sistema convencional de calentamiento de agua. Con dicho sistema se puede asegurar una determinada temperatura economizando el uso de la energía convencional (Shyan, 1996).

Dentro de las aplicaciones de la energía solar se destaca por su fiabilidad técnica y su rendimiento el calentamiento de agua, con fines sanitarios, con colectores solares en instalaciones del turismo, residenciales, en unidades agropecuarias, en donde se requiere disponibilidad de agua caliente a

cualquier hora del día; además, para consumo de agua caliente sanitaria de hasta 500 litros al día o más se recomienda la utilización de colectores solares termosifónicos modulares (Despaigne *et al*, 2003).

A partir de la experiencia generada por el coordinador del proyecto en Cuba, en la utilización de estos sistemas, para uso agropecuario y de laboratorio, en las plantas de hidrot ratamiento térmico en semilla de caña de azúcar, plátano y mango para exportación, en y la aprobación de su correspondiente patente nacional, en sistemas termosifónico de calentamiento de agua, se pretende montar, evaluar y proponer el uso de esto sistemas en nuestra Institución y en sistemas agropecuarios de la zona Norte (Guzmán *et al*, 1999).

Un sistema termosifónico, es aquel que funciona a partir del movimiento que se genera a partir del calentamiento de la misma a través de la captación de la radiación solar, en un sistema cerrado. Este sistema no utiliza para el movimiento del agua, ningún tipo de energía, sino solamente usa la gravedad, en función de los niveles de los tanques de agua.

## V. Configuración de la instalación

La instalación está compuesta por los módulos colectores solares termosifónico, fuente auxiliar de calentamiento eléctrico y las redes de alimentación y distribución del agua. Se podrán poner en estudio dos tipos básicos de instalación: una con la fuente auxiliar en el interior del tanque termoacumulador (figura 31) y la otra con la fuente auxiliar exterior en la línea de distribución (figura 32) (Despaigne *et al*, 2003; Andersen *et al*, 2007 y Khan, 2010).

Figura 31. Configuración con fuente auxiliar interior.

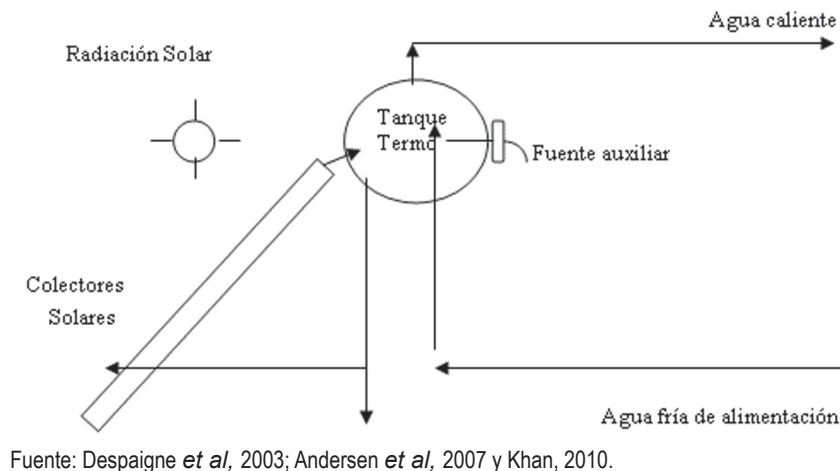
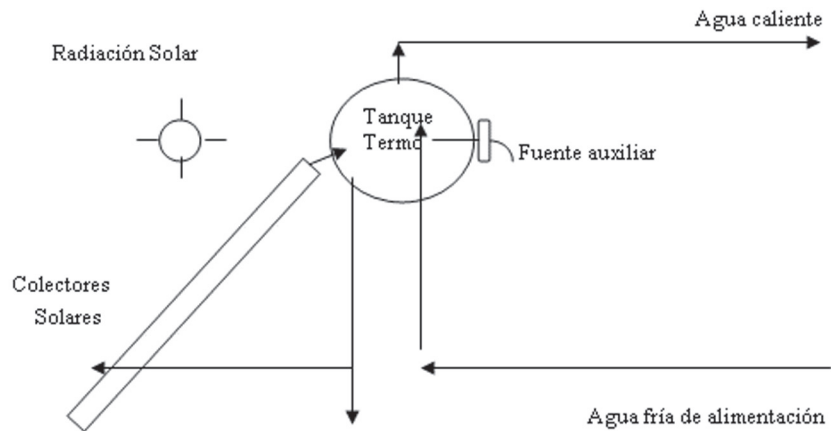


Figura 32. Configuración con fuente auxiliar en la línea de distribución (exterior).



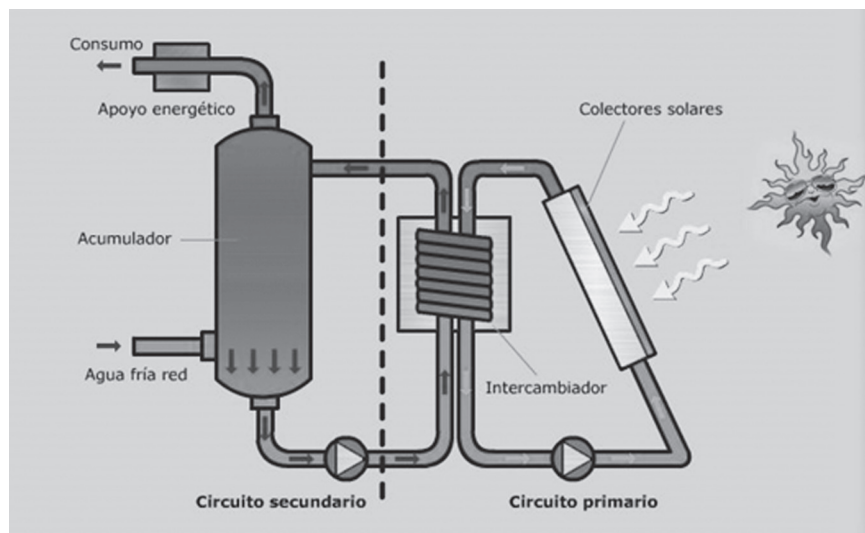
Fuente: Despaigne *et al*, 2003; Andersen *et al*, 2007 y Khan, 2010.

Cualquier de los dos sistemas cumple con los requisitos para el manejo de estos sistemas en función de diferentes usos (Anderson *et al*, 2008; Alvarado 1998).

Sistema de circulación forzada (figuras 33) que están compuesto básicamente de captadores, un acumulador solar, un grupo hidráulico, una regulación y un vaso de expansión y el movimiento del agua se hace a través de una bomba y no por la gravedad, este sistema usa los mismos componentes del termosifón, pero en disposición diferente (Wongsuwan, 2005 y Res & Rue Dissemination, 2005).

Cuando se requiere mayor potencia o el consumo es elevado es necesario instalar un sistema de bombeo a lo cual se le denomina sistema forzado tal como se muestra en la figura 33. Este sistema eléctrico permite fluir el agua a través del circuito.

Figura 33. Esquema simplificado de sistemas forzado con intercambiador de calor.



Fuente: Wongsuwan, 2005 y Res & Rue Dissemination, 2005.



## VI. Ventajas y desventajas de uno u otro sistema

A la hora de elegir un sistema u otro es necesario hacer una comparativa entre las características técnicas y económicas, y entre las ventajas y los inconvenientes:

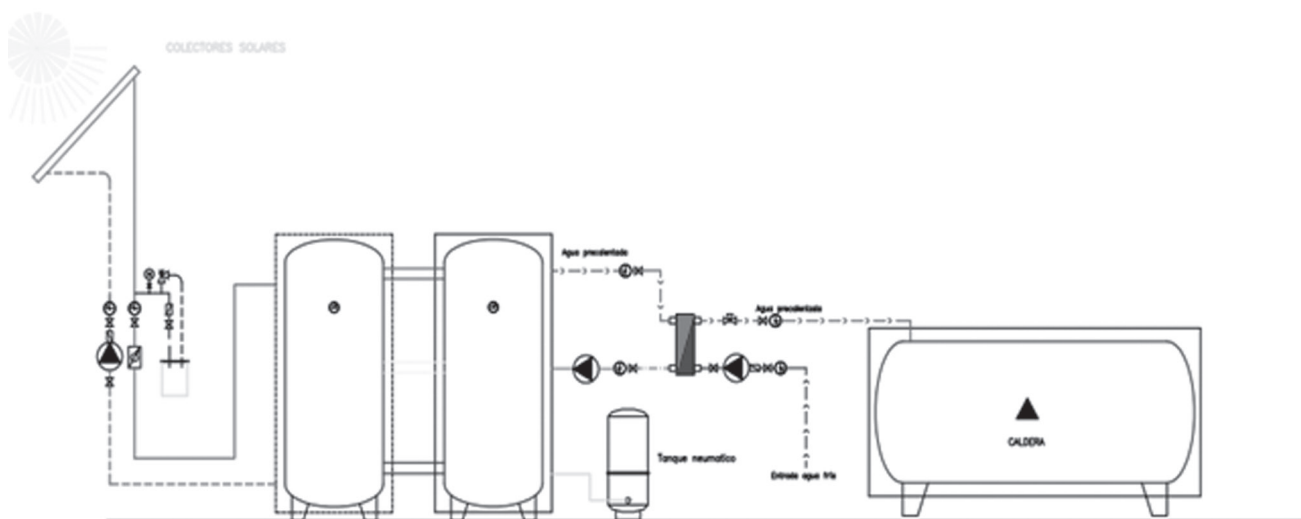
**Ventajas:** Los sistemas por termosifón no requieren potencia eléctrica para el bombeo del agua en el circuito primario. Es una ventaja interesante en zonas aisladas y de alta radiación solar. Los sistemas por termosifón son fáciles de instalar, ya que sólo tienen un circuito. Son económicamente rentables en pequeñas instalaciones.

**Inconvenientes:** No pueden satisfacer necesidades energéticas elevadas. Colocar un depósito muy grande por encima del colector sería inviable y utilizar varios sistemas por termosifón puede salir más caro que utilizar un sistema de bombeo. El termosifón es un sistema que funciona muy bien si es sencillo. No tienen posibilidad de regular la temperatura del depósito. En algún momento pueden alcanzar altas temperaturas que perjudican al sistema, a los materiales, a las personas y a los tratamientos.

El proyectista no solamente debe escoger el tipo de sistema que usará, también tiene que decidir las características de cada subsistema, incluido el anclaje y sujeción de la estructura soporte. Solamente cuando se hayan estudiado las posibles opciones de instalación y se haya decidido el diseño, se empezará con la fase de cálculo de la instalación.

**Algunas ventajas destacables de los sistemas forzados de energía solar:** Rendimiento muy alto, incluso días nublados. Funcionamiento totalmente automático por medio de central electrónica de control y sondas de temperatura. Mayor estética. Sólo los captadores pueden estar en el tejado o en el suelo según el caso. Es un sistema independiente, facilita el montaje e instalación en cualquier superficie. El sistema se puede ampliar para cubrir una mayor demanda. Óptima distribución del ACS y opcionalmente calefacción y climatización de piscinas. Agua caliente de forma continuada sin límite de uso (figura 34).

*Figura 34. Sistema de calentamiento de agua solar forzado, diseño especial para la planta de cosecha animal, con intercambiador de calor y con caldera de bunker.*



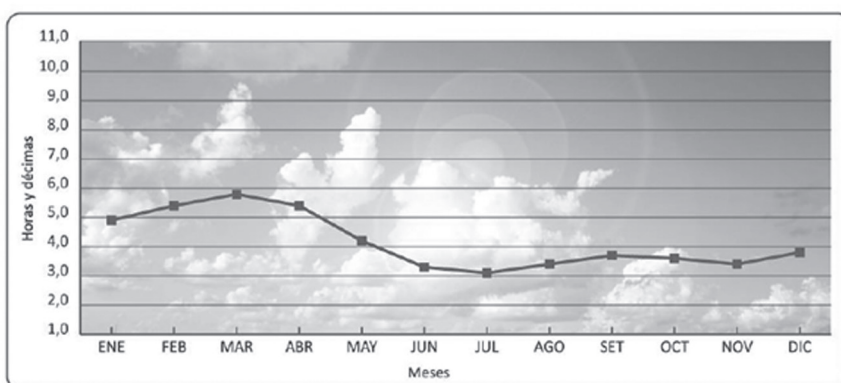
Fuente: Swissol de Costa Rica, 2013, proyectos de energía solar.

Las condiciones climáticas de la Zona Norte, San Carlos (Lat. N: 10°22', Long W: 84°31', 160 msnm), se pueden observar en el cuadro 3.

*Cuadro 3. Datos climáticos de la Zona Norte*

RESUMEN

ZONA NORTE														ANUAL	ESTACIÓN
NUMERO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC			
69528	6,5	7,1	6,9	6,5	4,9	3,6	4,2	4,2	3,6	3,6	3,7	5,3	<b>5,0</b>	Palmira (1973-1983)	
69529	5,6	5,2	5,9	5,8	4,7	3,5	3,3	4,3	4,4	4,0	3,3	3,8	<b>4,4</b>	Boca Arenal (1992-1999)	
69538	5,0	5,8	6,7	6,2	5,1	3,9	2,9	3,5	3,9	4,2	4,1	4,1	<b>4,6</b>	Upala (1984-1995)	
69539	4,1	3,8	3,8	3,1	3,1	2,3	2,4	2,5	2,9	2,3	2,6	3,6	<b>3,1</b>	Río Los Ángeles Cariblanco (1979-1990)	
69579	5,1	5,9	5,9	5,3	4,1	3,3	3,0	3,3	3,7	3,5	3,0	3,8	<b>4,1</b>	Santa Clara (1987-2012)	
69593	6,6	7,7	8,4	7,6	6,1	4,5	3,9	4,3	4,3	5,0	5,4	5,7	<b>5,8</b>	Hacienda Alemania (1980-1995)	
69594	2,8	3,6	4,9	5,0	3,8	2,6	1,8	2,1	2,6	2,8	2,6	2,2	<b>3,1</b>	Finca El Ensayo (1983-1993)	
69629	4,9	5,2	5,4	5,3	3,3	3,5	3,5	3,8	4,7	4,4	3,6	3,6	<b>4,3</b>	La Rebusca (1993-2009)	
69637	3,9	4,9	4,6	4,4	3,4	2,9	3,1	2,8	3,8	3,1	2,6	2,8	<b>3,5</b>	Río Cuarto de Grecia (1998-2011)	
PROM	<b>4,9</b>	<b>5,4</b>	<b>5,8</b>	<b>5,4</b>	<b>4,2</b>	<b>3,3</b>	<b>3,1</b>	<b>3,4</b>	<b>3,7</b>	<b>3,6</b>	<b>3,4</b>	<b>3,8</b>	<b>4,1</b>		

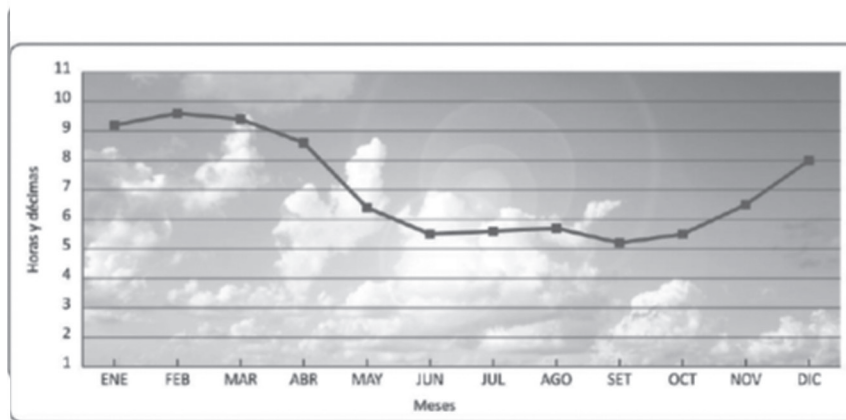


Fuente: IMN, 2013.

Las condiciones climáticas del Pacífico Norte (Guanacaste) y las condiciones de insolación en la zona Pacífico Norte se pueden observar en el cuadro 4.

Cuadro 4. Datos climáticos del Pacífico Norte

RESUMEN														
PACIFICO NORTE														
NUMERO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL	ESTACIÓN
72101	8,7	9,2	8,5	8,1	6,1	4,9	5,8	5,8	4,8	4,9	6,0	7,9	<b>6,7</b>	Nicoya (1971-1983)
74003	9,8	10,0	9,7	8,8	6,8	5,9	5,9	5,9	5,2	6,0	7,4	8,8	<b>7,5</b>	Santa Cruz (1984-1995)
74020	9,6	9,8	9,8	8,9	6,6	5,6	6,0	5,9	5,3	5,5	6,8	8,4	<b>7,4</b>	Libería (1976-2012)
74006	9,1	9,6	9,7	8,6	6,7	5,6	6,0	6,1	5,4	5,7	6,6	8,0	<b>7,3</b>	La Guinea (1985-2007)
76005	8,8	9,3	9,0	8,5	6,0	5,9	4,8	5,3	4,8	5,6	6,2	7,4	<b>6,7</b>	La Pacifica (1971-78; 1991-95)
76041	9,4	9,9	9,8	8,7	6,5	5,5	5,6	5,6	5,3	5,5	6,4	8,1	<b>7,2</b>	Ingenio Taboga (1984-2012)
78003	8,5	8,9	9,1	8,3	6,3	5,3	5,1	5,4	5,3	5,4	5,8	7,4	<b>6,7</b>	Puntarenas (1970-2000)
78008	9,3	9,7	9,4	8,6	6,4	5,1	5,5	5,7	5,1	5,3	6,4	8,1	<b>7,1</b>	Taboga (1971-1984)
PROM	<b>9,2</b>	<b>9,6</b>	<b>9,4</b>	<b>8,6</b>	<b>6,4</b>	<b>5,5</b>	<b>5,6</b>	<b>5,7</b>	<b>5,2</b>	<b>5,5</b>	<b>6,5</b>	<b>8,0</b>	<b>7,1</b>	



Fuente: IMN, 2013.

Con las radiaciones tanto en la zona Huetar Norte como en la Chorotega, estos sistemas de captación de energía solar disponen de la energía suficiente para funcionar perfectamente.

Lo novedoso del estudio en este caso es generar datos que permitan poder utilizar modelos matemáticos de regresión que correlacionen, datos meteorológicos de radiación, iluminación de luz solar directa, difusa, temperaturas mínimas, medias y altas con la captación de energía en el sistema y su uso constante bajo las condiciones climáticas de San Carlos, zona Norte de Costa Rica en unidades de producción agropecuaria.

No se pretende hacer bajo ninguna circunstancia estudios de nuevos materiales ni de nuevos diseños de colectores solares, se pretende usar los sistemas actuales, acondicionarlos a las características especiales de la zona y el tipo de trabajo que se necesita en las distintas unidades, aplicarlo y generar una base de datos y de uso de agua caliente captada en nuestras instalaciones, para incorporar un valor agregado a los sistemas de producción agropecuaria en el uso de energía renovable.

En este trabajo se ha planteado como objetivo del proyecto el cálculo de un sistema solar fotovoltaico y termosifónico de producción de energía eléctrica y de calentamiento de agua sanitaria para uso en sistemas rurales a partir de sistemas ya conocidos y utilizados en el país, pero que deben ser diseñados de acuerdo a las condiciones de cada proceso.

Se han seleccionado fincas lecheras de productores asociados a la Cooperativa Dos Pinos, así como la lechería y la planta de matanza de Sede Regional de San Carlos para iniciar este trabajo. En el caso de TEC, su factura eléctrica es de ¢4,5 a ¢5 millones como promedio mensual, siendo la lechería y la planta de matanza las principales unidades de consumo eléctrico (cuadro 5).

*Cuadro 5. Unidades de producción lecheras seleccionadas hasta el momento ofrecida por la Cooperativa de productores “Dos Pinos”*

Lechería	Uso de agua caliente y uso de sistemas fotovoltaicos	Ubicación
ITCR-SSC Zona Norte	Limpieza de equipos de ordeño, refrigeración y generación de energía	Santa Clara,
William Corrales Zona Norte	Limpieza de equipos de ordeño, refrigeración y generación de energía	Florencia
Otto Rojas Rodríguez Zona Norte	Limpieza de equipos de ordeño, refrigeración y generación de energía	San Carlos
Carlos Freddy Araya Zarcero	Limpieza de equipos de ordeño, refrigeración y generación de energía	Alfaro Ruiz
Jorge E. Blanco	Limpieza de equipos de ordeño, refrigeración y generación de energía	Alfaro Ruiz
Dudey Chavarría Zona Chorotega	Limpieza de equipos de ordeño, refrigeración y generación de energía	Guayabo de Bagaces.
Ronald Nipote Zona Chorotega	Limpieza de equipos de ordeño, refrigeración y generación de energía	Nandayure
Felix Guevara Zona Chorotega	Limpieza de equipos de ordeño, refrigeración y generación de energía	Nicoya

## VII. Conclusiones

A pesar de que en el país se dispone de radiación solar suficiente para el funcionamiento correcto de estos sistemas, tanto para el uso de la solar térmica como la fotovoltaica, la aplicación de estos sistemas aún es insuficiente.

Empresas como la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL) han estado haciendo esfuerzos por la aplicación de los sistemas de captación de energía solar fotovoltaicos, para usos residenciales.

Otras empresas privadas, han ofertado sistemas de captación solar térmicas también en usos residenciales y en algunas industrias.

Ambos sistemas de captación solar son en extremo poco usados en los sistemas de producción agropecuaria y no se dispone de información de la aplicación de ellos, en sistemas de producción animal en nuestro país.

La idea básica de este trabajo es lograr la aplicación de ambos sistemas de captación de energía solar en sistemas de producción agrícola, específicamente en lecherías, plantas de matanza y otras unidades productivas. En este sentido hemos propuesto lograr la aplicación de estos sistemas en dos zonas importantes del país en la zona Huetar Norte y en la zona Chorotega.

## Referencias

Andersen, E. (2008). Investigations on stratification devices for hot water heat stores. International journal of sustainable energy., 32:255-263. Published on line 29 de junio in WileyInterscience.

Alvarado, R. (1998). Boletín Meteorológico números 1, 2y 3. Publicaciones ITCR, San Carlos. Costa Rica.

Berriz, P. L. (2012). La energía solar: base para el desarrollo sostenible. Energía y Tú, Número 58. Abril - Junio de 2012. Cuba.

Bracamonte-Baran Johane Hans y Baritto-Loreto Miguel Leonardo (2013) Análisis de las irreversibilidades en colectores solares de placas planas no isotérmicos para calentamiento de aire utilizando un modelo adimensional. Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XIV (número 2), abril-junio 2013: 237-247. ISSN 1405-7743 FI-UNAM Boletines informativos del IMN. "http://www.imn.ac.cr, 2012 y 2013

Camejo, J. E. (2012). Conectar el sol con la red. Energía y Tú. Número 57. Enero – Marzo. Cuba.

Castro, V. (1987). Radiación Solar Global en Costa Rica. Nota de investigación. IMN, 1987.

CENSOLAR. (1993). Valores medios de irradiación solar sobre suelo horizontal. Primera Edición. España.

Editorial tecnológica de Costa Rica. (1980). Energía solar: fundamentos y aplicaciones. Primer simposio sobre tecnología apropiada.

Guzmán T. J. e Iglesias J. (1986.). Estudio preliminar del diseño, montaje y prueba de una planta de tratamiento hidrotérmico a la semilla agámica de la caña de azúcar. Rev. Proyección. IPROYAZ. p. 15-20. Cuba.

Guzmán T.J. e Iglesias J. (1987). Energía solar para la agroindustria azucarera. Informe técnico. Edición ISP JAE. 1987.

Guzmán, T.J. e Iglesias, J. (1989.). Planta solar para la termoterapia de la semilla agámica de la caña de azúcar. Rev. Energía. pág. 3-7. 1989. Cuba.

Guzmán, T.J. e Iglesias, J. (1987) Evaluación técnico-económica de una planta solar de tratamiento hidrotérmico a la semilla de caña de azúcar. I Conf. Científica de la ATAC en la AC de Cuba.

Guzmán, T.J. e Iglesias, J. (1991). Instalación solar para termoterapia de la semilla de caña de azúcar. Conferencia. Internacional de Arquitectura e Ingeniería. Nueva York. Estados Unidos.

Guzmán, T. J. e Iglesias, J. (1999). Planta solar de hidrotreatmento para el control de enfermedades en cultivos económicos. Memorias del Congreso Costarricense de la Caña de Azúcar. Condovac. Guanacaste. Pag. 250. Costa Rica.

Solartronic (2007). Respuestas a preguntas frecuentes. <http://www.energiasverdes.com/preguntas-frecuentes/cual-es-el-consumo-mundial-de-energia-y-que-cantidad-de-energia-solar-incide-sobre-la-tierra.html>, consultado el día 9 de febrero del 2013.



Cambio climático (S.f.) La ganadería genera más gases efecto invernadero que los automóviles. <http://www.cambio-climatico.com/la-ganaderia-genera-mas-gases-efecto-invernadero-que-automoviles>, consultada el día 14 de marzo del 2013.

Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN).(2013). Datos climáticos.[www.imn.ac.cr](http://www.imn.ac.cr), consultado el día 9 de febrero del 2013.

Insunza, J. (2013). Meteorología descriptiva. Radiación solar y terrestre, [http://www.met.igp.gob.pe/users/yamina/meteorologia/radiacion\\_doc\\_Univ\\_CHile.pdf](http://www.met.igp.gob.pe/users/yamina/meteorologia/radiacion_doc_Univ_CHile.pdf), tomado de internet el día 9 de febrero del 2013.

Wikipedia. (2013) Energía solar térmica. [http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa\\_solar\\_t%C3%A9rmica](http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar_t%C3%A9rmica), consultada el día 9 de febrero del 2013.

Energía solar.mx. (2013). <http://www.energiasolar.mx/energia-solar-termica/como-funciona-calentador-solar-agua.html>. ¿Cómo funciona un calentador solar de agua? Consultada el día 9 de febrero del 2013.

Khan, M.*et al* (2010). Design, fabrication and performance evaluation of natural circulation rectangular box-type solar domestic water system. International journal of sustainable energy.Vol 2, No 3, sep 164-177.

Landa M. (2005). Energía solar en España. El potencial solar de España es el más alto de Europa debido a su privilegiada situación y climatología. [http://www.consumer.es/web/es/medio\\_ambiente/energia\\_y\\_ciencia/2005/01/11/114942.php](http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2005/01/11/114942.php), consultado el día 10 de febrero del 2013.

Lincoln, T. and Zeiger E.(2002).Plant physiology.Chater 7.Photosynthesis.The light reaction.Pag 112-115. USA.

Despaigne H. (2003). Sistema solar termosifónico de calentamiento de agua sanitaria en cayo Las Brujas. Memorias Primera Convención Internacional de Energía y Medio Ambiente. Santiago de Cuba: 13 -17 de noviembre.

Quirós, Ana (2011). Calentando el agua y cuidando el ambiente. <http://www.revistaconstruir.com/construccion-sostenible/836>

RES & RUE DISEMINATION (2005). Energía solar térmica. Proyecto de circulación natural y forzada. <http://www.cesu.es/temas>, CONSULTADO EL DIA 10 DE FEBRERO DEL 2013

Rizk, J. and Nagrial, M.H. (2008). Impact of reflectors on solar energy. Proceedings of the world academy of Science. Engineering and Technology.Vol 31, July.

Roldán, C. (2008). Determinación del potencial de producción de energía limpia del ITCR. Programa de Investigación Interinstitucional. VIE. 2008. Costa Rica.

Roman Harry T. (2007). Here comes the sun. Residential solar systems.Powerenergy. [www.techdirecciones.com](http://www.techdirecciones.com).Tomado de internet el dia 10 de febrero del 2013.

Shyan, S N. (1996). La energía solar y su utilización. Proyecto de Investigación desarrollados en el departamento de Física de la Universidad Nacional. Heredia. Costa Rica.

ShyamS.N.(2005). Energía solar. Conceptos básicos y su utilización. Departamento de Física de la Universidad Nacional. Heredia. Costa Rica.2005. Mimacsolar.es. (2013). Sistema por termosifón. [http://www.mimacsolar.es/equipos\\_forzados.html](http://www.mimacsolar.es/equipos_forzados.html), consultado el día 9 de febrero del 2013.

Swift K.D. (2011). Is a solar energy system right for your organization?.Rev. ManagementAccounting-Quarterly.Vol. 12, No 4.

Swilssol SA, (2013). Cotización sistemas solares termosifónicos y forzados.Páginasverdes. Costa Rica.

Sopian, K. (2007). Unglazed fiber glass reinforced polyester solar water heater whit integrtated storage system.International journal of sustainableenergy. 10.1061/ (ASCE) 0733-9402, 133; 1 (26)

Tinajeros, S. M. (2011). Sistema de calentamiento de agua con energía solar en la ciudad de Arequipa. XVIII Simposio Peruano de energía solar y del ambiente. Universidad Nacional de San Agustín. Escuela de Física, Perú.

TorpeyElka María. (2009). You are a What?.Solar Photovoltaicinstaller. Occupational Outlook Quarterly.Bureau of labor.

Uribe Mejias C. M. ( 2007). Cambio del sistema de calentamiento de agua empleando calderas por paneles y otros procesos. Rev. Producción más limpia, julio-diciembre Vol2 , No 2.

UPC (1999). Sistema de calentamiento con energía solar. <http://melca.com.ar/archivos/apuntes/Sistemas%20solares%20termicos%20de%20baja%20temperatura/FI00701C.pdf>. Tomado de internet el día 9 de febrero el 2013

Wongsuwam, W. (2005).Forced circulation solar water heater performance prediction by TRNSYS ANN. International journal of sustainable energy, vol 24, No 2, 69-86.

# Análisis preliminar de la variación espacio-temporal de isótopos estables en aguas meteóricas y subterráneas de Costa Rica

*Ricardo Sánchez-Murillo, Ph.D.<sup>15</sup>  
M.Sc. Germain Esquivel-Hernández,  
Bach. Leonardo Corrales-Salazar,  
Bach. Oscar Sáenz-Rosales*

## Resumen

La ubicación geográfica y la orografía de Costa Rica se combinan en una serie de microclimas montañosos sustentados por flujos de humedad provenientes tanto del Mar Caribe como del Océano Pacífico. Estos microclimas ofrecen una oportunidad excepcional para el estudio de variaciones isotópicas en precipitación en un escenario tropical. Los principales objetivos del presente estudio son a) determinar la variación espacio-temporal en la composición isotópica en aguas meteóricas, b) identificar los factores principales que controlan las variaciones isotópicas. La red de monitoreo está compuesta por 18 sitios de muestreo (12 semanales, 6 diarios) en la costa Pacífica, la vertiente del Caribe, las llanuras de la zona norte, la deriva continental y el Valle Central. En total, 468 muestras se analizaron durante 2013 y 2014. En general, durante la época seca las lluvias están correlacionadas con eventos de precipitación enriquecidos. El inicio de la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ) sobre Costa Rica produce una notable disminución de la velocidad de los vientos, un aumento en el volumen de precipitación y una disminución significativa en la composición de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ . El desplazamiento norte de la ITCZ resulta en una alta variabilidad en los valores isotópicos durante la época lluviosa, especialmente durante Setiembre y Octubre. Las trayectorias de las masas de aire simuladas con el modelo HYSPLIT sugieren: a) una combinación de fuentes de humedad (Pacífico versus Caribe) durante la época lluviosa, representado en la composición histórica en aguas subterráneas del Valle Central, b) eventos enriquecidos con un origen principalmente del Caribe. Las variaciones diarias de  $\delta^{18}\text{O}$  en Heredia durante el 2013 fueron simuladas con un modelo de regresión lineal ( $r^2=0.52$ ) que incluye precipitación, humedad relativa y las alturas de la zona de mezcla y masa de aire. La información generada conformará la línea base para futuros estudios hidrológicos, además de mejorar el estado del conocimiento respecto a los factores que controlan las variaciones isotópicas en zonas tropicales y reforzará la red de monitoreo por parte del Grupo de Investigación en Isótopos Estables de la Universidad Nacional. Asimismo, el muestreo isotópico permitirá la interpretación de archivos paleo-climáticos y la calibración/validación de modelos de circulación regional y global.

**Palabras claves:** Costa Rica; composición isotópica; precipitación; microclimas; HYSPLIT.

<sup>15</sup> Escuela de Química, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, P.O. Box 86-300.

## Preliminar analysis of the spatio-temporal variation of stable isotopes of precipitation and ground-water in Costa Rica

### Abstract

The geographic location and orographic setting of Costa Rica provide unique mountainous microclimate systems across the country, receiving moisture inputs from the Caribbean Sea and the Pacific Ocean. These microclimate systems offer an exceptional opportunity to study isotopic variations in precipitation in a tropical setting. The main objectives of this project are to a) determine spatial and temporal isotopic variations of meteoric waters and b) to identify main factors controlling isotopic variations. The precipitation network is composed of 18 sampling sites (12 weekly and 6 daily) within the Pacific Coast, Caribbean slope, northern lowlands, continental divide, and Central Valley. In total, 468 samples were analyzed during 2013-2014. During the dry months, rainfall events are mostly related to small enriched events. By mid-May, the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) poses over Costa Rica resulting in a notable wind speed decrease, an increase in rainfall amounts, and a significant depletion in  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^2\text{H}$  ratios. Northward shifting of the ITCZ produces high isotope variability within the wet season, especially during September and October. HYSPLIT air masses trajectories indicated: a) combination of moisture sources (Caribbean Sea and Pacific Ocean) during the wet season, which is depicted in historic isotope ratios in groundwater of the Central Valley, b) small rainfall events with a south Caribbean parental origin. A lineal regression model ( $r^2=0.52$ ) involving precipitation, relative humidity, terrain height, and mix depth was able to predict daily  $\delta^{18}\text{O}$  ratios in Heredia during 2013. This project will build on the initial effort undertaken by the National University Stable Isotope Research Group (UNA-SIL) of establishing a monitoring network in Costa Rica as well as providing valuable baseline data for future water resources research and improving the understanding of factors controlling isotopic variations in mountainous tropical regions. In addition, this project will provide current isotope data to improve interpretation of paleoclimatic archives in the region and advance ongoing calibration and validation efforts of regional and global circulation models.

**Keywords:** Costa Rica; isotopic composition; precipitation; microclimates; HYSPLIT.

### I. Introducción

Numerosos estudios han reconocido que la intensificación de eventos climatológicos extremos (i.e. prolongadas sequías o ciclones tropicales) podrían aumentar la vulnerabilidad hidrológica de la región centroamericana (IPCC, 2007; Gutowski *et al.*, 2008; Min *et al.*, 2011; Zhou *et al.*, 2011; Hidalgo *et al.*, 2012). Cambios en el balance hidrológico o térmico podrían colapsar la conectividad de ecosistemas tropicales (Colwell *et al.*, 2008; Tewksbury *et al.*, 2008; Laorie *et al.*, 2009) y, consecuentemente, impactar las actividades económicas y socio-culturales de las comunidades que se benefician de diversos servicios ambientales. En Centroamérica, la agricultura, el turismo, el abastecimiento de agua potable y la generación de energía hidroeléctrica, dependen del ciclo estacional de la precipitación, por lo tanto, es imperativo evaluar los patrones de precipitación y los fenómenos físicos que determinan su distribución espacio-temporal (Magaña *et al.*, 1999). Por ejemplo, en el Valle Central de Costa Rica durante las épocas secas de 2013 y 2014, se presentó una disminución en el caudal de las fuentes de agua superficial entre 11% y 65% (AYA, 2014).

El análisis de la composición isotópica en aguas meteóricas tropicales ha demostrado ser un importante indicador de la variabilidad climática (Vuille *et al.*, 2000 a,b, 2003; Johnson y Ingram, 2004; Cobb *et al.*, 2007; Lachniet, 2009; Lachniet y Paterson, 2009; Ishizaki *et al.*, 2012). En particular, los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  han proporcionado nuevos conocimientos sobre la dinámica de El Niño/Oscilación del Sur (Vuille y Werner, 2005; Ichinayagi y Yamanaka, 2005; Panarello y Dapena, 2009; Lachniet, 2009). En las regiones templadas, las variaciones isotópicas de la precipitación se han correlacionado con la

temperatura superficial media del aire en superficie (Dansgaard, 1964; Rosanski *et al*, 1993; Araguás-Araguás *et al*, 2000; Bowen, 2008; Wassenaar *et al*, 2011; Aggarwal *et al*, 2012), mientras que en las zonas tropicales, varios autores han reportado “el efecto de cantidad” como el principal factor de control (Rosanski *et al*, 1993; Lachniet y Paterson, 2002; Bowen y Revenaugh, 2003; Vuille *et al.*, 2003).

A pesar de los avances tecnológicos orientados hacia el mejoramiento del análisis isotópico a escala global (i.e. espectroscopía láser, sensores remotos), existe un consenso respecto a la necesidad urgente de establecer redes de muestreo a largo plazo, especialmente en las regiones tropicales montañosas, donde los efectos orográficos, el reciclaje de la humedad, la interceptación en el dosel de los bosques, la evapotranspiración y los microclimas son factores primordiales en la variación isotópica (Lachniet y Paterson, 2009). Por otra parte, estudios recientes han demostrado que las variaciones en la composición de isótopos estables de las precipitaciones se producen a escalas temporales menores (i.e. variación intra e inter tormentas) (Celle-Jeanton *et al*, 2004; Coplen *et al*, 2008; Barras y Simmonds 2009; Munskgaard *et al*, 2012), reforzando la importancia del muestreo de alta frecuencia.

La investigación sobre la composición isotópica y la dinámica de las precipitaciones en Costa Rica hasta la fecha ha sido limitada. Lachniet y Paterson (2002) proporcionan una evaluación preliminar de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  en las aguas superficiales de Costa Rica ( $n = 63$  entre ríos y lagos). Su estudio determinó las tendencias regionales en la composición isotópica inversamente correlacionada con la altitud ( $-1,4 \delta^{18}\text{O} \text{‰/km}$ ) y el enriquecimiento de la evaporación, sobre todo en la región del noroeste. Rhodes *et al.* (2006) estudió la variación estacional de la composición isotópica en los bosques de la Reserva Biológica Monteverde, que se encuentra en la divisoria continental. Basados en el exceso de deuterio, con base en las variaciones estacionales, los autores concluyeron la recirculación de evaporación secundaria es un componente importante del balance hídrico durante las estaciones de transición y seca. Reynolds y Fraile (2009) realizaron un estudio de la recarga del sistema Barva-Colima, que sirven como una fuente de agua a cerca del 20% de la población del país. Con base en la cantidad de precipitación, así como en los registros de manantiales, fueron capaces de identificar las áreas de recarga locales, principalmente dominadas por las tormentas originadas en el Pacífico. Sánchez-Murillo *et al.* (2013) realizó un análisis de datos isotópicos históricos en precipitación de Costa Rica utilizando la base de datos GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation, IAEA, 2006). En dicho estudio se determinó la línea meteórica para Costa Rica:  $\delta^2\text{H} = 7.61 \cdot \delta^{18}\text{O} + 7.40$ ;  $r^2 = 0.98$ ). Además, Sánchez-Murillo *et al.* (2013) determinó un efecto de cantidad correspondiente a  $-1.6\text{‰} \delta^{18}\text{O}/100 \text{ mm}$  de precipitación ( $r^2 = 0.57$ ) y un efecto orográfico de  $-2\text{‰} \delta^{18}\text{O}/\text{km}$  de elevación.

A pesar de los esfuerzos anteriores, existe la necesidad de realizar un análisis espacio-temporal de la composición isotópica de la precipitación en Costa Rica que permita una mejor comprensión de las variaciones isotópicas en regiones tropicales que comparten condiciones similares en su orografía, clima y cobertura vegetal. Los principales objetivos del presente estudio son a) determinar la variación espacio-temporal en la composición isotópica en aguas meteóricas de Costa Rica, b) identificar los factores principales que controlan las variaciones isotópicas. La información generada conformará la línea base para futuros estudios hidrológicos, además de mejorar el estado del conocimiento respecto a los factores que controlan las variaciones isotópicas en zonas tropicales y reforzará la red de monitoreo por parte del Grupo de Investigación en Isótopos Estables de la Universidad Nacional. Asimismo, el muestreo isotópico permitirá la interpretación de archivos paleo-climáticos y la calibración/validación de modelos de circulación regional y global.



## II. Área de estudio

### *Singularidades de climáticas de Costa Rica*

El clima de Costa Rica está controlado principalmente por cuatro fenómenos: la presencia de vientos del noreste (alisios), los desplazamientos de la Zona de Convergencia Intertropical (ITZC), intrusiones de aire continental frío y la influencia indirecta de los ciclones del Caribe (Wayden *et al.*, 1996.). Estos procesos de circulación producen tres estaciones distintas. La temporada de lluvias (Mayo-Octubre) corresponde con el momento en que la ITCZ se desplaza sobre Costa Rica y la precipitación se caracteriza por las tormentas fuertes de convección. Las estaciones de transición (Noviembre-Diciembre) y seca (Enero-Abril) comprenden los meses cuando la ITCZ se encuentra al sur de Costa Rica (Guswa *et al.*, 2007). Durante la estación húmeda, las masas de aire que llegan a Costa Rica se pueden clasificar como vientos continentales, alcanzando el Valle Central de Costa Rica desde el Océano Pacífico. La mayoría de estas masas de aire viajan a lo largo de las zonas industriales y urbanas del país. En la estación seca, los vientos alisios traen masas de aire a Costa Rica desde el Mar Caribe, y su transporte se produce a lo largo de las áreas no industrializadas y menos pobladas. Las masas de aire que llegan a través de Costa Rica durante la temporada de transición pueden ser transportadas por el viento de origen continental o los vientos alisios. Debido al patrón de transporte de masas de aire observado en Costa Rica durante todo el año, se espera que la composición isotópica de las precipitaciones en Costa Rica varía en función de su origen en el Mar Caribe y el Océano Pacífico, y también en la trayectoria del aire en todo el país (es decir, las zonas industriales y urbanas en comparación con las zonas de remotas). La precipitación anual varía de ~ 1,500 mm en el noroeste y la Península de Nicoya hasta ~ 7.000 mm, en el lado del Caribe y en la cordillera de Talamanca. En general, la estacionalidad de la temperatura es baja. La temperatura media anual en las tierras bajas costeras es de alrededor de 27 ° C, 20 ° C en el Valle Central, y por debajo de 10 ° C en las cumbres de la cordillera más alta (~ 4000 msnm).

### *Sitios de muestreo*

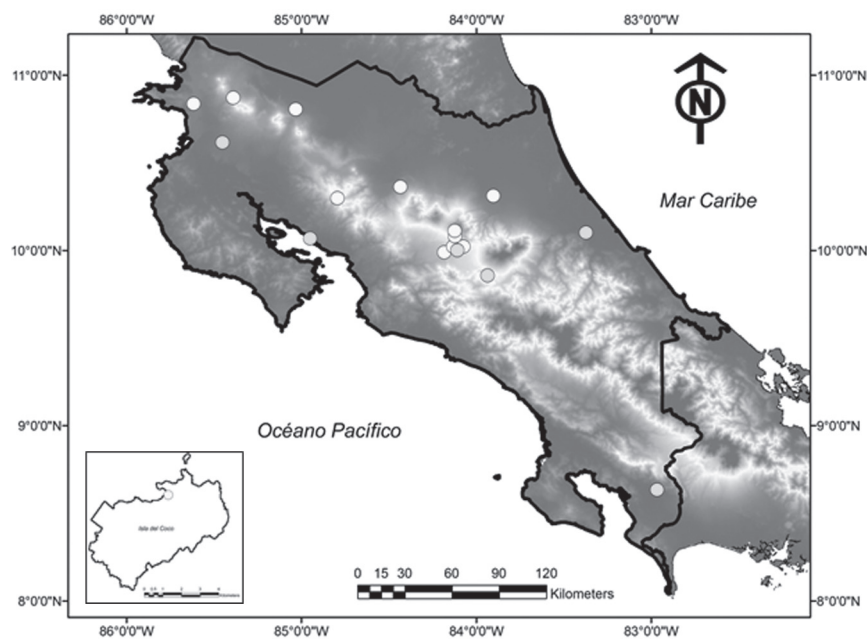
El cuadro 6 presenta los puntos de muestreo coordenadas geográficas (grados/decimales), elevación (m.s.n.m.), frecuencia de muestreo y año de instalación. El muestreo consistió en muestras diarias (6 sitios) y semanales (12 sitios) en la zona continental y marítima (Isla del Coco) de Costa Rica (figura 35). La frecuencia de muestreo se determinó en función de la lejanía y la accesibilidad de las estaciones durante los meses críticos de la temporada de lluvias, los patrones de circulación atmosférica, las fuentes de las tormentas y el rango de altitud. Los muestreos diarios se realizaron en: Heredia, Cartago, 28 Millas (Batán, Limón), Punta Morales, Liberia y Ciudad Neily.

## Recolección, preparación y análisis de muestras isotópicas

Cuadro 6. Descripción de los sitios de muestreo incluyendo coordenadas geográficas (grados/decimales), elevación (m.s.n.m.), frecuencia de muestreo y año de instalación.

Sitio	Latitud [ded.deg]	Longitud [ded.deg]	Elevación [m.a.s.l]	Frecuencia	Año de instalación
Punta Morales	10.0674	-84.9519	0	Diaria	2014
28 Millas	10.1017	-83.3730	18	Diaria	2013
Ciudad Neily	8.6322	-82.9665	33	Diaria	2014
Liberia	10.6167	-85.4530	136	Diaria	2014
Heredia	10.0004	-84.1091	1173	Diaria	2013
Cartago	9.8564	-83.9362	1404	Diaria	2014
Isla del Coco	5.5444	-87.0565	9	Semanal	2014
Río Frío	10.3121	-83.9031	83	Semanal	2013
Upala	10.8047	-85.0337	131	Semanal	2014
Santa Rosa	10.8368	-85.6175	289	Semanal	2014
Ciudad Quesada	10.3623	-84.4345	557	Semanal	2014
San Cristóbal	10.8716	-85.3916	677	Semanal	2014
Belén	9.9888	10.0215	968	Semanal	2013
San Rafael	10.0215	-84.1326	1128	Semanal	2013
Monteverde	10.2972	-84.7956	1400	Semanal	2014
San Isidro	10.0215	-84.0739	1434	Semanal	2013
Cipresal	10.0806	-84.1217	1744	Semanal	2013
Sacramento	10.1113	-84.1236	2305	Semanal	2013

Figura 35. Ubicación de puntos de muestreo. El recuadro presenta el punto de muestreo en la Isla del Coco. Los círculos oscuros denotan los sitios de muestreo diarios; los círculos grises representan los sitios de muestreo semanal.



La precipitación se recolectó en muestreadores pasivos compuestos de recipientes de polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés) de 4 L (muestreo semanal) y 1 L (muestreo diario). Los recipientes se acoplaron a un embudo (diámetro = 7.5 cm – 10.0 cm). Los embudos contenían una malla de cedazo para prevenir contaminación (i.e. insectos, material vegetal). En los puntos de muestreo de Heredia y Cartago se instalaron dos muestreadores pasivos (Palmex Ltd., Croatia). Aproximadamente 2 cm de aceite mineral (RIGORAN, Costa Rica) fueron añadidos para prevenir el fraccionamiento de la muestra según los protocolos de muestreo estándar (IAEA, 1998). Las fases de agua y aceite mineral se extrajeron mediante embudos de separación de 250-500 mL según la cantidad colectada. Las muestras se almacenaron en viales de plásticos y vidrio entre 10 – 30 mL. Los viales se sellaron con papel parafina y se mantuvieron de manera invertida bajo refrigeración (5 °C) hasta su análisis.

El análisis de isótopos estables se realizó en las instalaciones del Grupo de Investigación en Isótopos Estables de la Escuela de Química de la Universidad Nacional (Heredia, Costa Rica) utilizando un analizador de espectroscopía láser (Cavity Ring-Down Spectroscopy) (L2120-i, Picarro, CA), siguiendo los métodos descritos por Lis *et al.* 2008. Los estándares secundarios se calibraron previamente respecto a la escala internacional VSMOW2-SLAP2. Los valores de los estándares secundarios fueron: MTW ( $\delta^2\text{H} = -131.41\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -16.96\text{‰}$ ), DOW ( $\delta^2\text{H} = -1.17\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -0.22\text{‰}$ ) y CAS ( $\delta^2\text{H} = -7.77\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -63.02\text{‰}$ ). Los estándares MTW y DOW se usaron para normalizar los resultados a la escala VSMOW2-SLAP2 mientras que CAS se empleó como estándar de control de calidad (i.e. desviación instrumental durante el análisis). La precisión de laboratorio fue de  $\pm 0.5\text{‰}$  ( $1\sigma$ ) para  $\delta^2\text{H}$ ,  $\pm 0.1\text{‰}$  ( $1\sigma$ ) para  $\delta^{18}\text{O}$  y  $0.6\text{‰}$  ( $1\sigma$ ) para el exceso de deuterio.

### *Simulación de las trayectorias de masas de aire: modelo HYSPLIT*

El modelo atmosférico HYSPLIT (<https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>) (Draxler y Rolph, 2012) se utilizó para determinar el origen de cada evento de precipitación en el punto de muestreo de alta frecuencia ubicado en Heredia. El detalle de los principales parámetros seleccionados se presenta en el cuadro 7. En total se determinaron 46 trayectorias entre 20 de Marzo – 9 de Noviembre de 2013. Se realizó una matriz de correlación entre la composición isotópica y las siguientes variables meteorológicas obtenidas con el modelo HYSPLIT: intensidad (mm/h), temperatura ambiental y potencial (Kelvin), altura de zona de mezcla (m), radiación solar ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) y porcentaje de humedad (cuadro 8). Además, se incluyó en el análisis la cantidad de precipitación (mm) registrada en el sitio de muestreo con una estación modelo RGR126 (Oregon Scientific Inc., USA). Con base en la matriz de correlación se seleccionaron cuatro variables (precipitación, humedad relativa, alturas de la zona de mezcla y masa de aire) para predecir la composición de  $\delta^{18}\text{O}$  mediante un análisis de regresión múltiple lineal. El análisis estadístico se generó con el software SigmaPlot 11.0 (Systat Software Inc., USA).

*Cuadro 7. Parámetros seleccionados en el modelo HYSPLIT para la determinación de las trayectorias de las masas de aire en los eventos diarios colectados en Heredia durante el 2013.*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>
Tipo de trayectoria	Normal
Base de datos meteorológicos	GDAS (2006-presente) Global data assimilation system
Dirección de la trayectoria	Backward
Movimiento vertical	Model vertical velocity
Tiempo total	72 hrs
Altura inicial de	1000 m.a.s.l.

Cuadro 8. Matriz de correlación Pearson entre la composición isotópica y variables meteorológicas.

Variable	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	P [mm]	d-excess	Terrain height [m]	Pressure [m]	P. Temp [K]	A. Temp [K]	Intensity [mm/hr]	Mix depth [m]	RH [%]	Terrain height [m]	R [W/m <sup>2</sup> ]
$\delta^{18}\text{O}$	1.00												
$\delta^2\text{H}$	0.99	1.00											
P [mm]	<b>-0.45</b>	-0.45	1.00										
d-excess	0.43	0.57	-0.25	1.00									
Terrain height [m]	<b>-0.53</b>	-0.54	0.26	-0.32	1.00								
Pressure [m]	0.54	0.53	-0.31	0.19	-0.92	1.00							
P. Temp [K]	-0.51	-0.47	0.41	-0.05	0.65	-0.83	1.00						
A. Temp [K]	0.50	0.49	-0.22	0.24	-0.93	0.96	-0.65	1.00					
Intensity [mm/hr]	-0.30	-0.28	0.31	-0.05	-0.19	-0.03	0.19	0.03	1.00				
Mix depth [m]	<b>0.35</b>	0.30	-0.37	-0.07	0.12	0.16	-0.40	0.04	-0.55	1.00			
RH [%]	<b>-0.40</b>	-0.39	0.11	-0.13	0.37	-0.38	0.22	-0.42	0.30	-0.01	1.00		
Terrain height [m]	0.20	0.26	-0.03	0.41	-0.58	0.21	0.10	0.33	0.55	-0.61	-0.13	1.00	
R [W/m <sup>2</sup> ]	0.25	0.22	-0.19	-0.01	0.17	0.08	-0.19	0.04	-0.81	0.62	-0.14	-0.59	1.00

### III. Resultados y discusión

#### *Composición isotópica diaria*

La figura 36 muestra las líneas meteóricas para los muestreos diarios durante 2013 y 2014. En el caso de los sitios de muestreo en la costa pacífica (Liberia, Punta Morales, Ciudad Neily), es notable el efecto de recirculación de evaporación secundaria en la zona de Liberia, representado por una pendiente e intercepto menores a la línea meteórica global (GMWL:  $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10 \text{‰}$ ); mientras que en Punta Morales la línea meteórica local (LML) representa condiciones de equilibrio por su cercanía al océano ( $\delta^2\text{H} = 7.90\delta^{18}\text{O} + 9.70 \text{‰}$ ). En Ciudad Neily, la cercanía de la Cordillera de Talamanca favorece la recirculación de evapotranspiración resultando en excesos de deuterio (d-excess =  $-1.84\text{‰}$ ) generalmente mayores a  $10 \text{‰}$  (figura 37). En 28 Millas (vertiente Caribe), la composición isotópica difiere notoriamente, presentando valores enriquecidos promedio de  $-1.84\text{‰}$   $\delta^{18}\text{O}$  y  $-4.38\text{‰}$   $\delta^2\text{H}$  (figuras 36 y 37). A diferencia del Valle Central (Heredia y Cartago) y la costa Pacífica (Liberia, Punta Morales, Ciudad Neily), la composición isotópica en la vertiente del Caribe muestra un comportamiento estable, sin perturbaciones negativas como consecuencia del aumento en la cantidad de precipitación al inicio de la época lluviosa (figura 37). En general, la influencia de la ITCZ sobre Costa Rica se traduce en un descenso marcado en la composición isotópica, principalmente en el Valle Central. El desplazamiento hacia el norte de la ITZC produce eventos enriquecidos durante la época del 'veranillo'. Durante el segundo período de la época lluviosa (Setiembre-Octubre), la composición isotópica es altamente variable como se muestra en las figuras 37 (Heredia y Cartago) y 39 (zona intermontañosa de Heredia).



Figura 36. Líneas meteóricas locales para los puntos diarios de muestreo hasta Junio 2014.

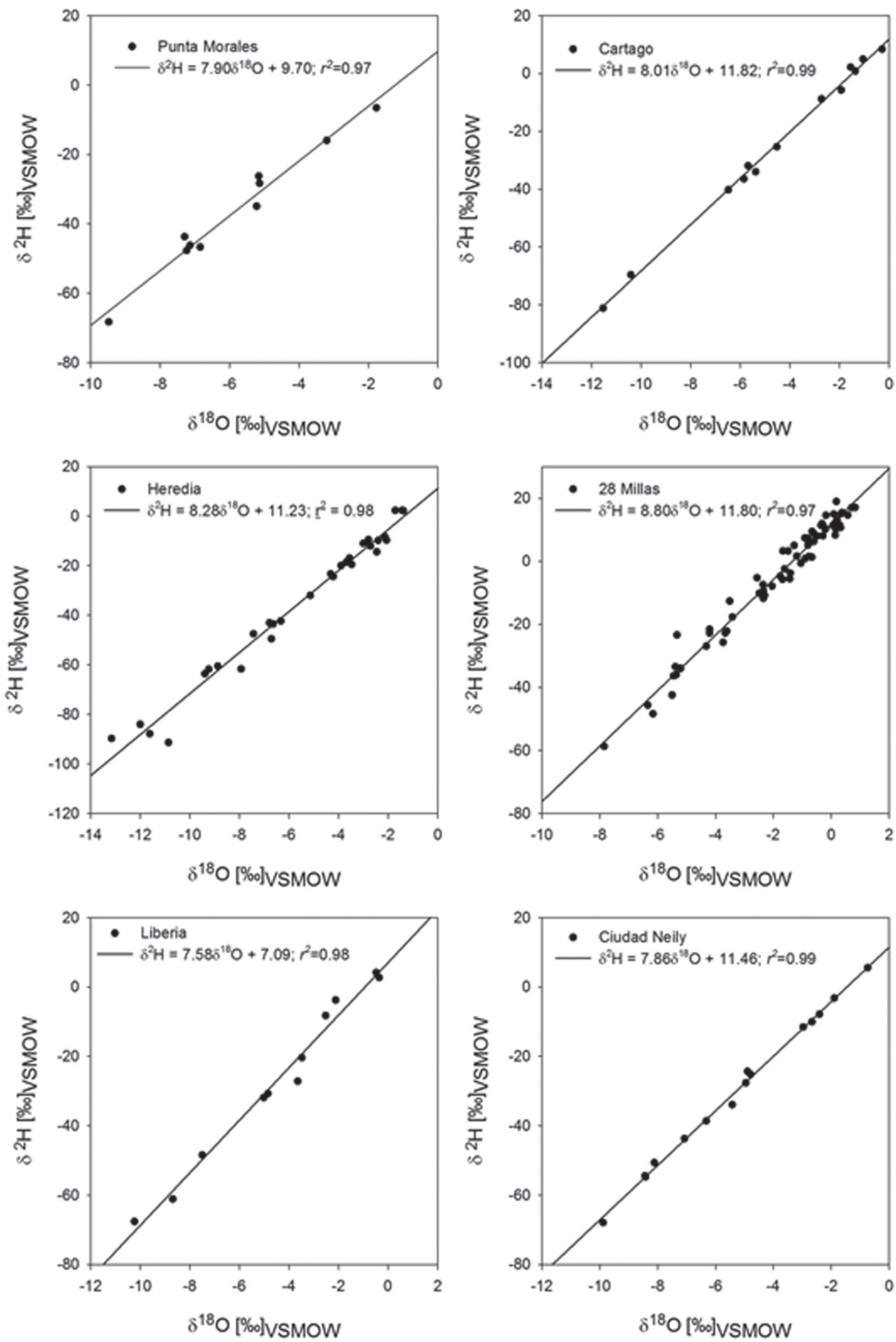
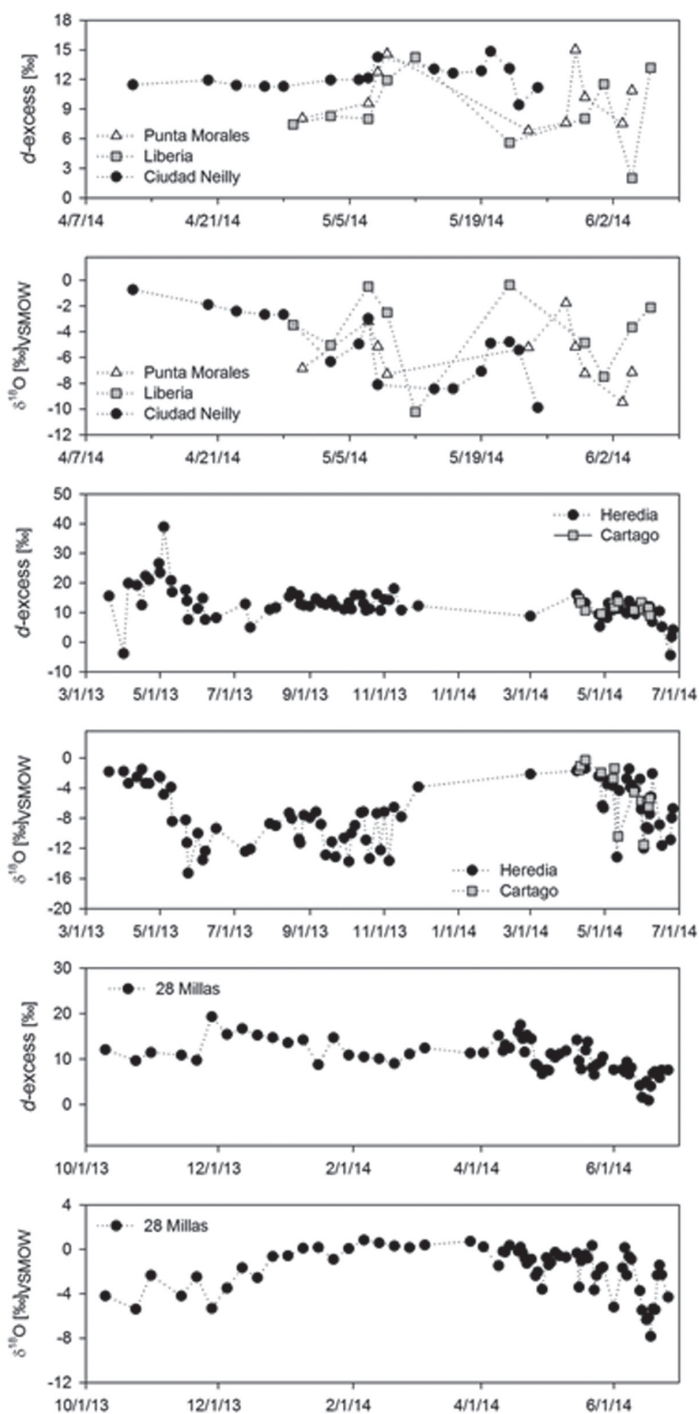


Figura 37. Variación temporal en la composición de  $\delta^{18}\text{O}$  (‰) y exceso de deuterio (*d*-excess, ‰) para los puntos de muestreos diarios hasta Junio de 2014.



### Composición isotópica semanal

La composición isotópica semanal en la región intermontañosa de Heredia (transepto desde Belén, 968 m.s.n.m. hasta Sacramento 2303 m.s.n.m.) (figuras 38 y 39) presenta un patrón similar al observado en los muestreos diarios en Heredia y Cartago, es decir, valores enriquecidos durante la época seca, disminución marcada al inicio de la época lluviosa y alta variabilidad durante los meses de Setiembre y Octubre. Sin embargo, el aporte de evapotranspiración local es mayor, el cual se encuentra

representado en los mayores interceptos (14 – 18) de las LML, principalmente en San Rafael, Cipresal y Sacramento. Similar fenómeno se presenta en la Reserva Biológica Monteverde (figura 38). En la zona de San Isidro de Heredia, la mayor incorporación de masas de aire del Caribe resulta es una disminución en la pendiente e intercepto de la LML ( $\delta^2\text{H} = 7.76\delta^{18}\text{O} + 11.49$ ). La composición isotópica en Río Frío presenta un patrón similar a 28 Millas, con muestras principalmente enriquecidas ( $> -4$  ‰). En la zona Norte (Upala y Ciudad Quesada), las LML presentan condiciones de mayor equilibrio con pendientes e interceptos cercanos a 8 y 10, respectivamente.

Figura 38. Líneas meteóricas locales para los puntos semanales de muestreo hasta Junio 2014.

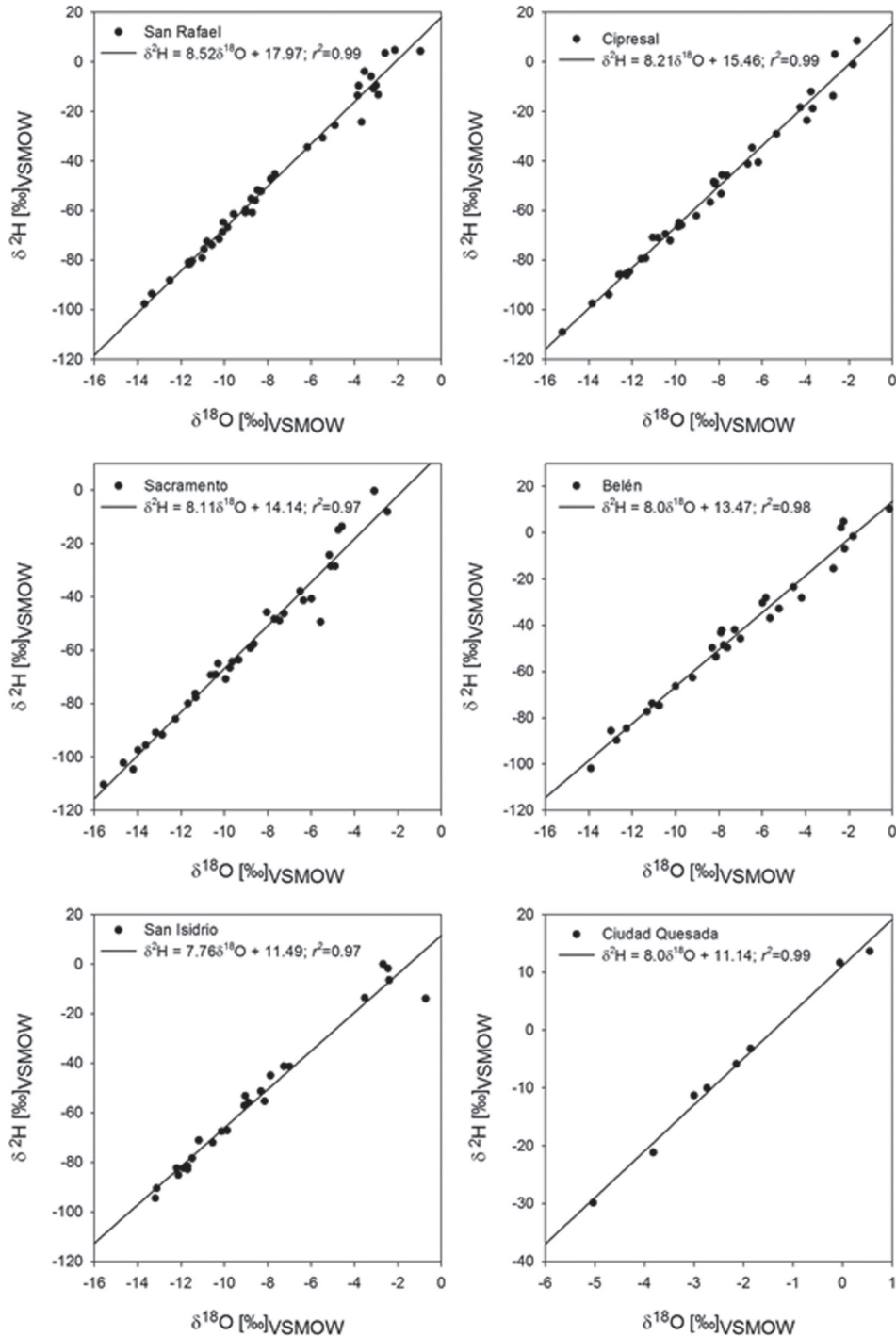


Figura 38 (continuación)

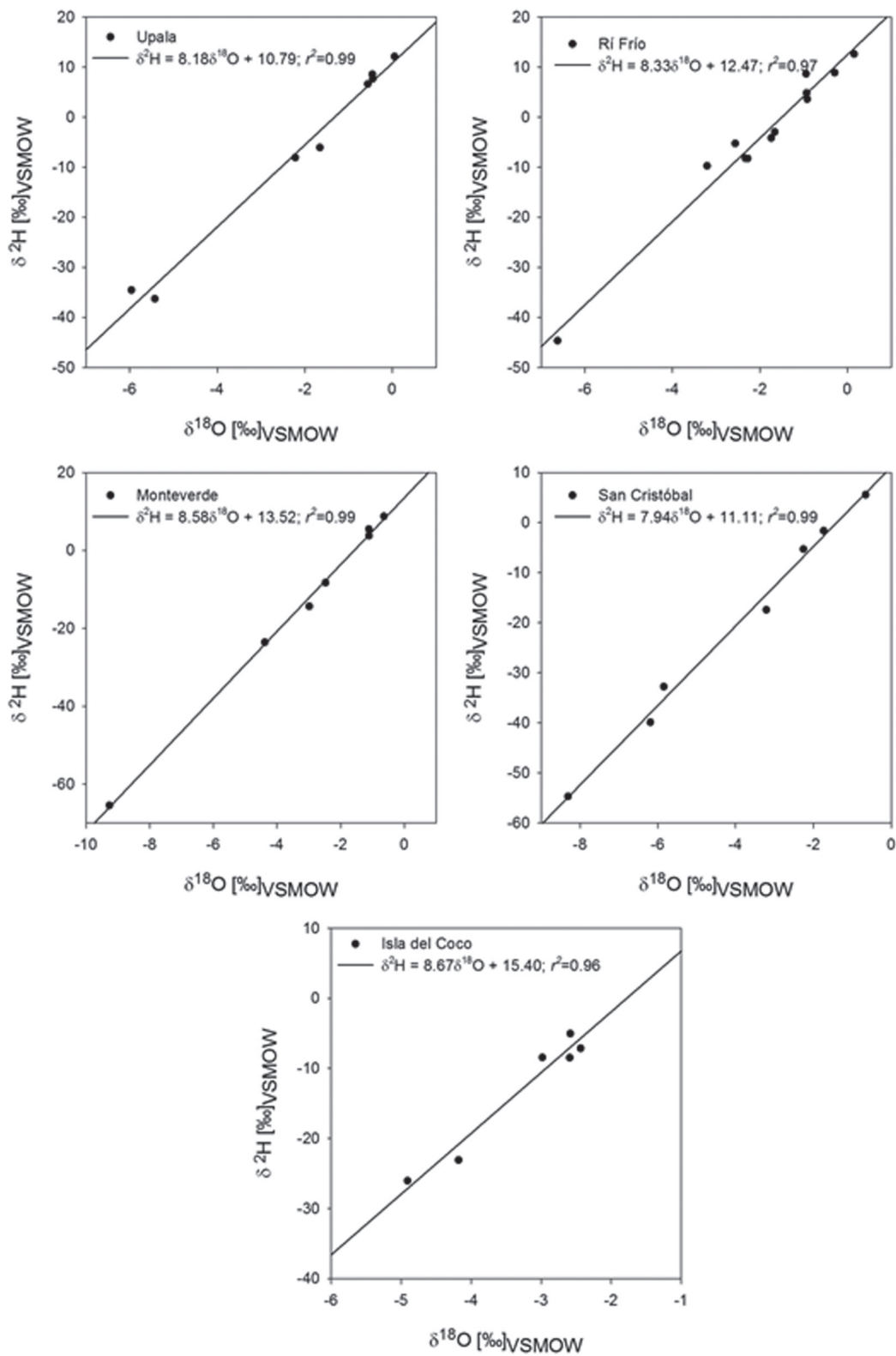
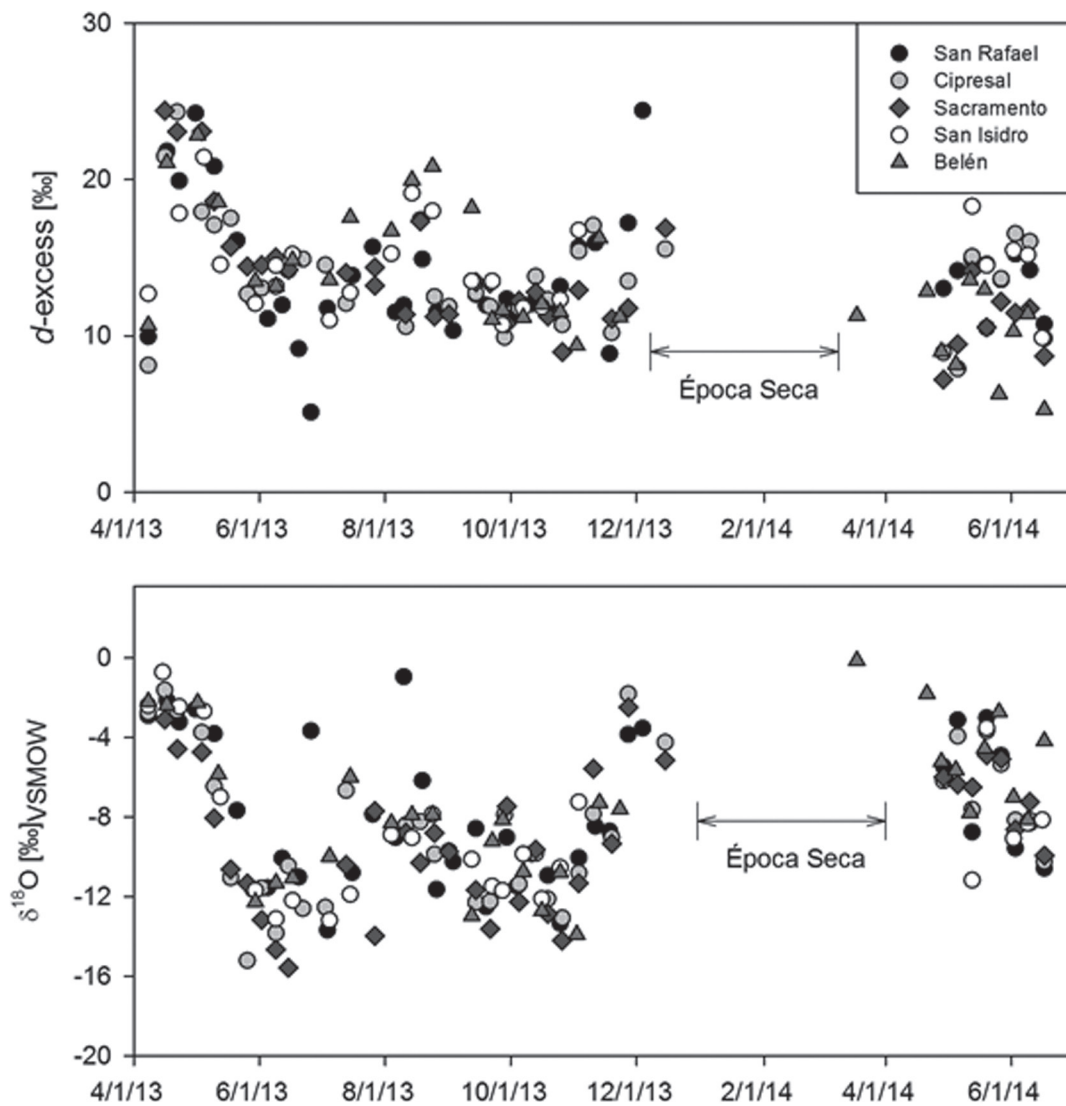


Figura 39. Variación temporal en la composición de  $\delta^{18}\text{O}$  (‰) y exceso de deuterio (*d-excess*, ‰) para los puntos de muestreos semanales en la zona intermontaños de Heredia (968 – 2303 m.s.n.m.) hasta Junio de 2014.



*Modelación de trayectorias de masas de aire (HYSPLIT) y aplicación en la determinación de la recarga acuífera*

La figura 40 muestra la distribución espacial de las trayectorias obtenidas con el modelo HYSPLIT para los eventos de precipitación diarios recolectados en Heredia durante el 2013. Durante la época seca, la composición isotópica está relacionada con precipitaciones menores a 10 mm provenientes principalmente del Caribe como consecuencia de la fuerte influencia de los vientos alisios. En la época lluviosa las trayectorias de las masas de aire son variables: convección local, masas de aire provenientes del Pacífico Central, Pacífico Sur y vertiente del Caribe. En general, las masas de aire provenientes del Pacífico presentan una composición isotópica más empobrecida en comparación con las masas de aire provenientes del Caribe. Lo anterior se debe fenómeno de destilación que se produce cuando las masas de aire ascienden desde la costa Pacífica para ingresar al Valle Central. En cambio, las masas de aire provenientes del Caribe, son transportadas en una región de orogra-

fía relativamente llana, además de capturar humedad local enriquecida. La diferenciación entre la composición isotópica del Pacífico (empobrecida) versus el Caribe (enriquecida), se convierte en una herramienta hidrológica para la determinación de la recarga acuífera, es decir, la separación cuantitativa de los aportes pluviales.

La figura 41 presenta la distribución espacial histórica de la composición de  $\delta^{18}O$  (‰) en aguas subterráneas del Valle Central. La interpolación de la composición isotópica en la sección noroeste de la cuenca del río Virilla y la cuenca del Río Grande ( $-9.77$  ‰, en azul) es particularmente empobrecida en comparación con la sección noreste de la cuenca del río Virilla ( $-5.8$  ‰, en rojo), especialmente en las sub-cuencas de los ríos Segundo, Tibás, Lajas, Durazno, lo cual sugiere la prevalencia de precipitación proveniente de la vertiente del Caribe en la recarga del acuífero de estos últimos cuerpos de agua. Asimismo, los valores en la parte media de la cuenca representan una condición intermedia entre ambos sistemas subterráneos, potencialmente debido a procesos de mezcla de aguas meteóricas provenientes del Pacífico y del Caribe. El empobrecimiento en la composición isotópica en la cuenca del río Grande (contigua a la cuenca del río Virilla) (Figura 41) refuerza la hipótesis de una recarga acuífera preferencial dependiendo del origen de las masas de aire (i.e. Pacífica versus Caribe). La identificación espacial de los patrones de recarga puede ser utilizada para la priorización de recursos en zonas críticas dependiendo de las condiciones climáticas.

*Figura 40. Trayectorias de masas de aire (72 hrs) obtenidas con el modelo HYSPLIT para las muestras diarias colectadas en Heredia durante el 2013. Las líneas grises corresponden a la época lluviosa, mientras que las líneas negras representan los eventos en la época seca.*

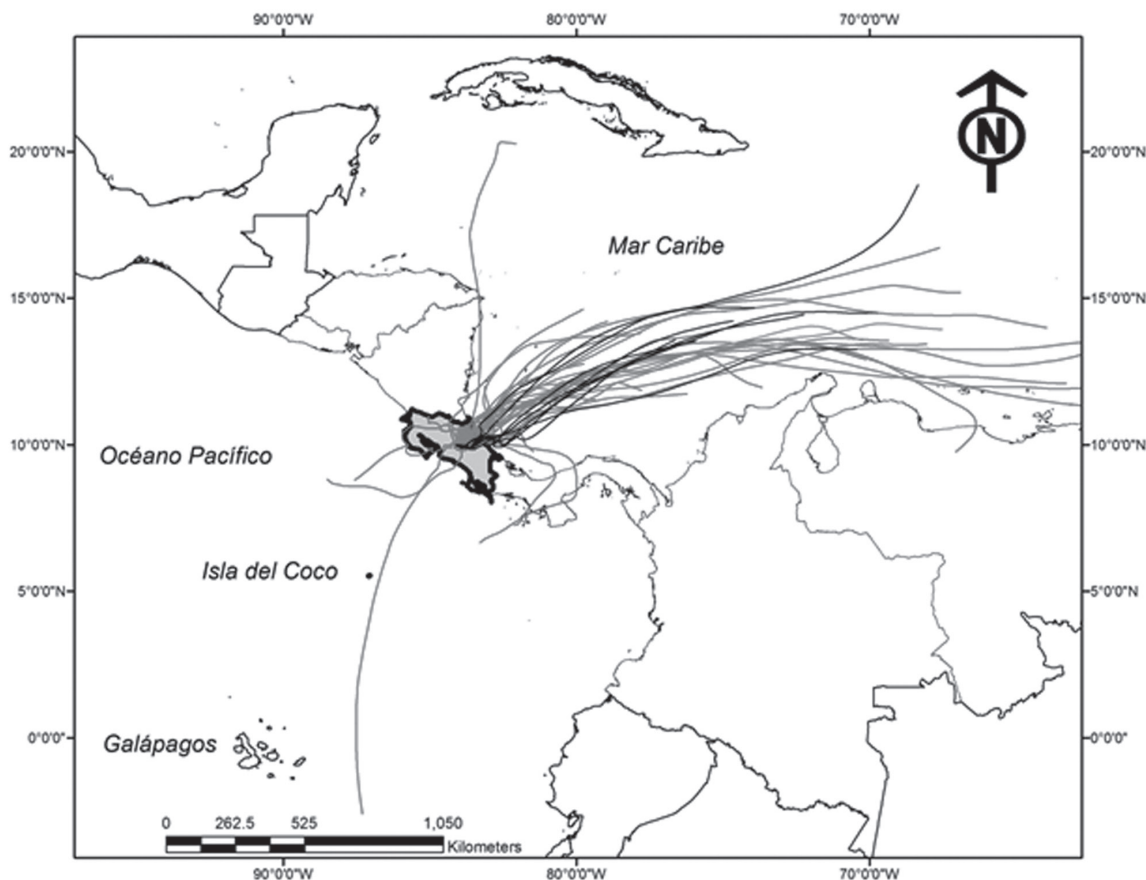
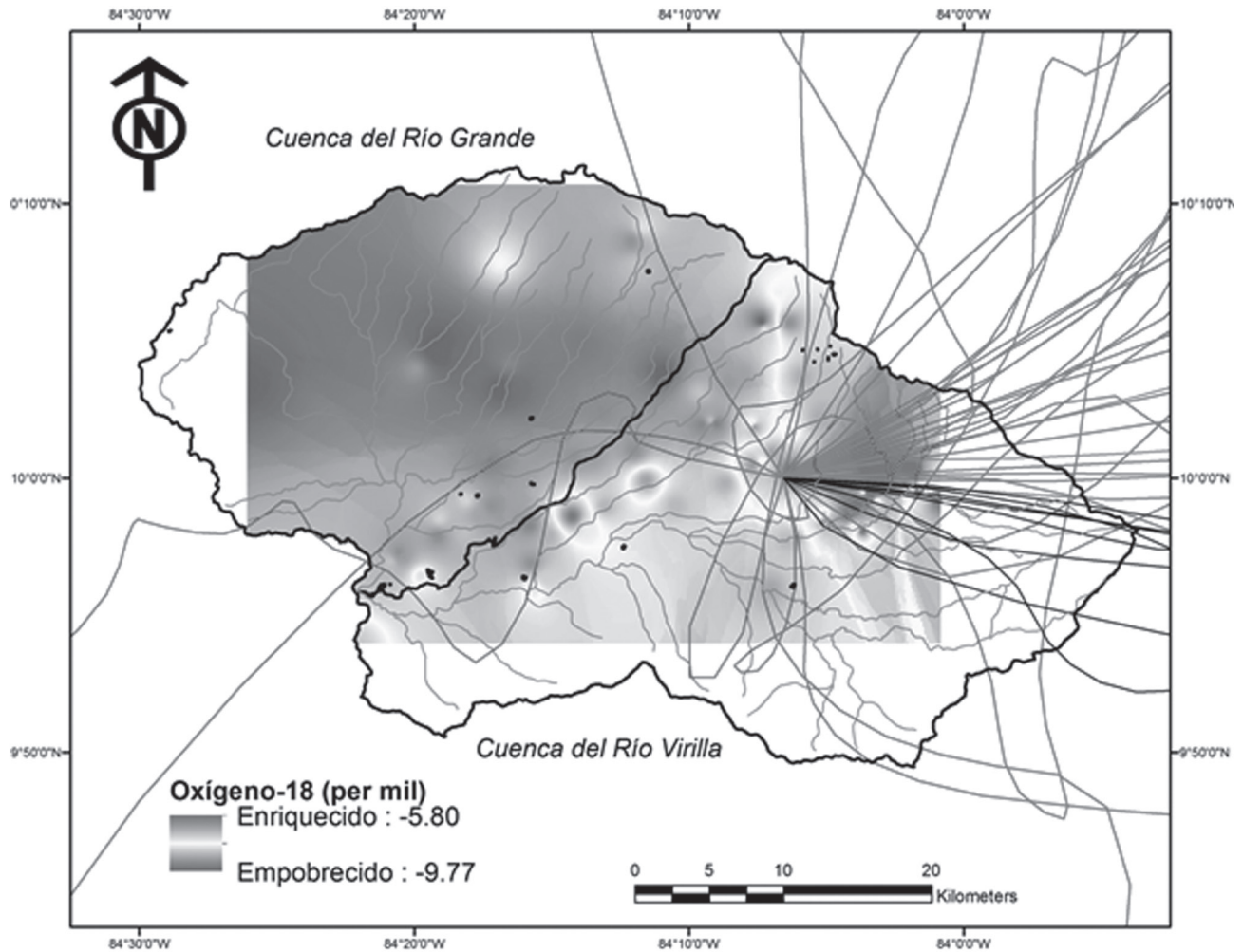




Figura 41. Interpolación de la composición isotópica en aguas subterráneas del Valle Central de Costa Rica, basada en los datos históricos ISOHIS del Organismo Internacional de Energía Atómica. Las líneas grises representan las trayectorias de masas de aire en la época lluviosa, mientras que las líneas negras muestran las masas de aire durante la época seca. Los principales cuerpos de agua superficial corresponden a las líneas azules. La composición isotópica en aguas subterráneas está particularmente dividida en dos componentes, Pacífico (gris oscuro) y Caribe (gris claro).



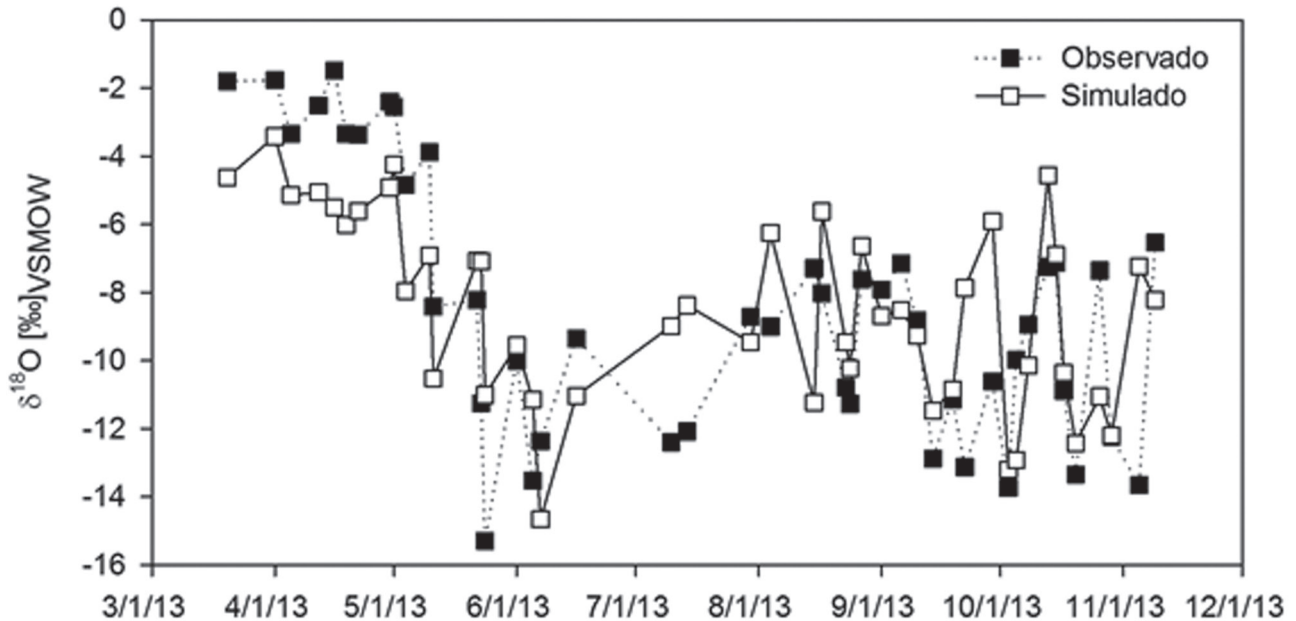
### Modelo de regresión lineal e interpretación física conceptual

La figura 42 presenta la comparación entre la composición de  $\delta^{18}\text{O}$  observada y simulada a partir del modelo de regresión lineal representado en la ecuación 1.

$$(\delta^{18}\text{O})_O = 0.0063 \cdot A_m - 0.26 \cdot \text{HR} - 0.027 \cdot P - 0.004 \cdot A_{ma} + 11.70; r^2 = 0.52 \quad (1)$$

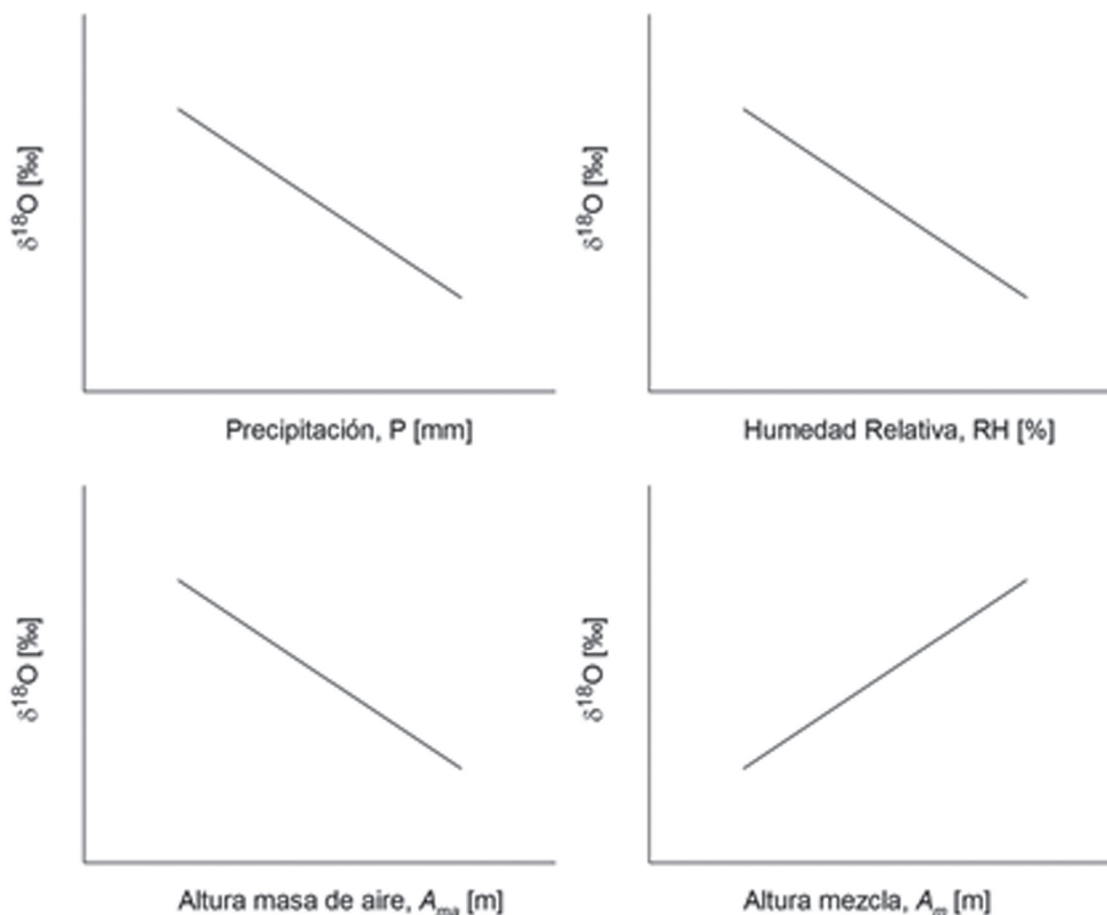
Donde,  $^{18}\text{O}_p$  corresponde al valor simulado de  $\delta^{18}\text{O}$  (‰);  $A_m$  y  $A_{ma}$  representan las alturas de la zona de mezcla (m) y la masa de aire (m); RH denota el porcentaje de humedad relativa; P equivale a la cantidad de precipitación (mm). Como se muestra en la figura 42, los eventos empobrecidos presentan la mayor discrepancia entre los valores observados y modelados, mientras que el fenómeno de enriquecimiento, controlado primordialmente por el 'efecto de cantidad' es descrito satisfactoriamente por el modelo lineal.

Figura 42. Modelación lineal de la composición de  $\delta^{18}\text{O}$  en eventos de precipitación diarios colectados en Heredia durante el 2013. Las variables incluidas en el modelo de regresión lineal son: precipitación (mm), humedad relativa (%) y las alturas de la zona de mezcla (m) y masa de aire (m).



La figura 43 muestra un esquema conceptual de las variables involucradas en la ecuación 1 respecto a la magnitud de las pendientes obtenidas. El 'efecto de cantidad', es decir, la probabilidad de que las gotas experimenten evaporación al descender es mayor cuando la precipitación es menor. En general, las precipitaciones abundantes están relacionadas con eventos empobrecidos, mientras que precipitaciones pequeñas (< 10 mm) presentan composiciones enriquecidas. Asimismo, las condiciones de humedad relativa por debajo de la línea base de las nubes pueden influir en la composición isotópica de la precipitación. En condiciones de humedad relativa superiores al 90% la capacidad de evaporación de las gotas es menor favoreciendo la estabilidad de la composición isotópica. En escenarios de poca precipitación y baja humedad relativa (60%-75%), la interacción con la escasa humedad adyacente y, por consiguiente, mayor probabilidad de evaporación favorece el enriquecimiento de las aguas meteóricas. Aunado a lo anterior, un aumento en la altura de la zona de mezcla se traduce en una distancia mayor de descenso para las gotas, favoreciendo el fenómeno de enriquecimiento durante eventos de poca precipitación.

Figura 43. Representación conceptual de las variables meteorológicas del modelo de regresión lineal y su correspondencia con la variación en la composición isotópica.



#### IV. Conclusiones

El presente análisis preliminar de la variación espacio-temporal de la composición isotópica en aguas meteóricas de Costa Rica permite distinguir varias tendencias generales: a) durante la época seca las lluvias están correlacionadas con eventos de precipitación enriquecidos, mientras que la influencia de la ITCZ produce una notable disminución significativa en la composición de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ . El desplazamiento norte de la ITCZ resulta en una alta variabilidad en los valores isotópicos durante la época lluviosa, especialmente durante Setiembre y Octubre; b) las trayectorias de las masas de aire simuladas con el modelo HYSPLIT sugieren una combinación de fuentes de humedad durante la época lluviosa con eventos enriquecidos provenientes del Caribe, señal que puede ser monitoreada en la composición históricas de las aguas subterráneas del Valle Central; c) las variaciones diarias de  $\delta^{18}\text{O}$  en Heredia durante el 2013 fueron simuladas con un modelo de regresión lineal ( $r^2=0.52$ ) que incluye precipitación, humedad relativa y las alturas de la zona de mezcla y masa de aire.

La información generada conformará la línea base para futuros estudios hidrológicos, además de mejorar el estado del conocimiento respecto a los factores que controlan las variaciones isotópicas en zonas tropicales y reforzará la red de monitoreo por parte del Grupo de Investigación en Isótopos Estables de la Universidad Nacional. Asimismo, el muestreo isotópico permitirá la interpretación de archivos paleo-climáticos y la calibración/validación de modelos de circulación regional y global.

## V. Agradecimientos

El presente estudio es financiado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (Coordinated Research Project 19747), como parte de la iniciativa mundial '*Stable isotopes in precipitation and paleoclimatic archives in tropical areas to improve regional hydrological and climatic impact models*'. La colaboración del Centro Científico Tropical (Monteverde), el Área de Conservación Guanacaste (Santa Rosa, San Cristóbal), el personal del HIDROCEC (Liberia), Recinto Sarapiquí (Río Frío), Estación Experimental 28 Millas, Estación Nacional de Ciencias Marino-Costeras Punta Morales), Parque Nacional Isla del Coco, además de la vinculación de comunidades rurales (Upala, Ciudad Quesada, Coto 49, Sacramento, Birrí) y urbanas (Belén, Heredia, San Rafael, Cartago, San Isidro) ha sido fundamental para la recolección de las muestras isotópicas. Además, las becas del Centro Nacional de Alta Tecnología (CeNAT-CONARE) y el Fondo para el Fortalecimiento de las Capacidades Estudiantiles (FOCAES) en Investigación y Extensión de la Universidad Nacional otorgadas a J. Corrales-Salazar han sido fundamentales para el desarrollo del trabajo de campo.

## Referencias

Aggarwal, P.K., Alduchov, O.A., Froehlich, K.O., Araguas-Araguas, L.J., Sturchio, N.C., Kurita, N. 2012. Stable isotopes in global precipitation: a unified interpretation based on atmospheric moisture residence time. *Geophysical Research Letters*, 39, L11705, doi:10.1029/2012GL051937.

Araguás-Araguás, L., Froehlich, K., and Rozanski, K. 2000. Deuterium and oxygen-18 isotope composition of precipitation and atmospheric moisture. *Hydrol. Process.*, 14: 1341-1355

AYA. 2014. Abastecimiento de agua potable en la GAM. San José, Costa Rica.

Barras V, Simmonds I. 2009. Observation and modelling of stable water isotopes as diagnostics of rainfall dynamics over southeastern Australia. *Journal of Geophysical Research* 114: 1–17. DOI: 10.1029/2009JD012132.

Bowen, G. 2008. Spatial analysis of the intra-annual variation of precipitation isotope ratios and its climatological corollaries. *Geophysical Research*, 113, D05113, doi:10.1029/2007JD009295.

Bowen, G., and Revenaugh, J. 2003. Interpolating the isotopic composition of modern meteoric precipitation. *Water Resources Research*, 39 (10) 1299, doi:10.1029/2003WR002086.

Celle-Jeanton, H., Gonfiantini, R., Travi, Y., Sol B. 2004. Oxygen-18 variations of rainwater during precipitation: application of a Rayleigh model to selected rainfalls in Southern France. *Journal of Hydrology* 289: 165–177.

Cobb, K.M., Adkins, J.F., Partin, J.W., Clark, B. 2007. Regional-scale climate influences on temporal variation of rainwater and cave dripwater oxygen isotopes in northern Borneo. *Earth Planet. Sci. Lett.* 263, 207–220.

Colwell, R.K., Brehm, G., Cardelus, C.L., Gilman, A.C. & Longino, J.T. 2008. Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. *Science*, 322, 258–261.

Coplen, T.B., Neiman, P.J., White, A.B., Landwehr, J.M., Ralph, F.M., Dettinger, M. D. 2008. Extreme changes in stable hydrogen isotopes and precipitation characteristics in a landfalling Pacific storm. *Geophysical Research Letters* 35: L21808. DOI: 10.1029/2008GL035481.

Dansgaard, W. 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16, 436–468, doi:10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x.

GNIP. 2012. Global Network of Isotopes in Precipitation. Available at [http://www.naweb.iaea.org/napc/ih/IHS\\_resources\\_gnip.html](http://www.naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_gnip.html) (IAEA Isotope Hydrology, Vienna, Austria). Accessed August 15 2012.

Guswa, A.J., Rhodes, A., Newell, S.E. 2007. Importance of orographic precipitation to the water resources of Monteverde, Costa Rica. *Advances in Water Resources* 30 (2007) 2098–2112.

Draxler RR, Rolph GD. 2012. HYSPLIT–Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model. Available at <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php> (NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, USA). Accessed April 11 2013.

Hidalgo, H.G., Alfaro, E.J. 2012. Some physical and socio-economic aspects of climate change in Central America. *Progress in Physical Geography*, 36(3) 379–399 DOI: 10.1177/0309133312438906

Ichiyanagi, K., and Yamanaka, M.D. 2005. Interannual variation of stable isotopes in precipitation at Bangkok in response to El Niño Southern Oscillation. *Hydrol. Process.*, 19, 3413–3423.

Ishizaki, Y., Yoshimura, K., Kanae, S., Kimoto, M., Kurita, N., Oki, T. 2012. Interannual variability of H218O in precipitation over the Asian monsoon region. *Geophysical Research*, 117, D16308, doi:10.1029/2011JD015890.

Johnson, K.R., Ingram, B.L., 2004. Spatial and temporal variability in the stable isotope systematics of modern precipitation in China; implications for paleoclimate reconstructions. *Earth Planet. Sci. Lett.* 220, 365–377.

Kabat, P., Schulze, R.E., Hellmuth, M.E., Veraart, J.A., (eds). 2002. *Coping with Impacts of Climate Variability and Climate Change in Water Management: A Scoping Paper*. International Secretariat of the Dialogue on Water and Climate, Wageningen, The Netherlands.

Lachniet, M. and Paterson, W. Stable isotope values of Costa Rican surface waters. 2002. *Hydrology*, 260: 135-150.

Lachniet, M. 2009. Sea surface temperature control on the stable isotopic composition of rainfall in Panama. *Geophysical Research Letters* 36, L03701, doi:10.1029/2008GL036625.

Lachniet, M. and Paterson, W. 2009. Oxygen isotope values of precipitation and surface waters in northern Central America (Belize and Guatemala) are dominated by temperature and amount effects. *Earth and Planetary Science Letters* 284, 435–446.

Loarie, S.R., Duffy, P.P., Hamilton, H., Asner, G.P., Field, C. B. & Ackerly, D.D. 2009. The velocity of climate change. *Nature*, 462, 1052–1055.

Magaña, V., Amador, J.A., Medina, S. 1999. The midsummer drought over Mexico and Central America. *J. Climate*, 12, 1577–1588.

Munksgaard, N.C., Wurster, C.M., Bass, A., Bird, M.I. 2012. Extreme short-term stable isotope variability revealed by continuous rainwater analysis. *Hydrol. Process.* 26, 3630–3634.

Panarello, H.O., and Dapeña, C. 2009. Large scale meteorological phenomena, ENSO and ITCZ, define the Paraná River isotope composition. *Hydrology*, 365: 105–112

Rhodes, A., Guswa, A.J., Newell, S.E. 2006. Seasonal variation in the stable isotopic composition of precipitation in the tropical montane forests of Monteverde, Costa Rica. *Water Res. Research*, 42, W11402, doi:10.1029/2005WR004535.

Reynolds-Vargas, J., and Fraile, J. 2009. Utilización de isotópos estables en la precipitación para determinar zonas de recarga del acuífero Barva, Costa Rica. In *Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 2006*. International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1611: 83-96.

Rozanski K., Araguas-Araguas L.J., Gonantini, R. 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. In *Climate Change in Continental Isotopic Records*, Swart PK, Lohmann KC, McKenzie J Savin S (eds) *Geophysical Monograph No 67*. American Geophysical Union. Washington: 1-36.

Sánchez-Murillo, R., G. Esquivel-Hernández, K. Welsh, E.S. Brooks, J. Boll, R. Alfaro-Solís, and J. Valdés-González, (2013), Spatial and temporal variation of stable isotopes in precipitation across Costa Rica: an analysis of historic GNIP records, *Modern Hydrology*, 3, 226-240, doi:10.4236/ojmh.2013.34027.

Tewksbury, J.J., Huey, R.B. & Deutsch, C.A. 2008. Putting the heat on tropical animals. *Science*, 320, 1296–1297.

Vuille, M., R. S. Bradley, and F. Keimig. 2000a. Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. *J. Geophys. Res.*, 105, 12447– 12460.

Vuille, M., R. S. Bradley, and F. Keimig. 2000b. Climatic variability in the Andes of Ecuador and its relation to tropical Pacific and Atlantic sea surface temperature anomalies. *J. Clim.*, 13, 2520– 2535.

Vuille, M., R. S. Bradley, R. Healy, M. Werner, D. R. Hardy, L. G. Thompson, and F. Keimig. 2003. Modeling d18O in precipitation over the tropical Americas 2: Simulation of the stable isotope signal in Andean ice cores. *J. Geophys. Res.*, 108, doi:10.1029/2001JD002039.

Wassenaar L.I., P. Athanasopoulos, and Hendry M.J. 2011. Isotope hydrology of precipitation, surface and ground waters in the Okanagan Valley, British Columbia, Canada. *J. Hydrology*, 411: 37–48, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.09.032.

Waylen, P., Caviedes, C.N., Quesada, M.E. 1996. Interannual variability of monthly precipitation in Costa Rica. *Climate*, 9: 2506-2613.

Zhou, Y. P., K.M. Xu, Y. C. Sud, A. K. Betts. 2011. Recent trends of the tropical hydrological cycle inferred from Global Precipitation Climatology Project and International Satellite Cloud Climatology Project data, *J. Geophys. Res.*, 116, D09101, doi:10.1029/2010JD015197.



# Evaluación de la calidad del agua y las áreas ribereñas en la subcuenca del Río Liberia, Guanacaste, Costa Rica

*Dra. Andrea Suarez Serrano<sup>16</sup>*

*Lic. Álvaro Baldioceda Garro*

*M.Sc. Christian Golcher Benavides*

*Licda. Daniela Rojas Cantillano*

## Resumen

Se evaluó la condición natural del río Liberia para generar información clave para la ejecución del plan de manejo de la subcuenca y brindar recomendaciones para la gestión y el uso del recurso hídrico a los tomadores de decisión del Cantón de Liberia. El estudio se realizó en la parte alta y media de la subcuenca del Río Liberia, se aplicó un índice de evaluación de áreas ribereñas y dos índices de calidad del agua. Para cada punto de muestreo se calculó el índice del Sistema Holandés de Valoración de la Calidad Física y Química del Agua, el índice de BMWP-CR según lo establecido en Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales N33903-MINAE-S. Además se aplicó el índice de Calidad de Áreas Ribereñas (RQI). Para la valoración del índice Holandés, se realizaron cuatro actividades de muestreo entre febrero y diciembre del 2013, las cuales incluyeron cuatro épocas climáticas: seca, transición seca-lluviosa, lluviosa y transición lluviosa-seca, se establecieron siete puntos de muestreo considerando el uso del suelo en la subcuenca. Se encontró que los puntos ubicados en la parte media de la subcuenca son los más vulnerables debido a efectos de contaminación puntual y no puntual relacionados a los impactos derivados de los asentamientos urbanos de la Ciudad de Liberia. La aplicación de los índices en conjunto fue una excelente forma de evaluar el estado ecológico del Río Liberia y la influencia de las actividades humanas desarrolladas en la Subcuenca. En conclusión, la adecuada gestión de la subcuenca requiere de una acción articulada entre instituciones públicas y privadas con la sociedad civil, que incluyan acciones de protección y conservación de suelos en los puntos superiores, mientras que en los inferiores se requieren acciones de remediación y posterior protección, particularmente un manejo adecuado de aguas residuales, ordenamiento territorial y gestión integral de residuos sólidos.

**Palabras clave:** gestión integrada del recurso hídrico, monitoreo calidad del agua, recurso hídrico, río Liberia.

## Water quality and riparian areas evaluation at the Liberia River Basin, Guanacaste, Costa Rica

### Abstract

The main objective of this work was to evaluate the natural condition of Liberia River for generating key information, which will serve to the management plan and for providing advice on the management and use of water resources to stakeholders of Liberia (City Council, Ministry of Health, and Ministry of Environment and Energy). In order to characterize and assess the ecological status of the

<sup>16</sup> Centro de Recursos Hídricos para Centroamérica y el Caribe (HIDROCEC-UNA), Sede Regional Chorotega, Universidad Nacional. andrea.suarez.serrano@gmail.com, alvarobaldioceda@gmail.com, christian.golcher.benavides@una.cr, daniela.rojas.cantillano@una.cr.

water body at the upper and middle part of the basin of Liberia River, three index of water quality assessment and one for riparian areas were applied to provide recommendations for the management and use of water resources. The indexes applied were the following: 1) "Index Dutch Index for Quality of Surface Water Bodies" in Decree N.33903 MINAE; 2) The Biological Monitoring Working Party index modified for Costa Rica (BMWP-CR); and 3) Riparian Quality Index (RQI). The assessment realized with the Dutch index four sampling activities between February and December 2013 were performed, which included four climatic seasons: dry, dry-rainy, rainy transition and wet-dry transition seven sampling points were established according to the current land use at the basin. The points located on reaching the middle of the watershed were the most vulnerable due to effects of point pollution and nonpoint especially by the impacts of urban settlements in Liberia City; all indexes applied were congruent about the ecological condition of the Liberia River. In conclusion, an appropriate management of the watershed requires a coordinated action between public and private institutions and civil society, including protection measures and soil conservation in the top sites (upper watershed), while in the lower sites remediation actions and subsequent protection are required, particularly adequate wastewater management, land use planning and solid waste management.

**Key words:** integrated water resources management, water quality monitoring, water resources, Liberia River.

## I. Introducción

El Río Liberia está ubicado dentro de la cuenca del Río Tempisque en la Región Chorotega. Su cauce tiene una longitud de 60 Km aproximadamente; va desde una elevación de 800 m.s.n.m. en el sitio denominado Los Chorros de Santa María, dentro del Parque Nacional Volcán Rincón de la Vieja y descendiendo a una elevación de 30 m.s.n.m. cuando desemboca en el Río Tempisque dentro de una zona de agricultura intensiva, lo que lo hace parte esencial de toda la cuenca hidrográfica (Mateo-Vega, 2001).

Desde la parte alta y a través de toda la subcuenca, el Río Liberia es aprovechado por distintas actividades que se desarrollan en sus orillas. La parte alta es esencialmente un área forestal protegida; mientras que la parte media; es la zona urbana, sector por el cual el cauce atraviesa la ciudad de Liberia, capital de la Provincia de Guanacaste con alrededor de 45 000 habitantes (INEC, 2014); en esta zona los usos del agua del río son múltiples y se extienden desde la potabilización para el uso domésticos en el 50% de los hogares de la ciudad hasta el vertido ilegal de aguas residuales (Mora & Portuguéz, 2011).

La parte baja es la zona agropecuaria, donde el caudal del río es explotado en actividades productivas. El riego de una variedad de cultivos en especial de melón, de arroz y de caña de azúcar hace que sus aguas sean de alta importancia para la economía productiva. Sin embargo, esto conlleva a la degradación ambiental y la presión sobre los recursos naturales, debido a procesos de contaminación, erosión, de alteraciones al cauce natural y la sobre explotación de los suelos, cuyos nutrientes son extraídos en múltiples cosechas consecutivas y su alta dependencia a la industria petroquímica en los procesos productivos.

Se prevén importantes cambios hidrometeorológicos en la Región Chorotega donde "se espera que por el impacto del cambio climático se dé una disminución del periodo de lluvias; con lo cual la demanda de agua en los sectores productivos y en ecosistemas ira en aumento" (Alvarado, Contreras, Alfaro, & Jiménez, 2012). Por lo tanto, las medidas y actividades dirigidas a la protección y la conservación de los cuerpos de agua superficial son vitales, así como la implementación de medidas concretas que permitan la adaptación de la región a estos cambios, con el fin de reducir la vulnerabilidad y el riesgo a desastres climáticos.

La dinámica que presenta la cuenca hace que el monitoreo de las aguas superficiales, el y la valoración de la condición natural del río sea elemental para generar información clave para la sustentabilidad de las actividades productivas que se realizan en la subcuenca. Además, este monitoreo beneficia a las poblaciones ribereñas y a aquellas poblaciones que se abastecen del agua para consumo; así como también la biodiversidad y el desarrollo de la vida acuática saludable en el río. Anteriormente a este estudio no existía ningún trabajo de evaluación del estado ecológico del Río Liberia, por lo que las diversas actividades antropogénicas podrían estar poniendo en riesgo la salud integral del ecosistema acuático, aunado su vulnerabilidad debido a eventos naturales.

Se ha comprobado que los índices de Calidad del Agua (ICA) son herramientas muy útiles en la evaluación de la condición de los cuerpos de agua superficial, ya que son criterios técnicos que permiten realizar comparaciones en escalas de medición para la determinación del estado actual del río (Kowalkowski, Zbytniewski, Szpejna, & Buszewski, 2006). El objetivo principal de los ICA es el de simplificar los datos de los análisis fisicoquímicos y biológicos realizados a una escala alfanumérica para identificar el grado de contaminación en un cuerpo de agua de una forma ágil, sin tener que recurrir a la observación de cada una de las numerosas variables, es por esto que han sido muy utilizados a nivel nacional e internacional como patrones científicos para el monitoreo, el control y la valoración natural de los ríos para brindar recomendaciones para la gestión y el uso del recurso hídrico a los tomadores de decisión (Alberti & Parker, 1991).

Existe una variedad de ICA contruidos a partir de parámetros fisicoquímicos y biológicos, que varían según la naturaleza del cuerpo de agua, el posible uso del agua, las condiciones climáticas y geológicas de la región, y al criterio de expertos (Couillard & Lefebvre, 1985). La evaluación de la calidad del agua utilizando metodologías de estudio y de seguimiento basados en el análisis físico-químico de agua permite una visión puntual del estado actual de las aguas, mientras que los métodos biológicos presentan la ventaja de reflejar las condiciones existentes tiempo atrás antes de la toma de muestra (Alba-Tercedor, 1996).

La legislación costarricense, decreto N. 33903 del MINAE, señala al “*Índice Holandés de Clasificación para la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales*” como de referencia para la evaluación de la calidad de las aguas superficiales en cauces de río, este índice permite sintetizar en palabras y mediante un código de colores la información acerca de la concentración de tres parámetros de importancia en la valoración de la contaminación del agua; como son: demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nitrógeno amoniacal y oxígeno disuelto, este último expresado como porcentaje de saturación de oxígeno. Este índice permite clasificar, desde un punto de vista espacial y temporal, un tramo o sitio particular del río, en una clasificación específica (MINAE, 2007). Este índice ha sido utilizado en múltiples estudios de calidad de los cuerpos de agua y brinda información importante en conocer la variación en el grado de contaminación y en los conflictos uso-calidad.

El índice de calidad de áreas Ribereñas (RQI-Riparian Quality Index) es una metodología rápida y estandarizada que se aplica para evaluar la condición ecológica en las zonas ribereñas, toma en cuenta los siguientes siete atributos: Continuidad longitudinal de la vegetación riparia natural (estrato arbóreo y arbustivo), dimensiones en anchura del espacio ripario con vegetación natural asociada al río (vegetación leñosa y helofitos), composición y estructura de la vegetación riparia, regeneración natural de la vegetación riparia (estrato arbóreo y arbustivo), condición de las orillas, conectividad lateral de la ribera con el cauce, permeabilidad y grado de alteración del relieve y suelo ripario (Del Tánago, De Jalón, & Directive, 2006) con lo cual su aplicación en la subcuenca puede determinar las acciones o actividades que logren mantener, recuperar y restaurar el estado ecológico de las riberas.

El índice BMW-P (Biological Monitoring Working Party) es un índice que permite determinar la calidad de las aguas asignando un valor a cada familia de macro invertebrados bentónicos encontrados,

según su grado de sensibilidad a la contaminación. Este instrumento ha sido adaptado para Costa Rica (BMWP-CR) por (Springer, Hanson, & Ramirez, 2010). El uso de los macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores de contaminación ha sido ampliamente utilizado principalmente porque: son organismos sedentarios, con ciclos de vida relativamente largos y pueden ser empleados para evaluar la calidad del agua en un lugar a lo largo de un período de tiempo (Pratt, R.A., & P.J., 1981), (Resh, Myers, & Hannaford, 1996), (Sawyer, Stewart, Mullen, Simon, Bennett, & Simon, 2004). Si el grado de perturbación de un ambiente llega a ser letal para ciertos organismos su lugar puede ser ocupado por organismos más tolerantes a esta perturbación, provocando variaciones en la composición y estructura de las comunidades de macroinvertebrados, lo que permite detectar e interpretar la evidencia de algún tipo de contaminación (Alba-Tercedor, 1996).

En la evaluación de la calidad del agua de un río se compararan los valores medidos de la concentración de parámetros fisicoquímicos y biológicos y paralelamente se evalúa la condición natural de las riberas, con los estándares de calidad establecidos en instrumentos legales y criterios técnicos para la valoración integral de estos ecosistemas acuáticos. Los resultados de estos estudios permitirá conocer la estado actual del río en términos de calidad del agua e identificando los principales focos de contaminación y de esta forma poder emitir recomendaciones de manejo a los tomadores de decisión del Cantón de Liberia, para prevenir y mitigar los impactos negativos causados principalmente por las actividades humanas sobre el río y sus áreas ribereñas.

## II. Metodología

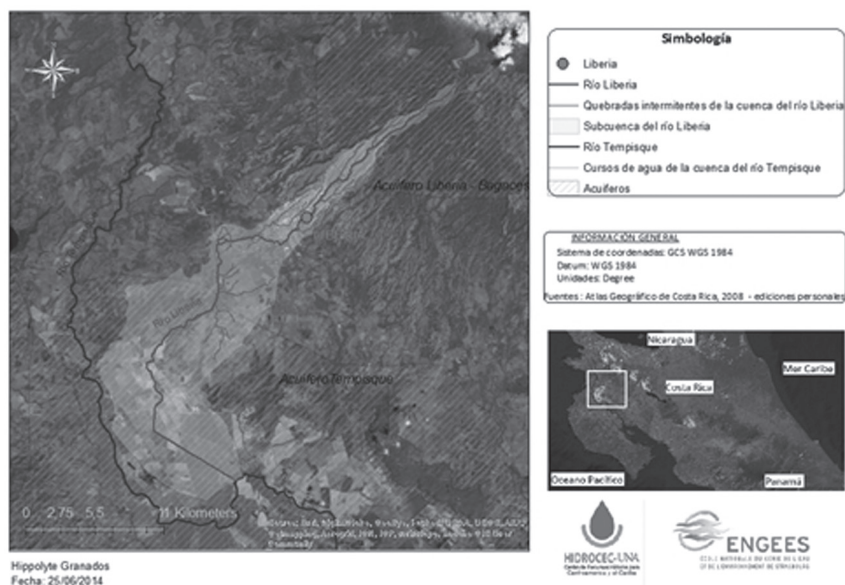
### *Área de estudio*

La subcuenca del río Liberia se ubica en la cuenca del río Tempisque de la provincia de Guanacaste, en el Pacífico Norte de Costa Rica. En la zona predomina el clima de bosque tropical seco, transición a húmedo y bosque húmedo pre montano, la temperatura promedio anual es de 28 °C y las precipitaciones se desarrollan entre los meses de mayo a octubre (IMN, 2009).

Tal como se muestra en la figura 44, pasa exactamente por el centro de la ciudad de Liberia atravesándola del noroeste al suroeste, lo que lo expone a un alto riesgo de contaminación durante este recorrido. En la parte alta el río está en área protegida dentro del Parque Nacional Rincón de La Vieja, aguas abajo las tierras tienen a ser áridas con poca vegetación arbórea. En la parte media-alta del río se encuentra el vertedero municipal y enseguida comienza el uso de suelo urbano con la ciudad de Liberia. En la parte media-baja el uso de suelo es de uso agropecuario de baja densidad y en la parte baja de la subcuenca el uso es de agricultura de alta intensidad en cultivos de arroz y caña principalmente.



Figura 44. Subcuenca del río Liberia, Guanacaste, Costa Rica

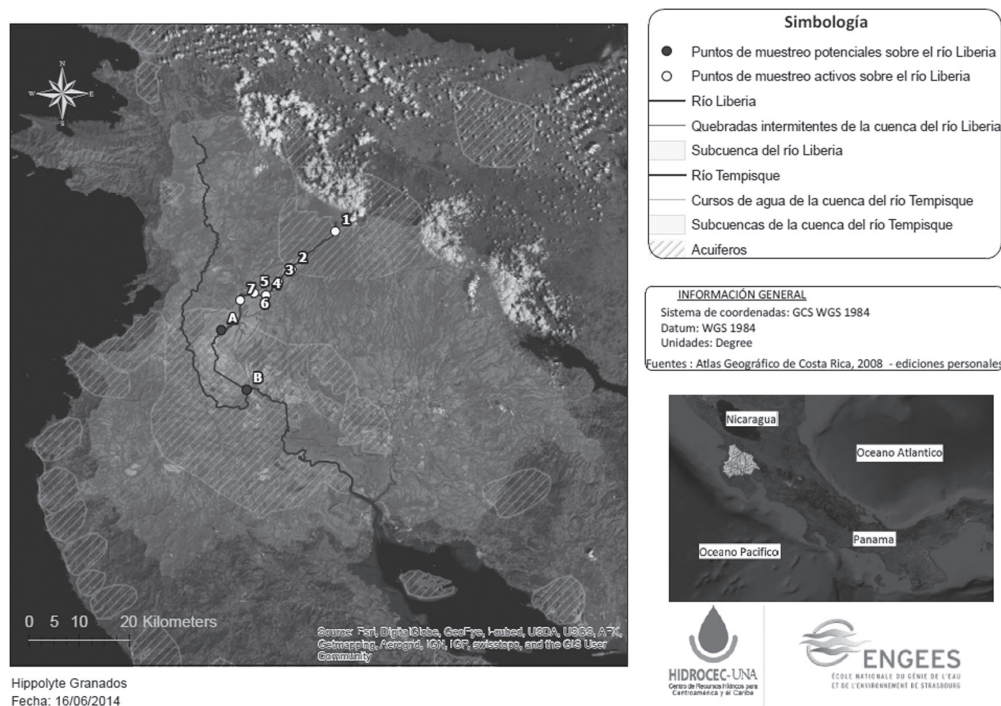


## Muestreo

Se realizaron cuatro campañas de muestreo entre febrero y diciembre del 2013, las cuales incluyeron cuatro épocas climáticas: seca, transición seca-lluviosa, lluviosa y transición lluviosa-seca.

Se establecieron siete puntos de muestreo tomando como criterios de selección las características del entorno y de la corriente, el uso del suelo, el caudal, la profundidad y la accesibilidad (figura 45). El cuadro 9 muestra la codificación, ubicación geográfica y altura de cada punto de muestreo.

Figura 45. Ubicación de puntos de muestreo en la Cuenca del río Liberia, Guanacaste, Costa Rica



*Cuadro 9. Localización de los puntos de muestreo en el río Liberia, Guanacaste.*

<b>Punto</b>	<b>Descripción</b>	<b>Coordenadas</b>	<b>Altura (msnm)</b>
1 PRL	Sector Santa María, aguas abajo del derivador del AyA	N 10°44'18" O 85°18'51"	672
2 PRL	Finca el Yugo, aledaño al vertedero municipal	N 10°40'12" O 85°23'31"	260
3 PRL	Poza Los Mangos, cerca de la planta potabilizadora AyA	N 10°38'51" O 85°24'58"	180
4 PRL	Poza La Calera, cerca de la carretera Interamericana	N10°37'21" O 85°26'21"	145
5 PRL	Barrio El Capulín, unión de la quebrada Piches y río Liberia	N 10°37'36" O 85°27'36"	125
6 PRL	Barrio El Capulín, después del vertido de las Lagunas de Tratamiento de Agua Residual de AyA	N 10°37'35" O 85°27'39"	124
7 PRL	Puente sobre el río Liberia, carretera a Guardia	N 10°36'49" O 85°29'06"	113

### *Metodologías de análisis*

Los resultados obtenidos para cada parámetro se complementaron con la información meteorológica suministrada por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de la estación del Aeropuerto Daniel Oduber Quirós ubicado en la Ciudad de Liberia. A continuación se describe la metodología para cada uno de los parámetros complementados.

### **Áreas Ribereñas**

Se utilizaron fichas de campo diseñadas para el levantamiento de información conforme a la guía de valoración de las franjas ribereñas desarrollada por González del Tánago, García del Jalón, Lara y Gariletti (2006), con adaptaciones en función de la normativa ambiental vigente en el país. Para la adaptación de las hojas de campo se tomaron en cuenta datos representativos de los distintos usos del suelo presentes en la subcuenca para cada uno de los puntos de muestreo.

Una vez obtenidos los datos, se realizó el análisis de estos en laboratorio, asignándose puntajes correspondientes a cada atributo afín de obtener la valoración y clasificación final de acuerdo a la información del cuadro 10.

*Cuadro 10. Clasificación de las riberas en base al puntaje obtenido durante la valoración de las áreas ribereñas.*

<b>Color</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Rango de valores</b>
<b>Azul</b>	Muy bueno	100-120
<b>Verde</b>	Bueno	80-99
<b>Amarillo</b>	Regular	60-79
<b>Naranja</b>	Pobre	40-59
<b>Rojo</b>	Muy pobre	10-39

Fuente: Copyright (González, García, Lara, & Gariletti, 2006)



## *Análisis fisicoquímicos y microbiológicos*

Las muestras de agua fueron analizadas en el Laboratorio de Análisis Fisicoquímico de Aguas y en el de Microbiología Ambiental del Centro de Recursos Hídricos para Centroamérica y el Caribe (HIDROCEC-UNA), según la metodología descrita en Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 2012). A cada una de las muestras de agua se le realizaron los siguientes análisis: Demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_{5,20}$ ), nitrógeno amoniacal, oxígeno disuelto, coliformes fecales, coliformes totales, *Staphylococcus aureus* y recuento total mesófilo. Los análisis que así lo requerían se efectuaron el mismo día del muestreo.

En cuanto al muestreo, transporte y preservación de las muestras se realizaron según los métodos descritos en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 2012). Para cada punto de muestreo se calculó el índice del Sistema Holandés de Valoración de la Calidad Física y Química del Agua según lo establecido en Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales (2007), el cual utiliza los parámetros: demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nitrógeno amoniacal y oxígeno disuelto este último expresado como porcentaje de saturación de oxígeno, a los cuales según su concentración se asigna un puntaje que puede ser trasladado a una escala de colores, según lo muestra el cuadro 11.

*Cuadro 11. Asignación de clases de calidad del agua según el Sistema Holandés, basado en valores de PSO, DBO y nitrógeno amoniacal.*

<b>Clase</b>	<b>Sumatoria de Puntos</b>	<b>Código de Color</b>	<b>Interpretación de Calidad</b>
1	3	Azul	Sin contaminación
2	4-6	Verde	Contaminación incipiente
3	7-9	Amarillo	Contaminación moderada
4	10-12	Naranja	Contaminación severa
5	13-15	Rojo	Contaminación muy severa

Fuente: Copyright (MINAE, 2007)

## *Macroinvertebrados bentónicos*

Las muestras de macroinvertebrados se recolectaron, clasificaron y cuantificaron en el Laboratorio de Microbiología Ambiental del Centro de Recursos Hídricos para Centroamérica y el Caribe (HIDROCEC-UNA) según la metodología BMWP-CR adaptado para Costa Ricapor Springer, Hanson y Ramirez (2010). Siguiendo la metodologías de recolección y preservación de las muestras según Springer et al, (2010). La clasificación de la calidad del agua se realizó siguiendo la descripción de colores que se presenta en el cuadro 12.

Cuadro 12. Clasificación de calidad del agua superficial según el índice BMWP-CR

Rango/BMWP	Color	Descripción
>121	Azul	Aguas de calidad excelente
101-120	Celeste	Aguas de calidad buena, no contaminadas o no alteradas de manera sensible
61 – 100	Verde	Aguas de calidad regular, contaminación moderada
36 – 60	Amarillo	Agua de calidad mala, contaminadas
16 – 35	Naranja	Aguas de calidad mala, muy contaminadas
>15	Rojo	Aguas de calidad muy mala, extremadamente contaminadas

Fuente: Copyright (MINAE, 2007)

### III. Discusión de resultados

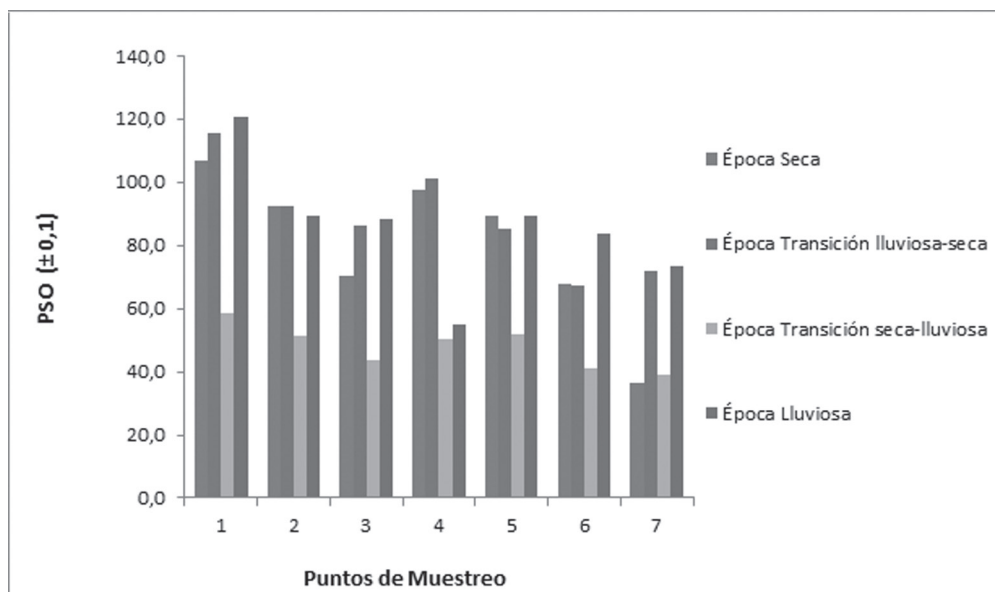
El análisis de los resultados obtenidos en los puntos de muestreo sobre el río Liberia permitió determinar el efecto de las fuentes de contaminación puntual y no puntual, que tienen incidencia directa sobre el cauce. Una fuente de contaminación puntual importante es la planta de tratamiento de aguas residuales de la Ciudad de Liberia, como la descarga directa de aguas residuales de tipo ordinario, que según los reportes operativos del AyA cumplen con la normativa existente. Por otra parte, la mala gestión de los residuos sólidos en la Subcuenca se evidencia con la disposición de los residuos sólidos en el río. Lo anterior, demuestra la poca educación ambiental de la ciudadanía y la necesidad de acciones a nivel municipal para el correcto manejo de los residuos sólidos.

#### *Evaluación de las condiciones físicas y químicas del río Liberia*

El oxígeno disuelto tiene un papel relevante en la dinámica de los ecosistemas acuáticos como indicador de sus posibilidades de sobrevivencia en un punto y momento dados ya que es esencial para el sistema de transporte de electrones hacia la mitocondria, organela encargada en la proporción de la energía celular y balance iónico en los fluidos circulatorios ( Beita-Sandí & Barahona-Palomo, 2010). Se han establecido criterios alrededor del valor de 5,0 mg/L de O<sub>2</sub> o 60 % de saturación como concentración mínima promedio necesaria para mantener la vida acuática (Calvo & Mora, 2007).

Los resultados de las mediciones del porcentaje de saturación de oxígeno (PSO) se muestran en la figura 46. Los niveles de oxígeno en la subcuenca del río Liberia parecen no presentar un comportamiento que obedezca a variaciones espaciales ni temporales.

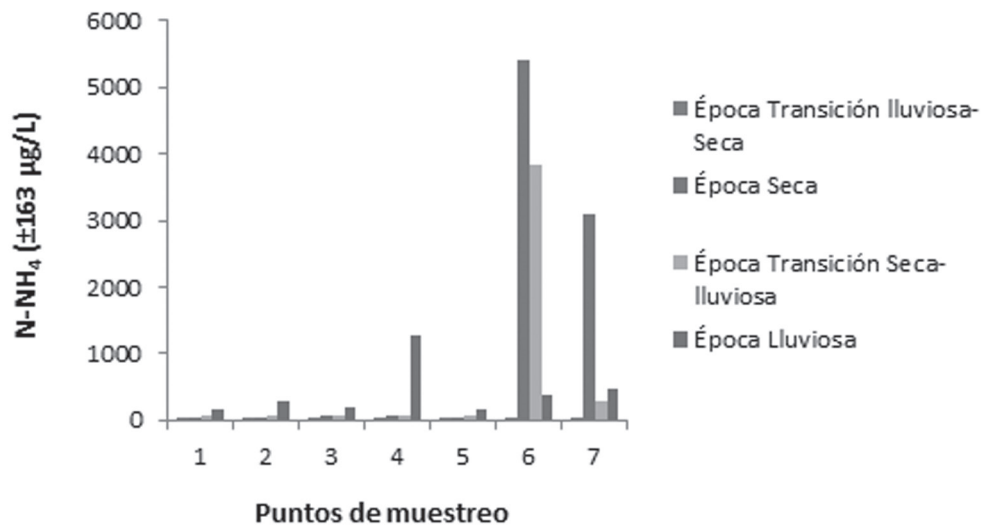
Figura 46. Oxígeno disuelto en el río Liberia, expresado en porcentaje de saturación (PSO), por punto y época de muestreo.



La figura 46 muestra que el porcentaje de saturación de oxígeno disuelto se ajusta, en general, a la realidad de las especies tropicales, donde el porcentaje ideal para muchos peces es mayor a 60 %, mientras que las concentraciones de oxígeno disuelto menores a 60%, como las observadas en la época Transición seca-lluviosa, pueden afectar adversamente la biodiversidad y la supervivencia de la comunidad biótica. También, concentraciones superiores a 100 % de saturación de oxígeno disuelto como las que se observan en el punto 1 PRL resultan peligrosas para la vida acuática, pues facilitan que burbujas de oxígeno bloqueen el flujo sanguíneo (Pérez-Castillo & Rodríguez, 2008).

El nitrógeno amoniacal es un parámetro muy importante ya que en su forma libre, como amoníaco es tóxico para los peces. Su presencia en los cuerpos de agua se debe a descarga directa o la degradación de la materia orgánica nitrogenada en las aguas residuales (Calvo & Mora, 2007). Según la U.S.EPA, el rango de concentración de amonio aceptable para el desarrollo de vida acuática en aguas superficiales se encuentra entre 2,20 – 5,33 mg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/L (EPA, 1998). En la figura 47 se observa que durante todas las épocas de muestreo y los primeros cinco puntos, los valores de concentración de amonio, se encuentran en el rango aceptable.

Figura 47. Nitrógeno amoniacal en el río Liberia, por punto y época de muestreo.

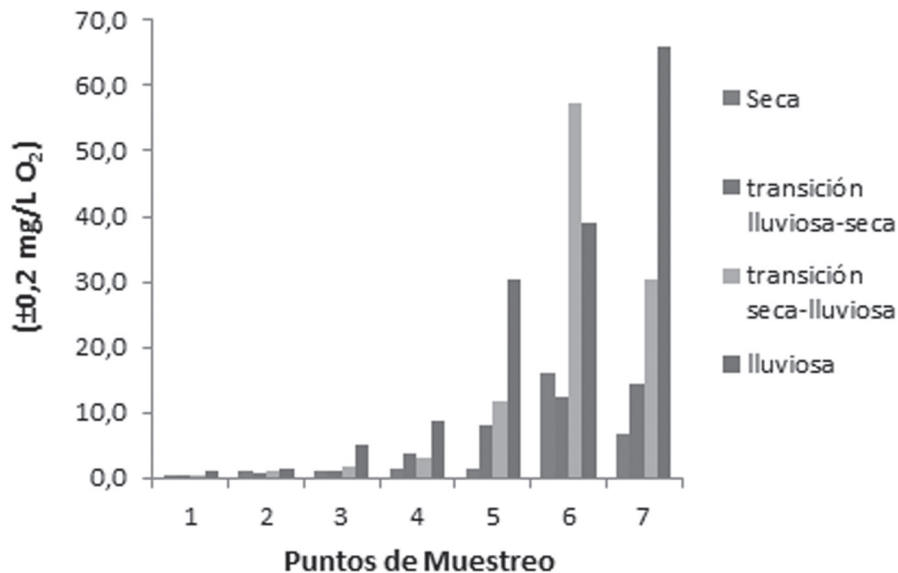


Sin embargo, se presenta un aumento considerable en la concentración de este nutriente en los puntos 6 PRL y 7 PRL durante la época seca, lo cual se atribuye a la descarga directa de las aguas residuales de la planta de tratamiento de aguas de la Ciudad de Liberia, además del aumento de la concentración de los contaminantes por la disminución de los patrones de precipitación propios de la época. El amonio es la forma de nitrógeno más abundante en aguas anóxicas; así mismo, es el primer producto de degradación del nitrógeno orgánico (Doods, 2002).

En los puntos de muestreo donde la concentración de amonio fue menor a  $1 \text{ mg NH}_4^+/\text{L}$ , la concentración de oxígeno superó los  $5 \text{ mg O}_2/\text{L}$ , indicando que los procesos de asimilación, descomposición y nitrificación predominaron y generaron una menor concentración de nitrógeno en su forma orgánica y amoniacal (Herrera, 2009).

Otro parámetro analizado fue la  $\text{DBO}_5$  (figura 48). Este es una medida de la cantidad de oxígeno usado por poblaciones microbianas del agua en respuesta a la introducción de material orgánico degradable. La materia orgánica se alimenta por las bacterias aeróbicas que requieren oxígeno, en este proceso la materia es degradada y oxidada. Esto provoca cambios en la vida acuática, pues mucho del oxígeno disuelto (OD) libre se consume por las bacterias aeróbicas, robando a otros organismos acuáticos el oxígeno necesario para vivir, así organismos más tolerantes a niveles bajos de OD pueden aparecer y volverse más abundantes, como la carpa, la larva jején y lombrices de drenaje (Cardona, 2003).

Figura 48. Demanda bioquímica de oxígeno, expresada en mg/L  $O_2$ , en el río Liberia, por punto y época de muestreo.



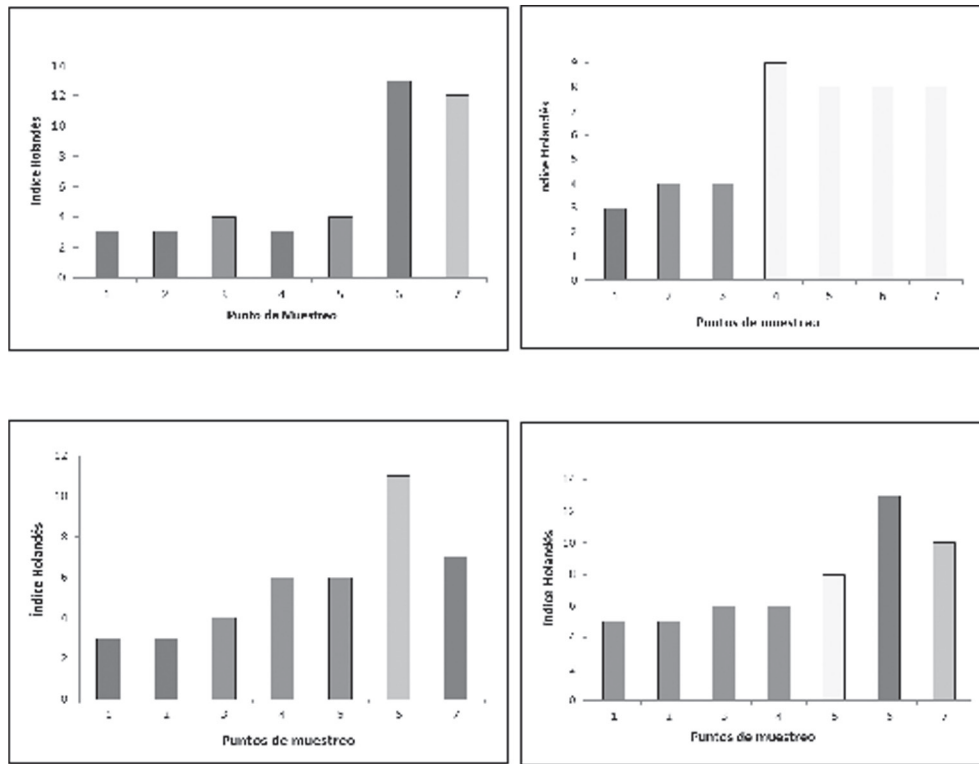
El valor medio de  $DBO_5$  obtenido en el total de muestras analizadas fue de 11,68 mg/L, un valor bastante alto ya que para aguas naturales superficiales lo recomendado es de 5 mg/L (Flanagan, 1992). El 57 % de las muestras evaluadas presentaron valores iguales o menores a 5 mg/L.

Los puntos de muestreo inferiores (5, 6, y 7) son los que presentaron valores mayores de  $DBO_5$ , lo que puede ser provocado por tres razones principales, la descarga de aguas residuales de la planta de tratamiento de aguas de la Ciudad de Liberia, el arrastre de materia orgánica ya sea por erosión de la ladera del río o por aportes de contaminantes de origen antrópico debido al aumento de la precipitación de la época lluviosa y descargas de aguas residuales de tipo ordinario y de desechos sólidos de viviendas circundantes al río ya que está ubicada en una zona totalmente urbana, dato que concuerda con menores valores de  $DBO_5$  en los sitios de muestreo que se encuentran alejados de poblaciones o éstas son pequeñas y dispersas (puntos 1, 2 y 3).

### Índice Holandés y análisis microbiológico

En la figura 49, se presenta el índice holandés para cada uno de los periodos de muestreo el cual reveló diferentes tendencias en cuanto a la calidad del agua. En general se observó que según este índice en la sección alta de la subcuenca específicamente los puntos 1 PRL y 2 PRL, no se presentó contaminación o únicamente presentó contaminación incipiente, en estos puntos se observó que la incidencia de contaminantes domésticos y agrícolas, tipo orgánico e inorgánico, es menor, debido a que estos puntos se encuentran dentro (1 PRL) o colindantes (2 PRL) a áreas de protectoras. Por otra parte, los niveles de contaminación de menor categoría fueron registrados en la sección media-baja de la subcuenca, lo anterior debido a que el río atraviesa una zona comercial y residencial, con aporte directo de fuentes de contaminación no puntuales como aguas residuales ordinarias, generadas por actividades domésticas y de venta de bienes y servicios, además de aguas de lavado de calles y aceras.

Figura 49. Variación del Índice Holandés en la Subcuenca del río Libera, por puntos de muestreo: a) época seca b) época lluviosa c) Transición época lluviosa-seca d) Transición época seca-lluviosa. Guanacaste, Costa Rica.



En Barrio Capulín (5PRL y 6PRL), el río cruza sólo un área residencial, y la principal fuente de contaminación puntual detectada fue la del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Ciudad de Liberia. Durante las cuatro épocas estudiadas estos dos puntos fueron los sitios más degradados en términos de calidad del agua según el índice holandés.

En cuanto a las diferencias encontradas entre épocas de muestreo, se observa que en los puntos situados en la parte media de la sub cuenca, principalmente en los puntos 6PRL y 7PRL, la calidad del agua mejoró durante la época lluviosa, pasando de contaminación muy severa y severa respectivamente a contaminación moderada, esto se debe que al aumentar los patrones de precipitación, aumenta el caudal del río y con ello ocurre un efecto de dilución de los contaminantes.

A pesar que el Índice Holandés es una herramienta sencilla y de fácil interpretación acerca de la calidad de los cuerpos de agua superficial y es el que actualmente se utiliza para la clasificación inicial o reclasificación de un cuerpo de agua según el Decreto 33903-MINAE-S, posee desventajas importantes entre las que sobresale, que no se considera, de manera directa, la contaminación por coliformes fecales, factor que es muy relevante en nuestro país dado que la mayoría de los cauces están seriamente contaminados por materia fecal, por lo que con el fin de complementar este estudio se realizó análisis de coliformes fecales, con el cual se reflejaron altas concentraciones por contaminación con materia fecal, que no obedeció a variaciones estacionales ni espaciales.

La contaminación fecal parece deberse principalmente al ingreso directo de aguas residuales del tipo ordinario y aguas de escorrentía, además de los aportes por infiltración de tanques sépticos o descargas directas desde los hogares hacia el río, sobre todo porque el uso del suelo a partir del punto 4 PRL que es en gran parte residencial y comercial, con pequeños aportes agrícolas e industriales, además del aporte generado por la planta de tratamiento de aguas residuales.



La mayor contaminación por microorganismos fecales en el tramo evaluado se presentó durante el período de transición seco-lluvioso, con un máximo de  $1,60 \times 10^5$  NMP/100 mL y el nivel más bajo de  $1,60 \times 10^3$  NMP/100 mL. Esto indica que desde el punto de vista bacteriológico, todas estas aguas estarían descalificadas para casi cualquier uso reglamentado en el Decreto 33661-MINAE-S, es decir, actividades recreativas y mucho menos para consumo humano a menos que se le proporcione un tratamiento físico y químico avanzado con desinfección. Sin embargo, durante otras épocas estacionales los coliformes fecales presentaron valores más bajos y de esta forma se amplía su uso en algunas secciones de la cuenca principalmente en los puntos 1 PRL y 2PRL a consumo humano con tratamiento simple y actividades recreativas de contacto primario.

### Índice RQI

En el cuadro 13 se presentan los puntajes y categorías asignadas en cada punto de muestreo en relación a las áreas ribereñas, mediante el cual se observa una tendencia hacia la disminución de la calidad de la ribera conforme se descendió en la subcuenca.

*Cuadro 13. Puntaje y calidad asignados por el índice RQI en las siete zonas de muestreo a lo largo de la subcuenca del río Liberia.*

Punto de muestreo	Índice RQI	
	Categoría	Puntaje
1 PRL	Muy bueno	104
2 PRL	Bueno	93
3 PRL	Regular	78
4 PRL	Bueno	82
5 PRL	Pobre	57
6 PRL	Pobre	49
7 PRL	Pobre	49

El alto puntaje obtenido en el punto de muestreo 1 se debió principalmente a que era un sector no urbanizado, con una composición ribereña más compleja que en las otras zonas de muestreo. En la zona predominaban árboles nativos que proporcionaban una cobertura vegetal más heterogénea. Otro factor beneficioso es que la comunidad más cercana se encuentra bastante alejada de este punto (a más de 12 km), además que no hay viviendas ni actividades de ninguna índole por tratarse de ser un área protegida, tal como lo establece la Ley de conservación de la vida silvestre (MINAE, 2005), lo cual evita la degradación de las riberas y propia que no se desarrollen actividades antropogénicas en los alrededores.

Al igual que el punto 1PRL el punto 2 PRL, obtuvo un puntaje alto. La escasa presencia de casas de habitación en la zona de muestreo y al estar ubicada dentro de una finca privada, resultó determinante en que la ribera se conservara en buen estado. No obstante, la calidad de la ribera pasó de categoría “muy buena” a “buena” debido a que se observó la presencia de vegetación levemente modificada por actividad humana, además que el suelo presentaba modificaciones inducidas por actividades humanas: la presencia de un camino y pequeños senderos o espacios compactados por estancia o paso de ganado, vehículos o actividades recreativas.

A partir del punto 3 PRL se evidencia el impacto de las actividades antrópicas, ya que es notable la falta de cobertura arbórea, suelos altamente impactados y erosionados, notable y creciente acumulación de residuos sólidos ordinarios e infectocontagiosos aunado a vertidos de aguas residuales de

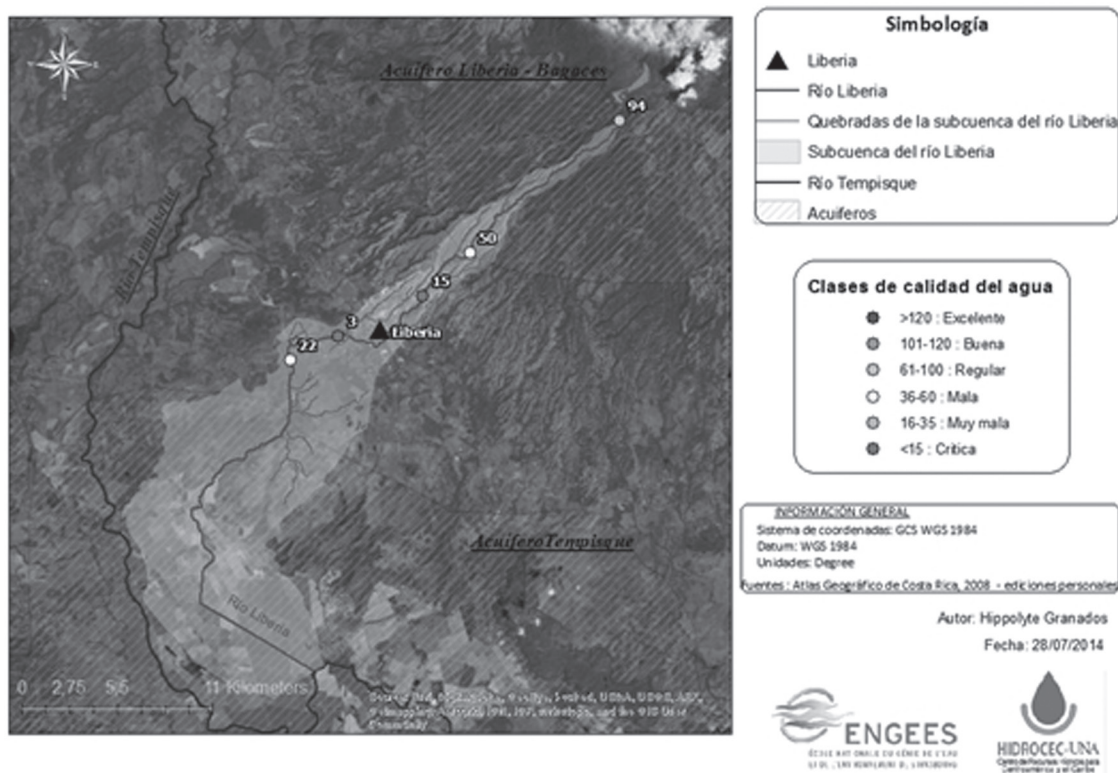
tipo ordinario, dada la cercanía de casas a la orilla de la ribera (menos de 100 m), irrumpiendo con lo que establece la ley forestal (MINAE, 1996).

La sección baja de la cuenca específicamente los puntos 5 PRL, 6PRL y 7 PRL, se les ubicó en la categoría de “pobre”, debido a que se encuentran específicamente en la ciudad de Liberia y además cambian las condiciones climáticas con la altura (la altitud cambia más de 500 m), lo que facilita que la vegetación observada sea diferente a la de la parte alta de la subcuenca, el ser una zona totalmente urbana y la presencia de la planta de tratamiento de aguas residuales, provocando serios cambios en la composición y estructura de la vegetación ribereña, condiciones de las orillas y de la conectividad de la ribera con el cauce.

### Índice BMWP>-CR

Los niveles de calidad obtenidos mediante la aplicación del índice BMWP’-CR para cada uno de los puntos de muestreo se presentan en la figura 50, la cual revela que la calidad tiende a decrecer aguas abajo, variando de regular en el punto 1 PRL a muy mala en el punto 7 PRL. No obstante, los resultados de este indicador obtenidos alcanzaron niveles críticos en los puntos 3 PRL y 5 PRL. Es importante mencionar que no se muestrearon macroinvertebrados en los puntos 4 PRL ni el 6 PRL debido a la condición insalubre observada en estos tramos del río y por consiguiente se busca también procurar la seguridad de los muestreadores.

Figura 50. Variación del Índice BMWP’-CR en la Subcuenca del río Liberia, por puntos de muestreo (1 PRL, 2 PRL, 3 PRL, 5PRL, 7PRL).



Los organismos bentónicos más comunes en la sección alta de la cuenca (1 PRL y 2 PRL), fueron de las familias *Hydropsychidae*, *Leptophlebiidae*, *Pyralidae*, *Elmidaey* *Perlidae*, con variados hábitos tróficos entre ellos chupador-detritívoros, detritívoros, masticadores, detritívoros y masticadores res-

pectivamente. Estas son familias que se asocian a niveles de tolerancia a la contaminación más bajos, según los puntajes asignados en el Reglamento para la Clasificación y la Evaluación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales (2007).

Aunque con poca frecuencia de individuos, el punto 3 PRL presentó una mediana riqueza de familias: *Tubificidae* (colector-detritívoro), *Gomphidae* (depredador), *Heptageniidae* (cortador) y *Lillubidae* (depredador).

Por su parte en la sección baja (5 PRL y 7 PRL) dominaron las taxas reconocidamente más tolerantes a la contaminación como *Thiaridae* (picador-chupador) y *Chironomidae* (colector-raspador) capaces de habitar por extensos periodos en aguas con concentraciones muy bajas de oxígeno (Figuroa, Valdovinos, Araya, & Parra, 2003).

Los resultados obtenidos aplicando el BMWP-CR complementan los obtenidos con el Índice Holandés y el Índice de condición ribereña, las familias de macroinvertebrados acuáticos indicaron los puntos con mayor alteración, principalmente provocado por las actividades humanas desarrolladas en la cuenca. Esto demuestra la fuerte interrelación existente entre el ecosistema urbano y terrestre con el ecosistema acuático.

## IV. Conclusiones y recomendaciones

La observación de los parámetros evaluados en este estudio ha pretendido integrar la condición natural del río Liberia que se presentó en el año 2013, en sus componentes de la calidad de sus aguas – a través de los análisis físico-químicos, microbiológicos y biológicos realizados – así como de su componente de conectividad ecológica con el área ribereña. Esto se realizó considerando tanto la variable dada por el régimen hidrometeorológico, como la variable dada por el uso del suelo y por ende del impacto de la actividad humana conforme el río fluye de la parte alta a la parte media baja.

Se estudió las cuatro estaciones climáticas del año y por esto se pueden definir tendencias de los parámetros e índices aplicados, de aquí la importancia de continuar con el monitoreo de la calidad del agua del río. Sin embargo, se pudo constatar que existe un proceso de degradación general de la condición natural del río Liberia conforme se presentan asentamientos o actividades humanas y que su impacto se incrementa durante la época seca y la transición seca-lluviosa.

Los puntos en la parte alta de la cuenca fueron los que presentaron mejores condiciones, con menos afectaciones naturales por el transporte de sedimentos y de materia orgánica, mejor condición de las áreas ribereñas, los parámetros físico-químicos, microbiológicos y biológicos.

Se pudo evaluar el impacto negativo de la Ciudad de Liberia y especialmente al cruzar el Barrio Capulín (donde vierte la planta de tratamiento de aguas residuales) sobre el ecosistema acuático, lo cual se expresó en todos los parámetros evaluados: una degradación de la condición de las áreas ribereñas; un Índice Holandés que se mantiene al menos regular llegando a niveles muy pobres; una contaminación fecal que impide -especialmente en la transición seca-lluviosa-, la mayor parte de los usos y representa un riesgo para la salud pública; y un comportamiento similar del índice BMWP-CR.

Además de la degradación de los parámetros evaluados, la ciudad de Liberia genera una evidente contaminación por residuos sólidos que se observa de manera creciente una vez que ingresa al centro de población. Este tema es de gran preocupación y es urgente la toma de medidas que hagan cumplir la Ley para la Gestión Integral de los residuos sólidos 8839.

Desde el punto de vista científico, es posible profundizar los alcances de esta iniciativa realizando el análisis de los indicadores evaluados a través del tiempo, con el fin de obtener datos que permitan un mayor análisis estadístico y, por ejemplo, la aplicación de modelos de evaluación de carga de contaminantes, evaluación de los sedimentos en cuanto a contaminación, monitoreo del caudal empleando instrumentos de medición in situ y la ubicación de estaciones de lectura continua. Esto podría contribuir en la comprensión de las dinámicas de dilución, concentración y transporte de contaminantes, sedimentación, como de posibles procesos de deriva o movimiento de macroinvertebrados bentónicos aguas abajo. Así mismo, es pertinente abordar el estudio de sustancias tóxicas y/o contaminantes emergentes, así como metales pesados, fertilizantes, plaguicidas, antibióticos y hormonas, entre otros.

Desde el punto de vista de la gestión integrada del cuerpo de agua, el monitoreo de la condición ecológica del río es una herramienta útil para la medición de los potenciales impactos positivos que se generen, por acciones dirigidas desde los actores involucrados en la gestión territorial para el mejoramiento ambiental de la Subcuenca del río Liberia, potenciando así la pertinencia de la toma de decisiones.

## Referencias

Beita-Sandí, W., & Barahona-Palomo, M. (2010). Físico-química de las aguas superficiales de la Cuenca del río Rincón, Península de Osa, Costa Rica. *Cuadernos de Investigación UNED*, 2(2), 157-179.

Alba-Tercedor, J. (1996). Macroinvertebrados acuáticos y calidad de las aguas de los ríos. *IV Simposio del Agua en Andalucía (SIAGA)*, 203-213. Almería.

Alberti, M., & Parker, J. D. (1991). Indices of environmental quality: the search for credible measures. *Environmental Impact Assessment Review*, 95-101.

Alvarado, L. F., Contreras, W., Alfaro, M., & Jiménez, E. (2012). *Escenarios de cambio climático regionalizados para Costa Rica*. San José: Instituto Meteorológico Nacional.

APHA, AWWA, WEF. (2012). *Standard Methods for examination of water and wastewater* (22 nd ed.). Washington: American Public Health Association.

Calvo, G., & Mora, J. (2007). Evaluación y clasificación preliminar de la calidad del agua de la cuenca del río Tárcoles y el Reventazón. *Tecnología en Marcha*, 20-2, 1-9.

Cardona, J. (2003). *Calidad y riesgo de contaminación de las aguas superficiales en la microcuenca del Río La Soledad, Valle de Angeles, Honduras*. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE.

Couillard, D., & Lefebvre, Y. (1985). *Analysis of water-quality indices*. United States: J. Environ. Manage.

Del Tánago, M. G., De Jalón, D. G., & Directive, W. F. (2006). Índice RQI para la valoración de las riberas fluviales en el contexto de la directiva marco del agua. *Ingeniería Civil*, 97-108.

Doods. (2002). *Freshwater Ecology Concepts and Environmental Applications*. Estados Unidos: Academic Press.

EPA. (1998). *National Recommended Water Quality Criteria*. United States Of America: Agency Protection Ambiental.

Figuerola, R., Valdovinos, C., Araya, E., & Parra, O. (2003). Macroinvertebrados bentónicos como indicadores de calidad de agua de. *Revista Chilena de Historia Natural*(76), 275-285.

Flanagan. (1992). *Parameters of Water Quality* (2 nd ed.). Irlanda: Environmental Research Unit.

González, M., García, D., Lara, F., & Garilletei, R. (2006). Índice RQI para valoración de las riberas fluviales en el contexto de la directiva marco del agua. *Ingeniería Civil*(143), 97-108.

Herrera, J. (2009). *Caracterización preliminar de la eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales del Campus Omar Dengo y su impacto sobre el cauce receptor del Río Pirro*. Heredia: Universidad Nacional.

IMN. (01 de 01 de 2009). *Instituto Meteorológico Principal, Página Principal*. Recuperado el 30 de 06 de 2014, de Datos Climáticos: [http://www.imn.ac.cr/IMN/MainAdmin.aspx?\\_\\_EVENTTARGET=Clima-Ciudad&CIUDAD=4](http://www.imn.ac.cr/IMN/MainAdmin.aspx?__EVENTTARGET=Clima-Ciudad&CIUDAD=4)

INEC, I. d. (25 de Abril de 2014). *Instituto de Estadística y Censo*. Obtenido de Instituto de Estadística y Censo: <http://www.inec.go.cr/Web/Home/pagPrincipal.aspx>

Instituto de Estadística y Censo. (01 de Enero de 2010). *Página Principal*. (INEC) Recuperado el 25 de Abril de 2014, de <http://www.inec.go.cr/Web/Home/pagPrincipal.aspx>

Kowalkowski, T., Zbytniewski, R., Szpejna, J., & Buszewski, B. (2006). Application of chemometrics in river water classification. *Water Research*, 744-752.

Mateo-Vega, J. (2001). *Características generales de la cuenca del Río Tempisque. La cuenca del Río Tempisque: perspectivas para un manejo integrado*. San José: OET.

MINAE. (16 de 04 de 1996). Ley Forestal. *Diario Oficial La Gaceta*, págs. 1-8.

MINAE. (20 de 09 de 2005). Ley de conservación de vida silvestre. *Diario Oficial La gaceta*, págs. 6-23.

MINAE. (17 de Septiembre de 2007). Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de aguas superficiales. *Diario Oficial la Gaceta*, págs. 2-5.

Mora, D., & Portugués, C. (2011). *Agua en sus diferentes usos en Guanacaste*. San José: Acueductos y Alcantarillados.

Pérez-Castillo, A., & Rodríguez, A. (2008). Índice fisicoquímico de la calidad de agua para el manejo. *Revista de Biología Tropical*, 56 (4), 1905-1918.

Pratt, J., R.A., C., & P.J., G. (1981). Ecological effects of urban stormwater runoff on benthic macroinvertebrates inhabiting the Green River. *Hydrobiologia*, 29-42.

Resh, V. H., Myers, M., & Hannaford, M. (1996). Macro invertebrates as biotic indicators of environmental quality. *Methods in Stream Ecology*. Academic Press., 647-667.

Sawyer, J. A., Stewart, P. M., Mullen, M., Simon, T., Bennett, H., & Simon, T. (2004). Influence of habitat, water quality, and land use on macro-invertebrate and fish assemblages of a southeastern coastal plain watershed. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 85-99.

Springer, M., Hanson, & Ramirez. (2010). *Adaptación del índice BMWP a Costa Rica*. San José: UCR.





# Uso potencial de los nutrientes de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales mediante microalgas

Ing. Ana M. Bauer-Maegli<sup>a,17</sup>  
Ing. Irais San Luis-Xelhuantzi<sup>a</sup>  
Dr. Gibrán S. Alemán Nava<sup>a</sup>,  
Dr. Alejandro Montesinos-Castellanos<sup>b</sup>  
Dr. Roberto Parra<sup>a</sup>

## Resumen

El tratamiento de aguas residuales ha sido objeto de estudio desde hace muchos años, pero las microalgas han demostrado tener potencial para mejorar el tratamiento de agua haciendo este proceso sostenible y valioso. Esta investigación tiene el objetivo de comparar el aprovechamiento de nutrientes por *Chlorellavulgaris* en cuatro diferentes efluentes industriales de una planta de tratamiento de aguas residuales. Los efluentes, provienen de clarificador primario, reactor anaeróbico, reactor aerobio, y clarificador secundario, estos fueron caracterizados y luego se estudió el crecimiento de *Chlorellavulgaris* en cada efluente para estudiar la remoción de DQO y fósforo, así como una comparación de las tasas de crecimiento, densidades ópticas y contenido de clorofila. Los resultados mostraron que el efluente del clarificador primario obtuvo la eliminación de DQO más alta (85%) y el clarificador secundario la eliminación de fósforo más alta (93%). En cuanto a las tasas de crecimiento de microalgas, el efluente del clarificador secundario también mostró que la tasa de crecimiento es más elevada ( $0,7662 \text{ d}^{-1}$ ), pero el reactor anaeróbico alcanzó el más alto  $\text{OD}_{750}$  (1.2). El cultivo de microalgas en el efluente del reactor anaerobio mostró la mayor concentración de biomasa. Esto da muestra de que la eliminación de nutrientes por los cultivos de microalgas es una opción atractiva para el tratamiento de aguas residuales.

**Palabras clave:** microalgas, efluente industrial, nutrientes, fósforo.

## Potential use of nutrients from industrial wastewater treatment plant by microalgae

### Abstract

Wastewater treatment had been study for many years but microalgae had appeared to have the potential to help with this problem and also be a sustainable process because of valuable products developed from them. This research follows the aim of comparing the use nutrients by *Chlorella vulgaris* on four different industrial effluents from a wastewater treatment plant. The effluents, which come from primary clarifier, anaerobic reactor, aerobic reactor, and secondary clarifier, were characterized and then studied by growing *Chlorella vulgaris* on each effluent looking for COD and phos-

<sup>17</sup> <sup>a</sup>Cátedra de Bioprocesos Ambientales, Centro del Agua para América Latina y el Caribe, Tecnológico de Monterrey, Av. Eugenio Garza Sada 2501 South, Col. Tecnológico, C.P. 64849, Monterrey N.L., México

<sup>b</sup>Departamento de Ingeniería Química, Tecnológico de Monterrey, Av. Eugenio Garza Sada 2501 South, Col. Tecnológico, C.P. 64849, Monterrey N.L., México

\*Autor para correspondencia: r.parra@itesm.mx, Teléfono: (52-81) 8358 2000 Ext. 5561-105, Dirección: Eugenio Garza Sada 2501, Col. Tecnológico, 64849 Monterrey, Nuevo León

phorous removal as well as a comparison of growth rates, optical densities and chlorophyll content. Results showed that primary clarifier effluent obtained the highest COD removal (85%) and secondary clarifier the highest phosphorous removal (93%). As for microalgae growth rates, secondary clarifier effluent also showed the highest growth rate ( $0.7662 \text{ d}^{-1}$ ) but anaerobic reactor reached the highest  $\text{OD}_{750}$  (1.2). Microalgae cultivation in anaerobic reactor effluent showed the highest biomass concentration. This results shows that nutrient removal by microalgae cultivations is an attractive option for wastewater treatment.

**Keywords:** microalgae, industrial effluents, phosphorus.

## I. Introducción

Como se sabe, la gestión de las aguas residuales es un problema mundial que afecta a casi todas las regiones del mundo, siendo casi el 70% de la contaminación de las aguas causada por los desechos de la industria (Naturaleza, nd). Se estima que hay una producción global de aguas residuales de  $1,500 \text{ km}^3$  por día, 2 millones de toneladas de agua por día se descargan a diferentes cuerpos de agua desde desechos industriales y químicos, residuos agrícolas, entre otros (Zandaryaa, nd). En México, 54% de las aguas residuales no tratadas se lleva directamente a los ríos y arroyos (Prensa, De, y Ambiente, 2013). Este no es el único problema, la crisis energética y búsqueda de nuevas tecnologías, sobre todo usando fuentes renovables para satisfacer la demanda de energía y los requisitos de energía más bajos, ha incrementado (Aleman-Nava *et al*, 2014; González-Fernández, Riaño-Irazábal, Molinuevo-Salces, Blanco, y García-González, 2011).

Las aguas residuales generadas por la industria agrícola y alimentaria tienen características distintas a las aguas residuales municipales comunes gestionadas por las plantas de tratamiento de aguas residuales públicas o privadas en todo el mundo. El agua residual agrícola y de alimentos es biodegradable y no tóxica, con una alta concentración de demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno y fósforo (Mayer, Smeets, Braun, y Fuchs, 2009).

Los tratamientos de aguas residuales más comunes involucran procesos aeróbicos y anaeróbicos. La digestión anaerobia (DA) es una tecnología madura que utiliza microorganismos para descomponer los residuos orgánicos y producir biogás. Muchos sistemas de DA se han construido en los países europeos y los EE.UU. para el tratamiento de residuos urbanos, industriales y agrícolas. Los esfuerzos se han centrado en la optimización de la producción de biogás y la degradación de los sólidos volátiles (Mayer *et al.*, 2009). Nuevos métodos de recuperación de nutrientes eficientes y rentables deben ser considerados con el fin de reducir el riesgo de contaminación por nitrógeno y fósforo de DA. En comparación con las aguas residuales agrícolas, municipales e industrial típicas, los efluentes de DA tienen los niveles de carbono relativamente más bajos debido a que la actividad microbiana durante la digestión convierte el carbono a metano (L. Wang *et al.*, 2010). El nitrógeno en el efluente DA es principalmente en forma de amonio (Singh, Reynolds, y Das, 2011). Por otro lado, el proceso aeróbico obtiene todo el carbono orgánico y nutrientes de fuentes externas y utiliza oxígeno para metabolizar una porción de estos compuestos orgánicos para producir energía y promover el crecimiento microbiano (Elliot T., nd). Una vez que el influente pasa a través de la digestión aeróbica y anaeróbica, las aguas residuales llegan a los clarificadores secundarios. Estos decantadores son el último paso para lograr un efluente bien clarificado, estable, bajo en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y sólidos suspendidos (Barsanti y Gualtieri, 2006). Mientras que el tratamiento biológico reduce la DBO de los efluentes de agua 75-90%, se ha reportado que los niveles de nitrógeno y fósforo no se reducen en el tratamiento de aguas residuales convencional.

Por lo anterior, las propiedades de aguas residuales parecen ser una buena fuente de nutrientes para las microalgas. Estos microorganismos muestran un uso potencial en el tratamiento de aguas

residuales, demostrado por su alta tasa de fotosíntesis, la capacidad de absorción de CO<sub>2</sub> y nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo), y la capacidad de adsorción de metales pesados utilizando la luz como fuente de energía. El uso de algas como fertilizantes y alimentos ha sido establecido desde la antigüedad. Teniendo en cuenta la creciente necesidad de alimentos, bioenergía, productos farmacéuticos y compuestos de cosméticos, se ha prestado una especial atención en la última década a los recursos sostenibles que no compiten con los recursos alimenticios habituales (Mimouni *et al.*, 2012). Las microalgas son muy buenos candidatos para tal propósito y su larga diversificación evolutiva y adaptativa ha llevado a una amplia y diversa serie de componentes bioquímicos (Mimouni *et al.*, 2012). Además, las microalgas ofrecen un alto potencial para mitigar el CO<sub>2</sub> (Cuellar-Bermúdez, García-Pérez, Rittmann, y Parra-Saldivar, 2014) haciendo de esta opción una tecnología prometedora.

Estudios previos han mostrado que las microalgas son capaces de ofrecer diferentes tipos de biocombustibles renovables como el biogás, biodiesel y biohidrógeno (Métodos, 2007; Ryckebosch *et al.*, 2013.). El uso de microalgas para la producción de biocombustibles nos permite encontrar una alternativa al combustible de petróleo, proporciona nuevas oportunidades para las modificaciones de combustible, aumenta el número de trabajadores agrícolas entre la población, y promueve la seguridad del abastecimiento energético (Varfolomeev y Wasserman, 2011).

Por otro lado, se encuentran reportados estudios sobre el tratamiento de efluentes de cervecerías con microalgas mostrando que este tipo de efluentes contienen concentraciones suficientes de nitrógeno y fósforo para el cultivo de microalgas. Actualmente, las microalgas se han aplicado para el tratamiento de los efluentes como consorcios para tratar y eliminar el nitrógeno, el fósforo y la demanda química de oxígeno con una alta eficiencia (Raposo *et al.*, 2010). Otros experimentos que describen los tratamientos más eficientes fueron esos bajo condiciones de cultivo de aireación aumentada por la actividad fotosintética de que las microalgas, resultando en valores superiores de biomasa y mayor remoción de DQO (Mata, Melo, Simões, y Caetano, 2012).

Estudios anteriores mostraron otro experimento en aguas residuales de una granja porcina, donde los investigadores estudiaron el potencial y las limitaciones de la oxigenación fotosintética en la eliminación de carbono y nitrógeno de los purines porcinos en experimentos por lotes utilizando *Chlorellasorokiniana* y un lodo activado ambientado como microorganismos modelo. Los resultados mostraron que la microalga *Chlorellasorokiniana* era capaz de llevar a cabo la degradación a tasas y eficiencias comparables a los sistemas de lodos activados (González, Marciniak, Villaverde, García-Encina, y Muñoz, 2008). Otra investigación seguida de la Noue y Basseres en las aguas residuales de la granja porcina, llegó a la conclusión de que la microalga *Chlorella* sp., era el mejor candidato para crecer al aire libre debido a su tolerancia a los cambios ambientales (González-Fernández *et al.*, 2011). Beneficios adicionales observados del empleo de microalga son la baja energía que se consume en el proceso, ya que es una tecnología de energía solar y la biomasa producida se puede utilizar para compensar los costos del proceso. (González-Fernández *et al.*, 2011). Más estudios sobre la degradación de la materia orgánica y el desarrollo de consorcios microalga-bacterias en el tratamiento de purines porcinos mostraron que los consorcios han probado ser eficaces en la eliminación de nutrientes y materia orgánica, mientras se recupera de carbono, nitrógeno y fósforo a través de la captación de biomasa (González-Fernández *et al.*, 2011).

*Chlorella vulgaris* también se ha utilizado en otros estudios para eliminar los nutrientes en las aguas residuales. La eficiencia de eliminación de nitrógeno y fósforo a partir del crecimiento de *Chlorella* sp., varía de 8 a 100%. Además, los estudios muestran que *C. vulgaris* tienen eficiencias de remoción de nutrientes más altos que *Chlorella kessleri* cuando se comparan los resultados en medios artificiales. Una eliminación excepcionalmente baja de nutrientes se encontró en el crecimiento de *C. kessleri* en el que las microalga se sometieron a las aguas residuales artificiales por una cantidad relativamente pequeña de tiempo (Cai, Park, y Li, 2013). En otros estudios, *Chlorella spp.* mostró eficiencia

de remoción de nitrógeno de 23-100%, mientras que la eficiencia de eliminación de fósforo fue de 20-100% (Mayer *et al.*, 2009). El objetivo de este estudio es comparar el crecimiento y la utilización de nutrientes por *Chlorella vulgaris* en clarificador primario, reactor anaeróbico, reactor aeróbico y el efluente del clarificador secundario de una planta de tratamiento de aguas residuales industriales.

## II. Materiales y Métodos

### a. Muestreo del efluente

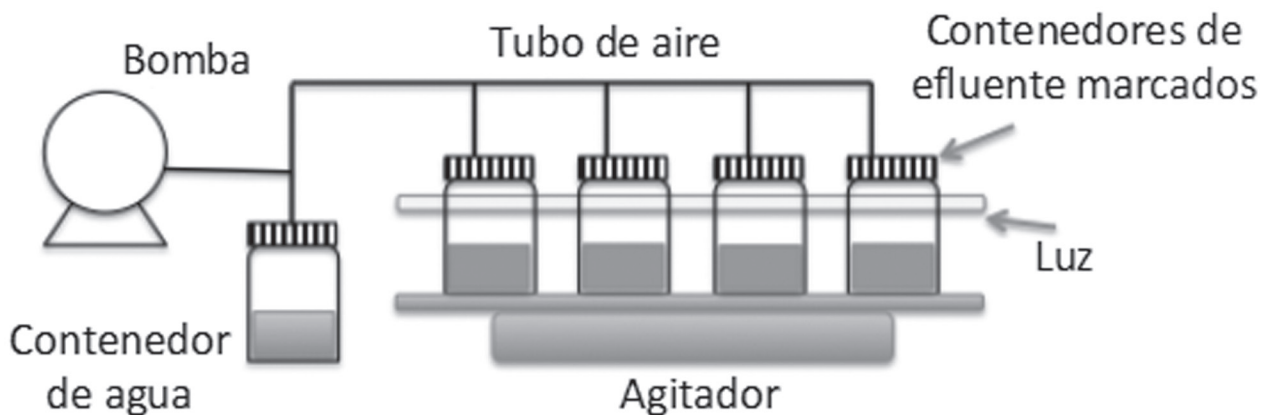
Las muestras de efluentes fueron tomadas en la planta de tratamiento de aguas residuales industriales con sede en Nuevo León, México, latitud y longitud de 25° 41' 47.9" N y 100° 18' 43.5" W.

Se tomaron muestras en recipientes de plástico de clarificador primario (C. primario); reactor anaeróbico (R. anaeróbico), reactor aeróbico (R. aeróbico), y el reactor clarificador secundario (C. secundario). Al menos 3 L de los efluentes fueron tomados. La caracterización del efluente se realizó tomando aproximadamente 500 ml de cada uno. Cada efluente se filtra dos veces con filtros Whatman de grado GF / A, con un tamaño de poro de 1,6 micras para una posterior caracterización.

### b. Cultivo de microorganismos

Se utilizó *Chlorella vulgaris* para estudiar el uso de nutrientes en estos efluentes. La concentración de microalga inicial se fijó en una densidad óptica medida a 750 nm (OD750) a 0,1 y un volumen de 300 ml. Las muestras se expusieron a una intensidad de luz constante de 5000 lux y una temperatura de 26 ° C durante 14 días, la agitación se fijó en 150 rpm en un agitador Thermo Scientific Model 4314 y un sistema de burbujeo. La figura 51 muestra resumidamente el proceso del experimento.

Figura 51. Esquemmatización del experimento



### c. Biomasa y cinética de nutrientes

#### i. Densidad óptica (DO)

Una muestra por duplicado diaria y homogénea de 2 ml del cultivo fue medida con el espectrofotómetro UV-VIS HACH a DO de 750 y 680. Las muestras fueron diluidas cuando fue requerido.

## ii. Rendimiento cuántico (RC)

En una célula, una muestra diaria fue tomada del cultivo homogéneo de 2 ml. Con el fin de obtener una medición precisa RC, la concentración de microalga se diluyó hasta una DO de 750 entre 0,0 y 0,5. La muestra se dejó en la oscuridad durante 10 min. La medición de RC se realizó con un Aquapen AP 100 Modelo SN-AP-216.

## iii. Muestreo de nutrientes

Se tomó una muestra homogénea de 15 ml fue tomada y se centrifugó durante 5 minutos a 4000 rpm con el fin de realizar la medición de nutrientes. Las muestras se congelaron a  $-20^{\circ}\text{C}$  para su posterior análisis.

### d. Cuantificación de fósforo total y DQO

Se utilizaron los sets de análisis de nutrientes Kits Hach de "Total Phosphorous Test 'N Tube™ (Prueba de tubo N de fósforo total), para la caracterización de efluentes y para el seguimiento de la eliminación de nutrientes.

## III. Teoría/cálculos

### a. Tasas de crecimiento específicas, $\mu$

El crecimiento exponencial se describe por:

$$\mu = \frac{\ln X_f}{\ln X_o} \quad \text{Ec. 1}$$

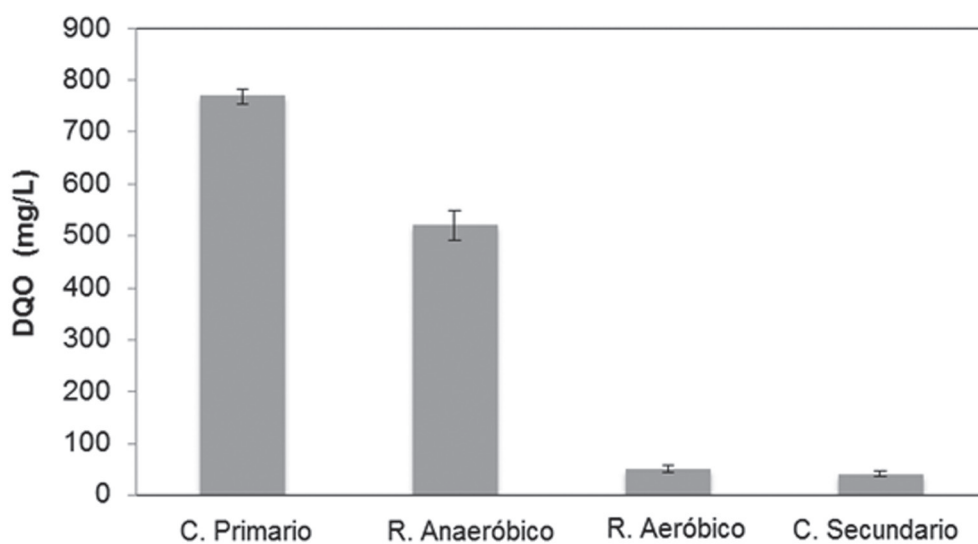
Donde  $X_f$  es la concentración final ( $\text{DO}_{750}$ ),  $X_o$  es la concentración inicial ( $\text{DO}_{750}$ ),  $t_f$  es el tiempo final,  $t_o$  es el tiempo inicial y  $\mu$  ( $\text{d}^{-1}$ ) es la tasa de crecimiento específica. Si se lineariza la ec.1,  $\mu$  es la pendiente en la etapa de crecimiento exponencial.

## IV. Discusión y Resultados

### a. Caracterización del efluente

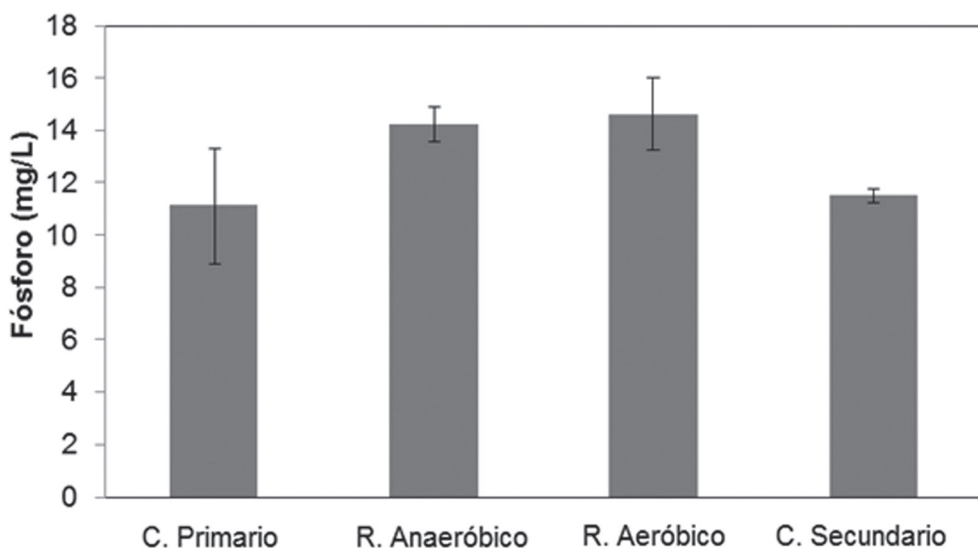
La figura 52 muestra las concentraciones DQO en los diferentes efluentes. La más alta DQO fue encontrada en el clarificador primario con 770 mg / L, seguido del reactor anaeróbico con 520 mg / L, el reactor aeróbico con 49 mg / L y el clarificador secundario con la concentración más baja de 39 mg / L. Se muestra que la DQO disminuye a medida que progresa el proceso de tratamiento.

Figura 52. Concentración de DQO en el clarificador primario, reactor anaeróbico, reactor aeróbico y el clarificador secundario.



Por otro lado, las concentraciones de fósforo se pueden observar en la figura 53 La concentración más alta se encontró en el reactor aeróbico con 14,65 mg / L, seguido del reactor anaeróbico con 14,25 mg/L, el clarificador secundario con 11,55 mg / L y el clarificador primario con la concentración más baja de 11,15 mg / L. Las concentraciones parecen aumentar en reactores anaerobios y aerobios y disminuyen en el clarificador primario y secundario.

Figura 53. Concentración de fósforo en el clarificador primario, reactor anaeróbico, reactor aeróbico y el clarificador secundario.



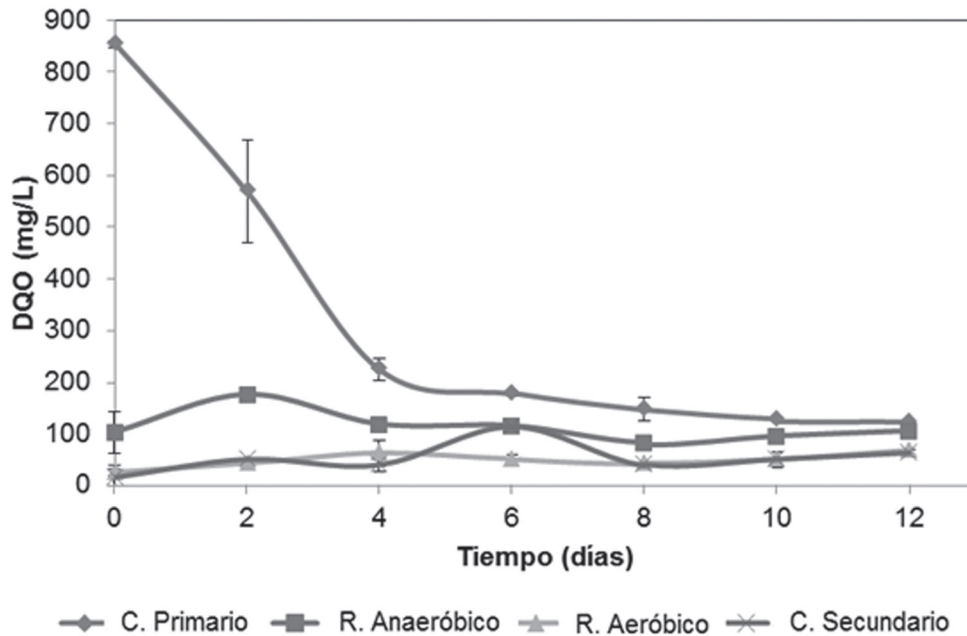
*b. Remoción de fósforo y DQO*

La figura 54 muestra remoción de DQO durante los 14 días de cultivo de microalgas. El clarificador primario mostró la eliminación de la DQO más alta (85%), que también presentó la concentración más alta de DQO 855 mg / L. La remoción de DQO fue más rápida durante los primeros 4 días, donde se eliminó el 73% de la misma. Para el reactor anaeróbico, el reactor aerobio y segundo clarificador



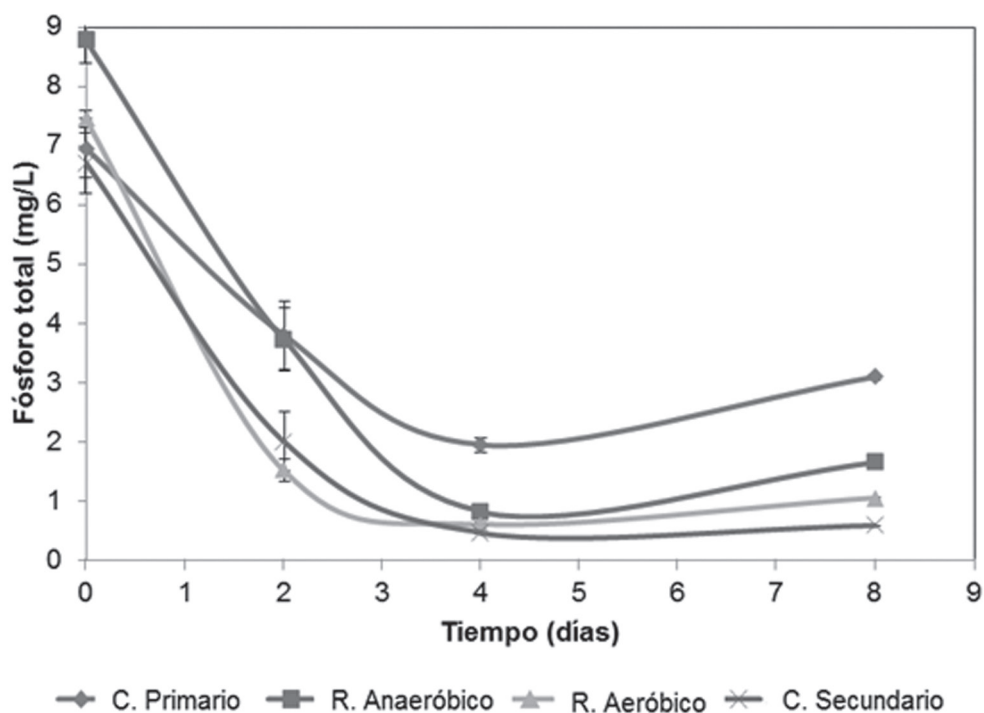
el comportamiento no es tan alto como en el C. primario, todos ellos muestran una ligera tendencia a aumentar de 0 a 3 veces su concentración inicial así que se piensa que aún había presencia de microalga en las muestras. Esto podría haber ocurrido debido a los tiempos de centrifugación cortos de las muestras.

Figura 54. Remoción de DQO durante el cultivo de microalgas.



En cuanto a la eliminación de fósforo, se puede observar clara tendencia a la remoción de fósforo en la figura 55. La extracción más alta de fósforo se logró desde el día 0 al día 4, en el que C. secundario tenía la mayor remoción total fósforo con el 93% y la más baja el C. primario con 45,3%. Desde el día 4 al día 8, el comportamiento del fósforo mostró un ligero aumento en la concentración, se piensa que en el día 4 los medios de efluente ya habían alcanzado un valor aproximado de 0,0 mg / L.

Figura 55. Remoción de fósforo por *Chlorella vulgaris*.



Los resultados de DQO obtenidos se compararon con los resultados encontrados en la literatura de los estudios anteriores sobre el crecimiento del alga *Chlorella* en el tratamiento de aguas residuales. La remoción de DQO más alta en este experimento fue de 85%, más alta que el reportado en la literatura con eficiencia de remoción de 54-60% (McGriff y McKinney, 1972; Liang Wang et al, 2010.). La remoción de fósforo de 93% fue similar con otros estudios en las mismas concentraciones iniciales (Chan, 2011; Liang Wang et al, 2010.). El fósforo observado en la Figura 52, se puede comparar con la eficiencia teórica, donde este estudio muestra mayor eliminación (71-93%) que otros trabajos con aguas residuales industriales (20-53%) (Chan, 2011).

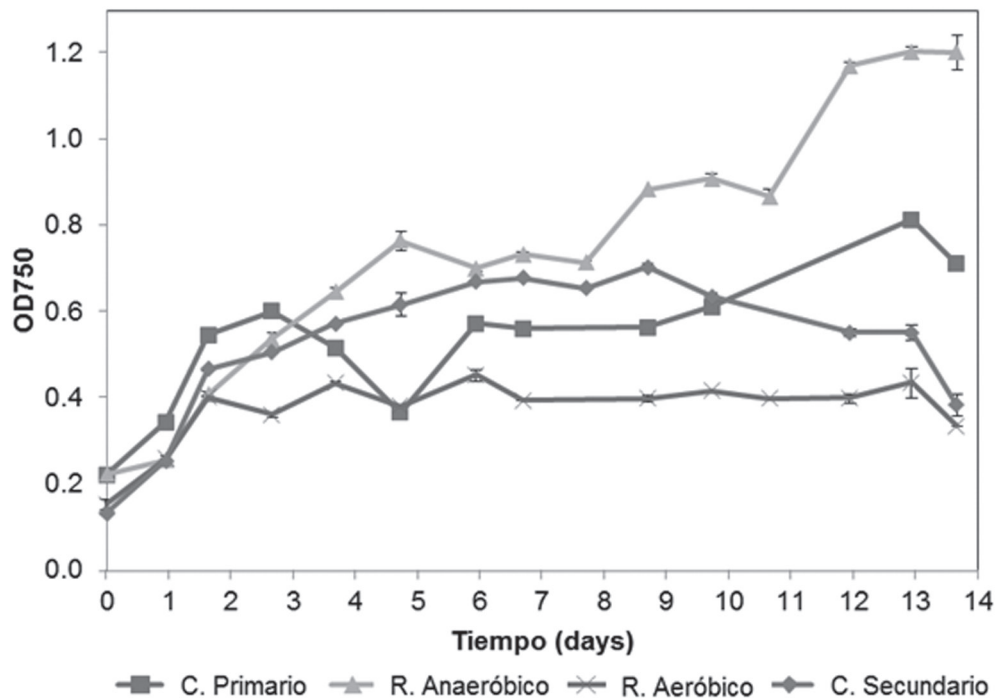
### c. Cinética de crecimiento

Los resultados de que se linealizara la Ec.1 para obtener la tasa de crecimiento específico se representan en la cuadro 14. El C. secundario mostró la tasa de crecimiento más alta con 0.7662 d<sup>-1</sup>, y el C. primario tuvo el más bajo con 0.1943 d<sup>-1</sup>. Se puede observar en la figura 56, que la concentración de biomasa en el C. secundario fue baja mostrando una etapa de mantenimiento predominante. Del mismo modo, el reactor aeróbico tenía una alta tasa de crecimiento específico; sin embargo, tenía la concentración de biomasa más baja durante este período, mostrando una DO 750 final de 0.33. En contraste, la tasa de crecimiento en R. anaeróbico fue baja, siendo 0.2205 d<sup>-1</sup>, pero mostró la más alta concentración de biomasa final a DO de 750 con 1.2, y una fase de crecimiento continuo. Similar al reactor anaeróbico, el C. primario también mostró una baja tasa de crecimiento, siendo el más bajo con 0,1943 día<sup>-1</sup>, pero con crecimiento a DO de 750 de 0.71 al final del experimento. El efluente del reactor anaeróbico mostró un medio muy adecuado para *Chlorella vulgaris*, creciendo debido a la concentración máxima de microalga. En contraste, el efluente del reactor aeróbico representa el potencial más bajo como un medio para crecer microalga.

Cuadro 14. Tasa de crecimiento de *Chlorella vulgaris* en cada efluente

Reactor	$\mu$ (d <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
C. primario	0.1943	0.9437
Anaeróbico	0.2205	0.9552
Aeróbico	0.5899	0.9979
C. secundario	0.7662	0.9939

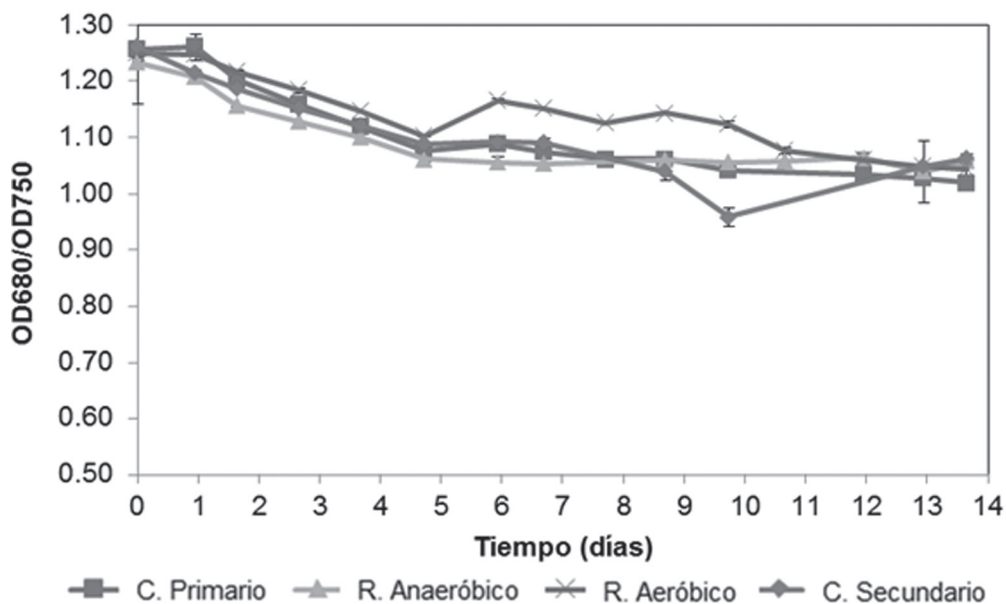
Figura 56. Cinética de crecimiento de *Chlorella vulgaris* medida a  $DO_{750}$



d. Contenido de clorofila relativo y rendimiento cuántico.

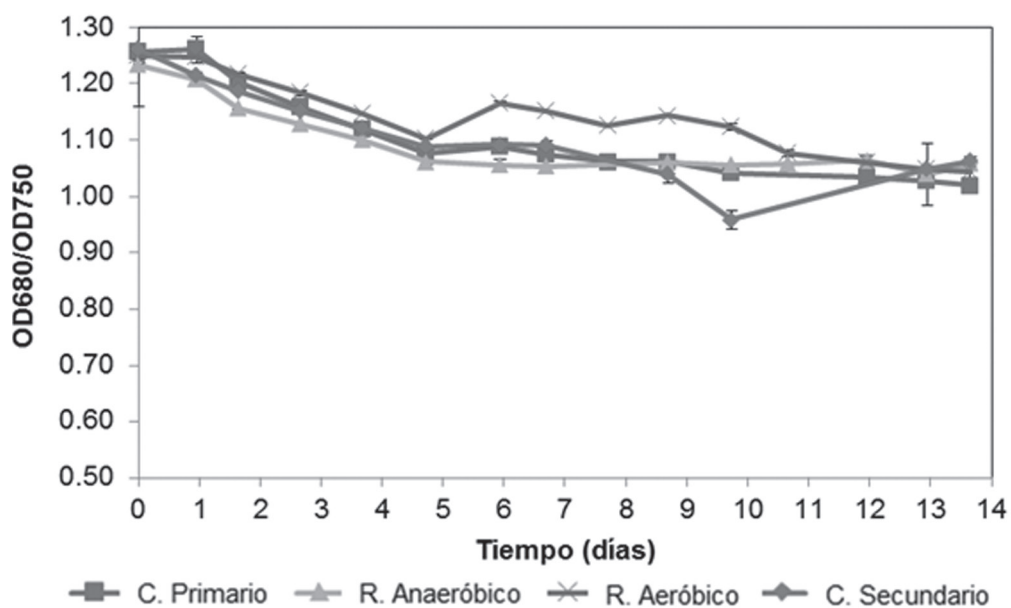
La relación 680 / 750 DO describe el contenido de relativo de clorofila (figura 57) .El contenido relativo de clorofila comienza con una disminución lineal durante los primeros 5 días y luego una disminución ligera hasta el final del experimento. Durante los primeros 5 días, cambió de 1,25 y disminuyó a 1,1, después se redujo ligeramente hasta un contenido final de aproximadamente 1,05. Esto podría explicarse debido a la mayor concentración de nutrientes al principio que permite a la microalga producir clorofila, sin embargo, como la concentración de nutrientes disminuye, la concentración de clorofila lo hace también.

Figura 57. Contenido relativo de clorofila ( $OD_{680}/OD_{750}$ )



La figura 58 muestra la tendencia de *Chlorella vulgaris* durante el experimento. A pesar de que la mayoría muestran comportamientos similares, se cree que los cambios la composición de nutrientes y concentración podrían haber afectado los resultados en su mayoría al inicio desde el día 0 hasta el día 6. Del día 6 hasta el final de las tendencias experimentales se hizo más claro y similar a una disminución lineal.

Figura 58. Cinética del rendimiento cuántico durante el crecimiento de *Chlorella vulgaris*.



## V. Conclusiones

El uso de *Chlorella vulgaris* en este experimento mostró el potencial como una nueva tecnología para el tratamiento de aguas residuales industriales donde los nutrientes se convierten en biomasa valiosa. Además, el cultivo de la microalga ofrece una eficiencia de remoción atractiva, en este caso el C. primario parece ser la mejor opción para la eliminación de la DQO y el C. secundario para la eliminación de fósforo, pero aún en ambos casos R. anaeróbico muestra buenos resultados, que parecen de nuevo muy adecuado para los intereses de producción de biomasa. Se encontró que el efluente del reactor anaerobio logró un 90% de la remoción de fósforo y la máxima eficiencia de remoción de DQO se logró en el C. primario. Se necesita llevar a cabo más investigación en el futuro, así como varias otras caracterizaciones para asegurar que los resultados de este experimento sean precisos en mayor escala. También es recomendable el uso de mezclas de efluente para potenciar el posible diseño de fotobiorreactor.

## VI. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a SAISA (SISTEMA AMBIENTAL INDUSTRIAL S.A. DE C.V.) por su amable apoyo para que los resultados de este experimento se desarrollaran. Por último, agradecemos a Cynthia Galicia Medina y Zaira Falcón Valdés y Juan Quijano por su importante aportación en este trabajo.

## Referencias

- Alemán-Nava, G. S., Casiano-Flores, V. H., Cárdenas-Chávez, D. L., Díaz-Chavez, R., Scarlat, N., Mahlknecht, J., ... Parra, R. (2014). Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 140–153. doi:10.1016/j.rser.2014.01.004
- Barsanti, L., & Gualtieri, P. (2006). *Algae, Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology*. (T. & F. Group, Ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Cai, T., Park, S. Y., & Li, Y. (2013). Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: Status and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 360–369. doi:10.1016/j.rser.2012.11.030
- Chan, A. (2011). *Use of microalgae in wastewater treatment to remove contaminants and purify biogas*. University of Guelph.
- Cuellar-Bermudez, S. P., Garcia-Perez, J. S., Rittmann, B. E., & Parra-Saldivar, R. (2014). Photosynthetic bioenergy utilizing CO<sub>2</sub>: an approach on flue gases utilization for third generation biofuels. *Journal of Cleaner Production*. doi:10.1016/j.jclepro.2014.03.034
- Elliot T., C. (n.d.). *Modeling anaerobic digestion of microalgae*. McMaster University.
- González, C., Marciniak, J., Villaverde, S., García-Encina, P. A., & Muñoz, R. (2008). Microalgae-based processes for the biodegradation of pretreated piggery wastewaters. *Applied microbiology and biotechnology*, 80(5), 891–8. doi:10.1007/s00253-008-1571-6
- González-Fernández, C., Riaño-Irazábal, B., Molinuevo-Salces, B., Blanco, S., & García-González, M. C. (2011). Effect of operational conditions on the degradation of organic matter and development of microalgae-bacteria consortia when treating swine slurry. *Applied microbiology and biotechnology*, 90(3), 1147–53. doi:10.1007/s00253-011-3111-z

Mata, T. M., Melo, A. C., Simões, M., & Caetano, N. S. (2012). Parametric study of a brewery effluent treatment by microalgae *Scenedesmus obliquus*. *Bioresource technology*, *107*, 151–8. doi:10.1016/j.biortech.2011.12.109

Mayer, M., Smeets, W., Braun, R., & Fuchs, W. (2009). Enhanced ammonium removal from liquid anaerobic digestion residuals in an advanced sequencing batch reactor system. *Water Science and Technology*.

McGriff, E. C., & McKinney, R. C. (1972). The removal of nutrients and organics by activated algae. *Water Research*.

Methods, M. C. (2007). Microalgae, mass culture methods, 5035–5041.

Mimouni, V., Ulmann, L., Pasquet, V., Mathieu, M., Picot, L., Bougaran, G., ... Schoefs, B. (2012). The potential of microalgae for the production of bioactive molecules of pharmaceutical interest. *Current pharmaceutical biotechnology*, *13*(15), 2733–50.

Nature, W. (n.d.). Water Pollution.

Prensa, D. E., De, D. E. A., & Ambiente, M. (2013). Estadística básica sobre medio ambiente.

Raposo, M. F. D. J., Oliveira, S. E., Castro, P. M., Bandarra, N. M., Morais, R. M., & Brew, J. I. (2010). On the Utilization of Microalgae for Brewery Effluent Treatment and Possible Applications of the Produced Biomass, *116*(3), 285–292.

Ryckebosch, E., Bermúdez, S. P. C., Termote-Verhalle, R., Bruneel, C., Muylaert, K., Parra-Saldivar, R., & Foubert, I. (2013). Influence of extraction solvent system on the extractability of lipid components from the biomass of *Nannochloropsis gaditana*. *Journal of Applied Phycology*, *26*(3), 1501–1510. doi:10.1007/s10811-013-0189-y

Singh, M., Reynolds, D. L., & Das, K. C. (2011). Microalgal system for treatment of effluent from poultry litter anaerobic digestion. *Bioresource technology*.

Varfolomeev, S. D., & Wasserman, L. a. (2011). Microalgae as source of biofuel, food, fodder, and medicines. *Applied Biochemistry and Microbiology*, *47*(9), 789–807. doi:10.1134/S0003683811090079

Wang, L., Li, Y. C., Chen, P., Min, M., Chen, Y. C., & Zhu, J. (2010). Anaerobic digested dairy manure as a nutrient supplement for cultivation of oil-rich green microalgae *Chlorella* sp. *Bioresource Technology*.

Wang, Liang, Min, M., Li, Y., Chen, P., Chen, Y., Liu, Y., ... Ruan, R. (2010). Cultivation of green algae *Chlorella* sp. in different wastewaters from municipal wastewater treatment plant. *Applied biochemistry and biotechnology*, *162*(4), 1174–86. doi:10.1007/s12010-009-8866-7

Zandaryaa, S. (n.d.). Global challenge of wastewater.



# Remoción de nutrientes en un sistema alternativo de aguas residuales: experiencia a escala real

*Lic. Carmen Mora Aparicio<sup>18</sup>  
MSc. Carolina Alfaro Ch.  
MSc. Roy Pérez S.  
Dr. Jihad Sasa M.*

## Resumen

En Costa Rica, las aguas residuales y la incorrecta disposición de estas, son un problema que viene en aumento, afectando directamente los cuerpos receptores y comprometiendo la disponibilidad del recurso hídrico. Las soluciones de tratamiento de agua instaladas en el país no abarcan en muchos casos la remoción de nutrientes, lo que implica un riesgo más para el recurso hídrico.

Los sistemas no convencionales de tratamiento de aguas residuales, son una alternativa para aquellos generadores de dichas aguas, que deseen invertir en el tratamiento pero que no cuentan con los recursos económicos necesarios para implementar y dar mantenimiento a los sistemas tradicionales. Los humedales artificiales son ejemplo de estos.

El presente estudio tuvo como objetivo realizar una evaluación de la remoción de nutrientes en aguas negras y grises, en un sistema no convencional funcionando a escala real en un hotel costero de Costa Rica. Se analizó la concentración del Nitrógeno (NTK,  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NH}_3$ ) y fósforo ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), en las aguas de entrada y salida. Los resultados reflejaron porcentajes de remoción promedio de un 68 % de NTK, 74 % de  $\text{NH}_3$ , 70 % de  $\text{NO}_2^-$  y 66 % de  $\text{PO}_4^{3-}$ .

En conclusión, con este estudio se comprobó que los sistemas no convencionales presentan eficiencias de remoción considerables para los nutrientes en cuestión, constituyéndose en una opción de tratamiento de bajo costo y muy efectiva para alcanzar un nivel terciario de tratamiento.

**Palabras clave:** humedales artificiales, saneamiento alternativo, aguas residuales, remoción de nutrientes

## Nutrient removal in an alternative wastewater system: full scale experience

### Abstract

In Costa Rica, wastewater and the improper disposal of this, are and increasing problem that affects directly the water resources compromising their availability. The wastewater treatment solutions installed in the country often do not include nutrient removal, which involves more risk to the water resource.

Non-conventional wastewater treatment systems are an alternative for wastewater generators that want to invest in treatment but do not have the financial resources needed to implement and maintain traditional systems. Artificial wetlands are examples of these alternative systems.

<sup>18</sup> Laboratorio de Gestión de Desechos, Escuela de Química, Universidad Nacional. Correo electrónico de contacto: carmorapa@gmail.com

This study presents an assessment of nutrient removal in an alternative system running at full scale, in a coastal hotel in Costa Rica. The concentration of nitrogen (TKN,  $\text{NO}_2$ -and  $\text{NH}_3$ ) and phosphorus ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) in water input and output was analyzed. The results showed overall removal percentages of 68% TKN, 74%  $\text{NH}_3$ , 70%  $\text{NO}_2$  and 66% of  $\text{PO}_4^{3-}$ .

It was concluded that this alternative system achieves important levels of nutrient removal, becoming an effective low cost treatment option for a tertiary level of treatment.

Keywords: artificial wetlands, alternative sanitation, wastewater, nutrients removal

## I. Introducción

La contaminación de los cuerpos de agua en Costa Rica, se refleja en dos problemáticas principales: la escasez de sistemas de tratamiento y la disposición incorrecta de las aguas residuales generadas en las distintas actividades productivas y de servicio. En los últimos cinco años, el porcentaje de estas aguas que han sido tratadas se ha mantenido en un 3,6%, reflejando así la falta de infraestructura y de inversión (Angulo, 2013).

Las aguas residuales son aquellas que han sido modificadas en las distintas actividades del ser humano, que alteran las características naturales de los cuerpos receptores, según la concentración de contaminantes presentes. Según el origen, las aguas residuales se pueden clasificar en ordinarias (domésticas), especiales (industriales) y de escorrentía (Seoáñez, 1999).

En la legislación nacional se establece que, cada ente generador de aguas residuales, es responsable por el tratamiento y la adecuada disposición, garantizando así, un menor impacto negativo en los cuerpos receptores y preservando la belleza natural de los ríos y la flora y fauna que en estos habita (Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, 2007).

La tecnología de tratamiento de aguas residuales más utilizada en el país es el tanque séptico, y también existen plantas de tratamiento para aguas ordinarias y especiales (Angulo, 2013). Sin embargo, se han desarrollado sistemas alternativos, conocidos como tecnologías blandas, pasivas o verdes, que a diferencia de los sistemas convencionales, no requieren oxigenación constante ni la adición de sustancias químicas. Los Humedales artificiales, son un ejemplo de estas tecnologías no convencionales (Sánchez, 2010).

Los humedales artificiales (HA) son sistemas que imitan los procesos de degradación de los humedales naturales, removiendo así los contaminantes orgánicos y los nutrientes de las aguas residuales. Los componentes básicos de los HA son el impermeabilizante, el soporte o piedra, la vegetación y un sistema de tubería para la entrada y salida del agua (Environmental Protection Agency, 1993) (Environmental Protection Agency, 2000).

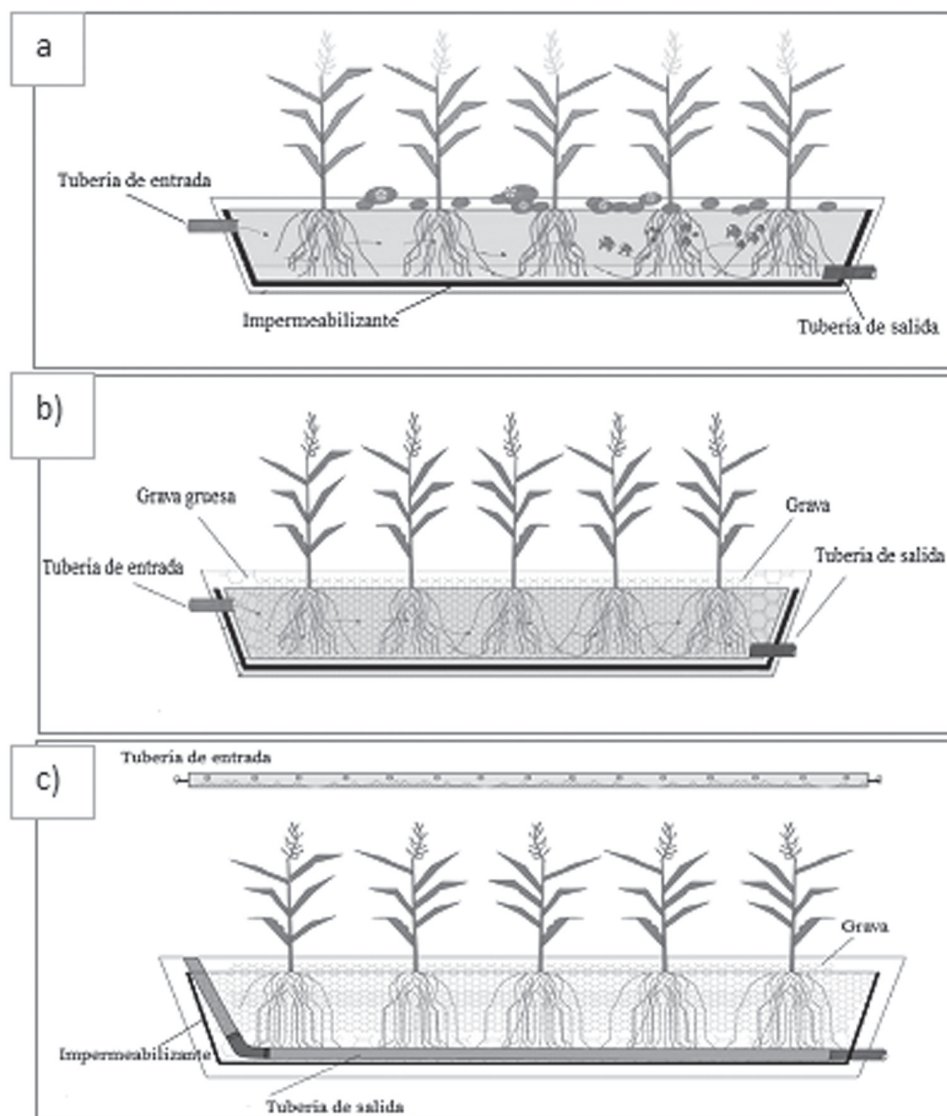
La impermeabilización previene la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas aledañas, la vegetación es la responsable de la absorción de nutrientes, junto con los microorganismos, quienes a su vez son los que degradan la materia orgánica presente en las aguas (Sánchez, 2010).

Dependiendo de la dirección del flujo del agua y de los distintos componentes, los HA se clasifican en:

*Los humedales de flujo superficial libre (FLS)* son sistemas que simulan los humedales naturales, ya que el agua está expuesta a la atmósfera, en ellos el agua fluye en la superficie desde la entrada hasta la descarga del sistema (figura 59-a) (Environmental Protection Agency, 2000) (Sánchez, 2010).

Por otra parte en los *humedales de flujo subsuperficial* (FS), el flujo es subsuperficial, es decir, el agua pasa por debajo de la superficie del sistema. Estos se subdividen en dos tipos: flujo horizontal y de flujo vertical. En el primero, el agua fluye de forma horizontal a través del medio granular hasta llegar a la salida del sistema el cual se mantiene permanentemente inundado (figura 59-b). En el segundo, el agua ingresa desde arriba en forma de pulsos, el medio granular se inunda temporalmente y se da un lapso de tiempo para que el agua fluya por gravedad (figura 59-c) (Sánchez, 2010)(Environmental Protection Agency, 2000)(Environmental Protection Agency, 1993).

*Figura 59. Humedales artificiales: a) flujo subsuperficial horizontal, b) flujo subsuperficial vertical, c) flujo superficial libre (Sánchez, 2010).*

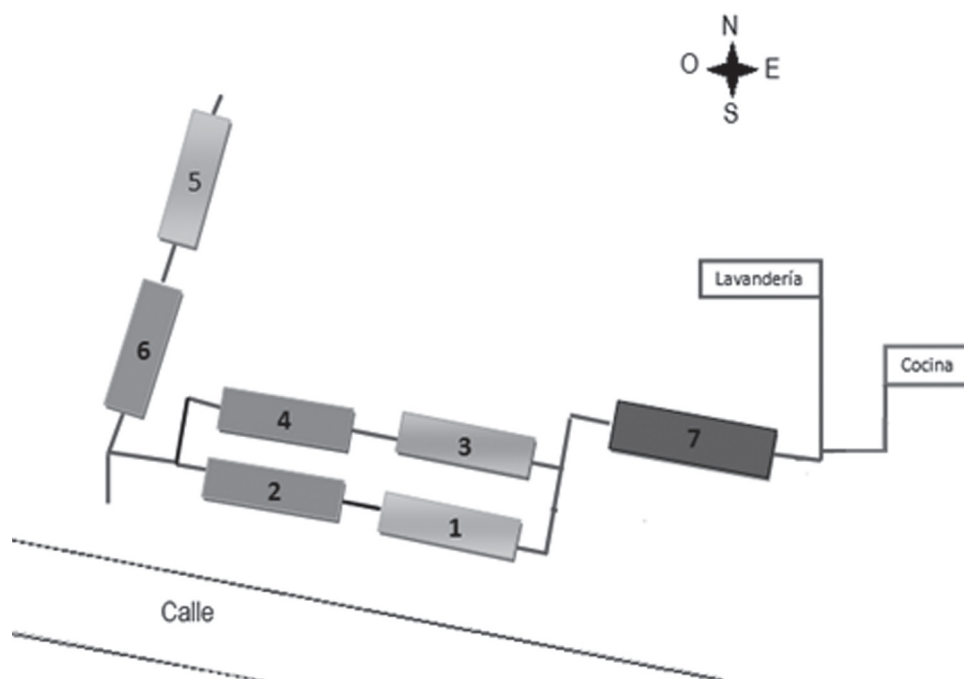


## II. Metodología

El sistema de tratamiento alternativo en estudio se encuentra en la Región Pacífico Central, cantón de Osa, distrito Bahía Ballena, específicamente en Playa Dominical, en las instalaciones del Hotel Diuwak. Esta región se clasifica como bosque húmedo tropical, el cual se caracteriza por grandes precipitaciones (4000 mm a 8000 mm al año) y altas temperaturas (alrededor de los 30°C) (Bergoeing, 1998)(Denyer & Kussmaul, 2000)(Meza, 2004) (SINAC, 2008).

El lugar cuenta con siete unidades de tratamiento distribuidas en cuatro sistemas, tres para las aguas negras (dos unidades cada uno) y uno para las grises. Los humedales verdes corresponden al primer sistema.1 (PS1.1), los azules son los del primer sistema.2 (PS1.2), los indicados en color naranja conforman el segundo sistema, estos reciben las aguas negras del hotel, la unidad de color morado es el sistema destinado a la depuración de las aguas grises provenientes de la cocina y la lavandería del lugar.

Figura 60. Esquema de distribución del sistema de humedales ubicado en el Hotel Diuwak, Costa Rica.



Se realizaron 9 muestreos durante el año 2012, reflejando los resultados del sistema en condiciones de máxima y mínima capacidad, así como el comportamiento en época seca y lluviosa. El estudio se basó en la remoción de nutrientes en los HA, que se evaluó en términos de remoción fósforo total, nitrógeno total Kjeldhal, nitritos y amonio.

### III. Resultados y discusión

#### 1. Fósforo

Los humedales artificiales presentan porcentajes de remoción de fósforo muy altos, esto en los primeros años. Cumplidos los 4 o 5 años de funcionamiento, esta remoción se ve reducida significativamente. Sin embargo, si se brinda un mantenimiento y un monitoreo constante, se puede corregir la reducción de eficiencia (Kadlec & Wallace, 2009)(González, 2009).

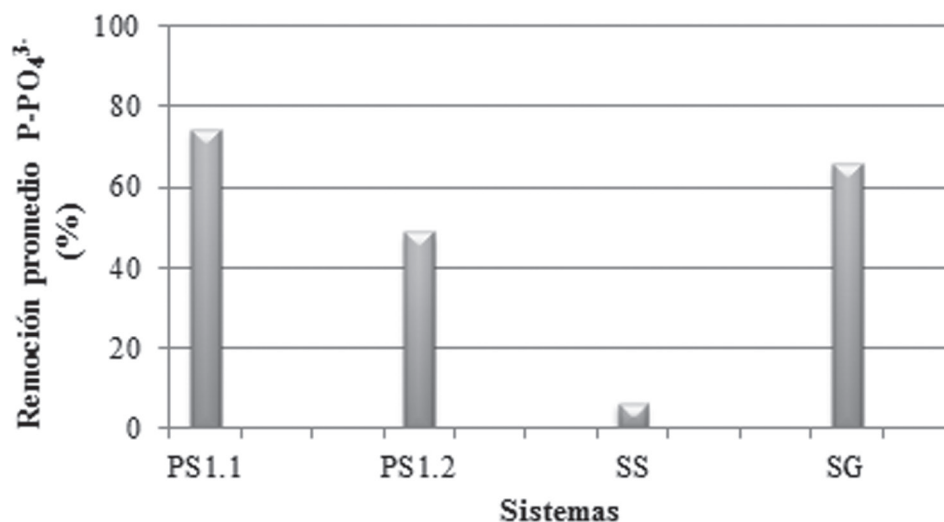
Las plantas, en promedio, son responsables de un 25 % aproximadamente, de la remoción del fósforo en el agua, mientras que el resto de fósforo es degradado por los microorganismos, la adsorción al medio poroso y la precipitación (Kadlec & Wallace, 2009).

En los HA en estudio, las concentraciones en la entrada de todos los sistemas, son superiores a la de la salida, por lo que se puede afirmar que existe remoción de fósforo en todos los HA. Además, se comprobó que el punto intermedio presentó concentraciones similares a la de la salida, por lo que se puede afirmar que la mayor remoción se dio en el primer humedal de cada sistema, haciendo innecesario la segunda unidad.

Como se mencionó anteriormente, la remoción de fósforo promedio en los HA es relativamente alta (entre el 40 % y 60 %), pero este porcentaje varía con el paso del tiempo, ya que la eficiencia de remoción tiende a reducirse. Para el sistema de humedales del Hotel Diuwak, el PS1.1 presentó un porcentaje promedio superior a lo reportado en la literatura (74 %), siendo este el más eficiente, seguido de cerca por el SG con un 66 %. Por otro lado, el PS1.2 reportó un promedio de 49 %, siendo el tercero en eficiencia, y finalmente el SS, con un valor de 6 %, reflejando así, ser el sistema más ineficiente en la remoción de fósforo (figura 61) (Vera, García, Sáez, Moragas, & Vidala, 2011)(Vymazal, 2007).

Este valor tan inferior, puede ser producto de la baja ocupación de las habitaciones suites, las cuales abastecen los humedales de este sistema. Las concentraciones de fósforo en la entrada y salida fueron muy bajas, inclusive, muchos datos estaban por debajo del límite de cuantificación del método (0,06mg/L), por lo que los porcentajes promedio de remoción también fueron bajos.

Figura 61. Porcentajes de remoción promedio de fósforo  $P-PO_4^{-3}$  en los diferentes sistemas para la II etapa de muestreos.



## 2. Nitrógeno Total Kjeldhal

El nitrógeno es un componente importante en las aguas residuales, por este motivo es regulado en sus diferentes formas, ya que influye directamente en la toxicidad del cuerpo receptor para los peces y otros organismos vivos y genera la eutrofización que es un problema en muchos medios acuáticos (Kadlec & Wallace, 2009).

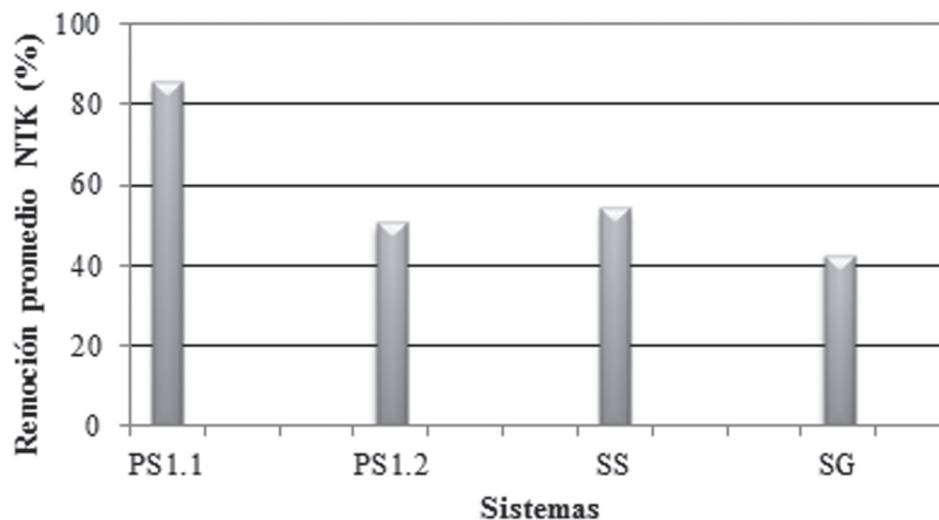
Dentro del humedal, el nitrógeno es importante para el crecimiento de las plantas. Estas últimas pueden remover hasta un 50 % del nitrógeno presente en el agua. Además, el nitrógeno es sintetizado, en su mayoría, por microorganismos que favorecen los diferentes ciclos biogeoquímicos que se dan en este tipo de sistemas. Las formas del nitrógeno inorgánico de interés en el estudio son el amonio ( $NH_4^+$ ) y el nitrito ( $NO_2^-$ ); el nitrato ( $NO_3^-$ ), el óxido nitroso ( $N_2O$ ) y el nitrógeno molecular ( $N_2$ ) no se consideraron en este trabajo (Kadlec & Wallace, 2009).

En los sistemas, se reportaron datos de concentración de NTK, en la salida de los humedales, significativamente inferiores a los valores de las entradas, comprobando así la buena remoción de este parámetro, con excepción del sistema de aguas grises, que presentó porcentajes de remoción bajos. De igual manera, se observa la cercanía en las concentraciones de los puntos intermedios y las salidas de cada sistema, lo que indica que la segunda unidad no ayuda significativamente en la remoción de NTK.

Al igual que el fósforo, el NTK en el SS presentó valores de entrada mucho menores a los reportados en los sistemas anteriores, los cuales se encuentran entre los 2 mg/L y los 7 mg/L, situación que se relaciona directamente con la ocupación de las habitaciones tipo suite.

Los porcentajes de remoción para el NTK en HA son muy variados, la mayoría rondan entre el 45 % y 65 %, sin embargo, en otros estudios se han obtenido porcentajes de hasta un 85 % de remoción. En la figura 62 se muestran los porcentajes de remoción promedio para el NTK, en este se confirmó que el sistema con mayor eficiencia fue el PS1.1 (86 %), seguido por el SS (54 %). El promedio para el PS1.2 es de 50 % y finalmente el SG presentó un porcentaje promedio de 42 % que lo coloca como el sistema con menor eficiencia para la remoción de este parámetro (Gunesa & Tunçsiperb, 2009)(Fenxia & Ying, 2009)(Vymazal, 2007)(Vera, García, Sáez, Moragasd, & Vidala, 2011).

Figura 62. Porcentajes de remoción promedio de NTK en la II etapa de muestreos.



### 3. Amonio

El valor de NTK incluye el nitrógeno orgánico y el amonio, sin embargo, se cuantificó el amonio de forma individual para confirmar la eficiencia de remoción en los humedales artificiales. Esto se debe a que el  $\text{NH}_3$  tiene la facilidad de adsorberse a la superficie del sustrato, ya que su carga positiva le permite participar en intercambio de cationes con sedimentos o con el soporte. Sin embargo, la adsorción es débil y el amonio se puede liberar con cualquier cambio químico en el medio con el fin de buscar un equilibrio (Kadlec & Wallace, 2009).

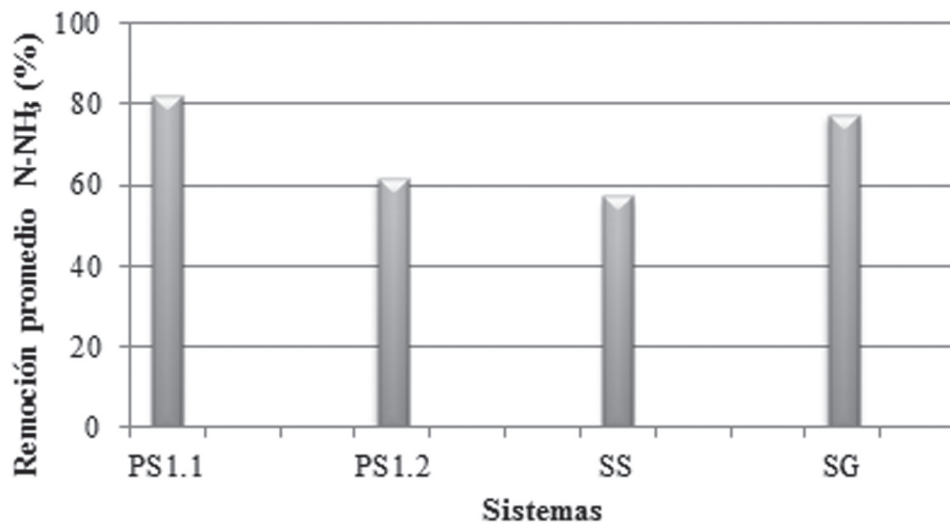
En las aguas negras, generalmente se reportan concentraciones de amonio aproximadamente de 25 mg/L, debido a que la orina aporta el nitrógeno en forma de urea, la cual se descompone rápidamente en el tanque séptico, produciendo amonio. En los distintos sistemas se observó una clara remoción en la mayoría de los 9 muestreos, debido a la diferencia sustancial entre los datos de entrada y salida del sistema (Romero, 2010).



Los análisis reflejan la misma tendencia en las concentraciones reportadas para NTK, señalando el aporte del amonio en los resultados de NTK para todos los sistemas. Es importante recalcar que al ser en su mayoría aguas negras, las excretas son una fuente importante de amonio en las aguas. Además, nuevamente se observó que se logra una buena remoción en las primeras unidades de los sistemas, evidenciando el aporte poco significativo de las segundas unidades.

La remoción de amonio en aguas residuales ordinarias en HA normalmente se encuentra entre el 30 % y 50 %, Sin embargo, se observó que en otros estudios donde se variaban las condiciones operacionales relacionadas con el tipo de plantas, obtuvieron porcentajes de hasta un 85 % (aproximadamente). En la figura 63 se muestra que los sistemas de HA obtuvieron muy buenos porcentajes de remoción promedio. El PS1.1 resultó ser el más eficiente en la remoción de amonio con un 82 %, seguido por el SG con un 77 %, con un valor de 62 % está el PS1.2 en el tercer lugar en eficiencia. El SS fue el que reportó una menor eficiencia promedio con un 57 % (M, Zhang, Peng, Lai, Chen, & Chen, 2011)(Vymazal, 2007)(Fenxia & Ying, 2009).

Figura 63. Porcentajes de remoción promedio de amonio en el sistema de humedales.



#### 4. Nitrito

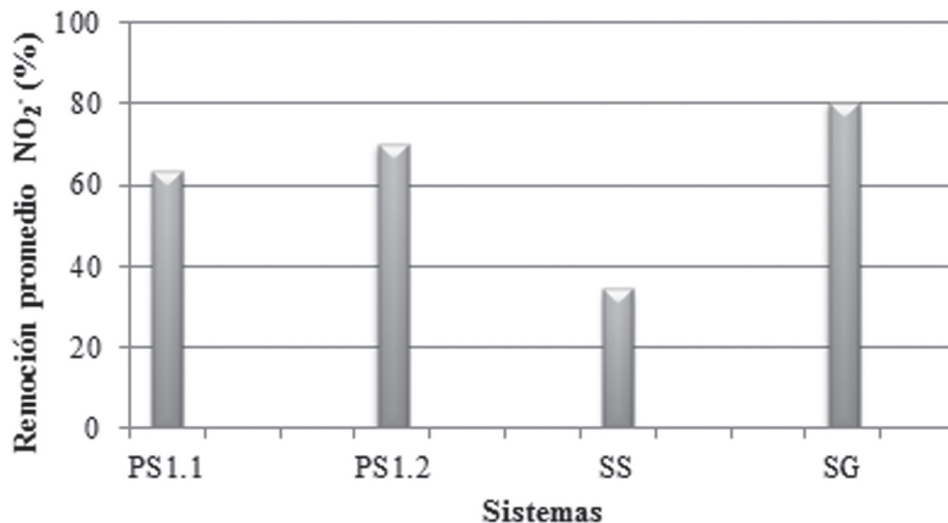
El Nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) es una sustancia intermedia en la reacción de nitrificación, en la que el nitrito se oxida rápidamente para obtener nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y además, es un producto en la reacción de desnitrificación. Sin embargo, en condiciones aeróbicas, el nitrito se vuelve a transformar en nitrato. Debido a esto, el nitrógeno en forma de nitrito es químicamente inestable en la mayoría de los humedales artificiales de flujo subsuperficial, y por esta razón se encuentra solamente en concentraciones muy bajas (Kadlec & Wallace, 2009).

Si se comparan los datos de entrada y salida se observa remoción en todos los muestreos. Sin embargo, los valores son muy bajos (cerca de cero), esto es de esperar, debido a la inestabilidad de los nitritos dentro de los humedales, ocasionado por las transformaciones en las distintas formas de nitrógeno (Romero, 2010).

Para este parámetro, también se comprueba que la primera unidad de cada sistema es quien remueve la mayor cantidad de nutrientes, demostrando así que la segunda unidad no aporta de forma representativa en la remoción de nitritos. En el SG se reportaron las concentraciones mayores de nitritos, indicando que las aguas grises poseen sustancias que favorecen el incremento de estos.

Basándose en la figura 64, se puede afirmar que el SG fue el más eficiente en la remoción de nitritos, con un porcentaje promedio de 80 %, seguido por el PS1.2 con un 70 %. El tercer lugar en remoción fue para el PS1.1 con un valor de 63 %, y finalmente, el SS presentó la menor eficiencia de remoción para este parámetro con un 34 %.

Figura 64. Porcentajes de remoción promedio de nitritos para el sistema de humedales



#### IV. Conclusiones

El sistema de tratamiento de aguas residuales del Hotel Diuwak posee una capacidad de remoción total de P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 66 %, NTK 68 %, NH<sub>3</sub> 74 %, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 70 %.

De la caracterización de las aguas de entrada y salida se concluye que el sistema PS1.1 es el que posee mejores condiciones de remoción de NTK (86 %), además presentó el mejor porcentaje promedio de remoción para NH<sub>3</sub> (82 %) y P-PO<sub>4</sub> (74 %).

Los resultados indican que los HA son tratamientos adecuados para la depuración de aguas residuales, en este caso particular, las aguas provenientes del Hotel Diuwak, en donde la zona y las condiciones climáticas pudieron favorecer la remoción de la materia orgánica y de los nutrientes.

Teniendo en cuenta que los HA no requieren mano de obra especializada, aun así es necesario realizar operaciones básicas de limpieza en los sistemas de pretratamiento con el fin de aumentar la capacidad depuradora de los sistemas de HA.

El compromiso por parte de los entes generadores, en este caso el Hotel Diuwak, es fundamental en la promoción de las tecnologías blandas. La alianza entre la academia, las organizaciones no gubernamentales y el sector productivo puede fortalecer la divulgación y validación de este tipo de sistemas en el país.

#### Referencias

Angulo, F. (2013). Manejo, disposición y desecho de las aguas residuales en Costa Rica. Décimo Nove-no Informe del Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Costa Rica.

- Bergoeing, J. (1998). Geomorfología de Costa Rica. San José: Instituto Geográfico Nacional.
- Denyer, P., & Kussmaul, S. (2000). Geología de Costa Rica. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Environmental Protection Agency. (1993). Guía para el diseño y construcción de un humedal construido con flujos subsuperficiales.
- Environmental Protection Agency. (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo subsuperficial.
- Fenxia, Y., & Ying, L. (2009). Enhancement of nitrogen removal in towery hybrid constructed wetland to treat domestic wastewater for small rural communities. *Ecological Engineering*, 1043-1050.
- González, D. (2009). Estudio comparativo de las tecnologías de eliminación de fósforo en aguas residuales. Universidad de Barcelona.
- Gunesa, K., & Tuncsiperb, B. (2009). A serially connected sand filtration and constructed wetland system for small community wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 1208-1215.
- Kadlec, R., & Wallace, S. (2009). *Treatment wetlands* (Segunda ed.). CRC PRES.
- M, L., Zhang, C., Peng, C., Lai, Z., Chen, D., & Chen, Z. (2011). Plant growth, community structure, and nutrient removal in monoculture and mixed constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 37, 309-316.
- Meza, T. (2004). Geografía de Costa Rica. Geología, naturaleza y políticas ambientales. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones. (2007). Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales. San José, C.R.
- Romero, J. (2010). Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño (Tercera ed.). Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sánchez, D. (2010). Depuración de aguas residuales de una población mediante humedales artificiales. España: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Seoáñez, M. (1999). Aguas residuales: Tratamiento por humedales artificiales, Fundamentos científicos, Tecnologías, Diseño. España: Ediciones Mundi Prensa.
- (SINAC), S. N. (2008). Recuperado el 12 de marzo de 2010, de <http://www.sinac.go.cr/AC/ACOSA/Paginas/default.aspx>
- Vera, I., García, J., Sáezc, K., Moragasd, L., & Vidala, P. (2011). Performance evaluation of eight years experience of constructed wetland systems in Catalonia as alternative treatment for small communities. *Ecological Engineering*, 364-371.
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrientes in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 380, 48-65.



# El cambio climático y las ciudades

*Dra. Patricia Phumpiu<sup>19</sup>*

## Resumen

El cambio climático se estudia para determinar sus efectos en la influencia de la variabilidad climática, información clave para detectar vulnerabilidad física. El cambio climático se afecta por el crecimiento urbano, los efectos tanto de las urbanizaciones como los del cambio climático convergen peligrosamente. UN-Habitat (2014) sostiene que las ciudades son catalogadas como las mayores contribuyentes al cambio climático “al consumir el 78% de la energía mundial. Las ciudades producen más del 60% de todo el dióxido de carbono y cantidades significativas de otras emisiones a través de generación de energía, vehículos, industria y uso de biomasa”, aunque las ciudades no son las únicas destructoras del ambiente.

Simultáneamente, las ciudades son igualmente vulnerables a los efectos del cambio climático al ser afectadas por la creciente precipitación, inundaciones más frecuentes, fuertes ciclones y tormentas, y períodos de extremas temperaturas. Las consecuencias son devastadoras tanto en la infraestructura física como en la infraestructura social. No obstante, estos cambios no son materia de reflexión en gobiernos y normas locales, reflejadas en la apatía para tomar más precauciones y de mayor alcance en la lucha por disminuir, mitigar y adaptarse a este cambio climático. La falta de conocimiento debido a la tendencia de no dar a conocer los efectos del cambio climático en nuestro ámbito, no incita a una reflexión contextual ni en un plano individual, ni en el plano de tomadores de decisión locales.

El tema de esta ponencia intenta retomar el cambio climático bajo el lente de las ciudades, cómo nuestro accionar se refleja en el cambio climático, y a su vez, cómo este accionar revertido en nuestro hábitat podría encontrar una adaptación en nuestra vida diaria. Esta retrospectiva del cambio climático con respecto a las ciudades está dirigida a establecer alternativas con acciones concretas e integradas y lograr una adaptación consciente de las consecuencias y efectos de cada acción emprendida.

**Palabras claves:** Cambio climático, ciudades, gestión ambiental urbana.

## Climate change and the city

### Abstract

Studies on climate change determine effects on the influence of climate variability, which is the key to detect data on physical vulnerability. Climate change is affected by urban growth, because of the effects of both urban development and climate change converge dangerously. UN-Habitat (2014) argues that cities are classified as the major contributors to climate change “by consuming 78% of world energy. Cities produce over 60% of all carbon dioxide and significant amounts of other emissions through power generation, vehicles, industry and biomass”, although cities are not the only destructors of the environment.

Simultaneously, cities are also vulnerable to climate change effects when they are affected by precipitation, more frequent floods, cyclones and strong storms, and periods of extreme temperatures.

---

<sup>19</sup> Tecnológico de Monterrey, correo electrónico [patricia.phumpiu@centrodelagua.org](mailto:patricia.phumpiu@centrodelagua.org)

The consequences are devastating to both the physical infrastructure and social infrastructure. However, these changes are not food for thought on governments and local standards, on the contrary, these norms reflect the apathy to be more cautious and far-reaching in the struggle to reduce, mitigate and adapt to climate change. The lack of knowledge on the climate change effects does not encourage individual self-thinking nor local decision making.

The theme of this paper attempts to resume climate change through the lens of cities, how our actions are reflected in climate change, and in turn, how our actions could find an adaptation in our daily lives. This retrospective of climate change on cities is intended to establish integrated alternatives with concrete actions to achieve awareness on adaptative behaviour on each action.

**Keywords:** Climate change, cities, environmental urban management.

## I. El cambio climático

El clima es el conjunto de propiedades ambientales promedio durante un periodo de tiempo en una zona determinada (IPCC, 2013). Estas propiedades incluyen principalmente a la temperatura, seguida de la precipitación y el viento, aunque también se consideran la frecuencia, magnitud y tendencias para definir el clima de una zona. El periodo de tiempo para la definición del clima consiste usualmente de 30 años, como lo determina la Organización Meteorológica Mundial (IPCC, 2013). Bajo estos enunciados, el cambio climático es el fenómeno que ocurre cuando se dan variaciones a largo plazo de las propiedades promedio del clima (IPCC, 2013), aunque no existe una definición con consenso en este aspecto.

Existen diversos factores que impulsan el cambio climático global. Entre ellos se encuentran las fluctuaciones naturales de radiación solar, así como, la concentración de gases y partículas en la atmósfera, que determinan el balance radiactivo del planeta. Estos factores prescriben la cantidad de radiación que incide en la superficie y por lo tanto tienen un efecto en la temperatura global (figura 65).





Figura 66. El efecto invernadero (IPCC, 2013).



Las actividades antropocéntricas originadas en las ciudades aumentan considerablemente la cantidad de GEI y la cantidad de partículas en la atmósfera. Las consecuencias de estas actividades se reflejan en el incremento de las propiedades del calentamiento global que conllevan los GEI en las ciudades. Es decir, el calentamiento global tiene su origen en nuestras acciones por ello, las alternativas de solución debe también partir de una disminución del origen de estas acciones antropogénicas y no solamente a partir del fenómeno. En los siguientes párrafos algunas de estas alternativas urbanas son expuestas en un contexto de planificación urbana.

## II. El cambio climático en las ciudades

El cambio climático trae consigo no sólo el aumento de las temperaturas globales promedio, sino varios acontecimientos de gran impacto para el planeta y de especial importancia para los asentamientos humanos. Las consecuencias sociales y económicas que se derivan del cambio climático obligan a una adaptación de los habitantes por igual en la infraestructura física como en su infraestructura social.

Entre los efectos del cambio climático se encuentran la mayor frecuencia e incidencia de eventos climáticos extremos, como mayores precipitaciones en algunas zonas del planeta o sequías extremas en otras áreas, así como olas de calor, cambios en la intensidad y frecuencia de ciclones tropicales y el aumento del nivel del mar ocasionado por el derretimiento de las masas polares, que generaría inundaciones extensivas o fenómenos como tsunamis (IPCC, 2013). La presencia de riesgo se hace patente en el desarrollo urbano y peri-urbano de asentamientos humanos. La vulnerabilidad física y social es una de las consecuencias de los fenómenos climáticos para los asentamientos humanos, porque el aumento intenso de precipitación o las sequías extremas podrían cambiar la dinámica de cultivos y con ello la economía poblacional, la población económicamente activa, además de generar un problema en la seguridad alimenticia.

Los golpes de calor tendrían un efecto sobre las ciudades convirtiéndolas en islas de calor con aumentos de temperaturas y mayor contaminación del aire (Cities Alliance, 2009) y también traerían complicaciones de salud para los grupos de edad más vulnerables, como los bebés recién nacidos o los adultos mayores. La incidencia de tsunamis, ciclones tropicales o inundaciones frecuentes causaría estragos en la infraestructura de ciudades, asentamientos rurales y caminos, ocasionando daños económicos por la pérdida de servicios y construcciones. Los eventos naturales, como por ejemplo las inundaciones, ponen a prueba la capacidad de las ciudades para responder a emergencias no detectadas con anterioridad, brindándole importancia a instituciones de rescate y a su eficacia para manejarlas contingencias.

Entre los daños sociales ante eventos naturales, por ejemplo de las inundaciones, se puede mencionar el cada vez mayor grado de vulnerabilidad que sufren aquellas personas que se quedan incomunicadas o sin vivienda. Los grupos de mayor riesgo, como lo plantea Cities Alliance (2009), son siempre aquellos con menores opciones para trasladarse a sitios más seguros o son aquellos con menos recursos sociales para enfrentar las emergencias, enfermedades o pérdida de medios de subsistencia. Los grupos de riesgo suelen también ser aquellos que cuentan con menos herramientas legales y financieras para sobre llevar situaciones de apuro.

Asimismo, otro grupo de alto riesgo es aquel conformado por las mujeres y los niños. Los niños son el grupo con mayor tasa de mortalidad ante situaciones extremas y quienes están en mayor riesgo de contraer enfermedades relacionadas con el agua y el saneamiento, tema álgido ante la presencia de eventos naturales. Son los niños también los que más sufren las consecuencias de la malnutrición ante la escasez de alimentos en eventos como las inundaciones y otros eventos extremos (Cities Alliance, 2009). Las mujeres, por su parte, deben enfrentarse a diferentes situaciones que las ponen en riesgo y denotan su vulnerabilidad social en caso de eventos extremos. Por ejemplo, en algunos casos en los que las mujeres trabajan desde su hogar, al perder su vivienda también desaparece su fuente de ingresos, y son ellas quienes más sufrirán discriminación en la búsqueda de nuevos empleos. Las mujeres y las niñas mayores son también quienes conforman un grupo de alto riesgo ante la violencia y falta de privacidad en los hogares transitorios, como serían refugios o viviendas de emergencia (Cities Alliance, 2009). Es importante considerar que a mayor incidencia de eventos extremos, mayores cantidades de personas quedarían en las situaciones de riesgo y vulnerabilidad descritas.

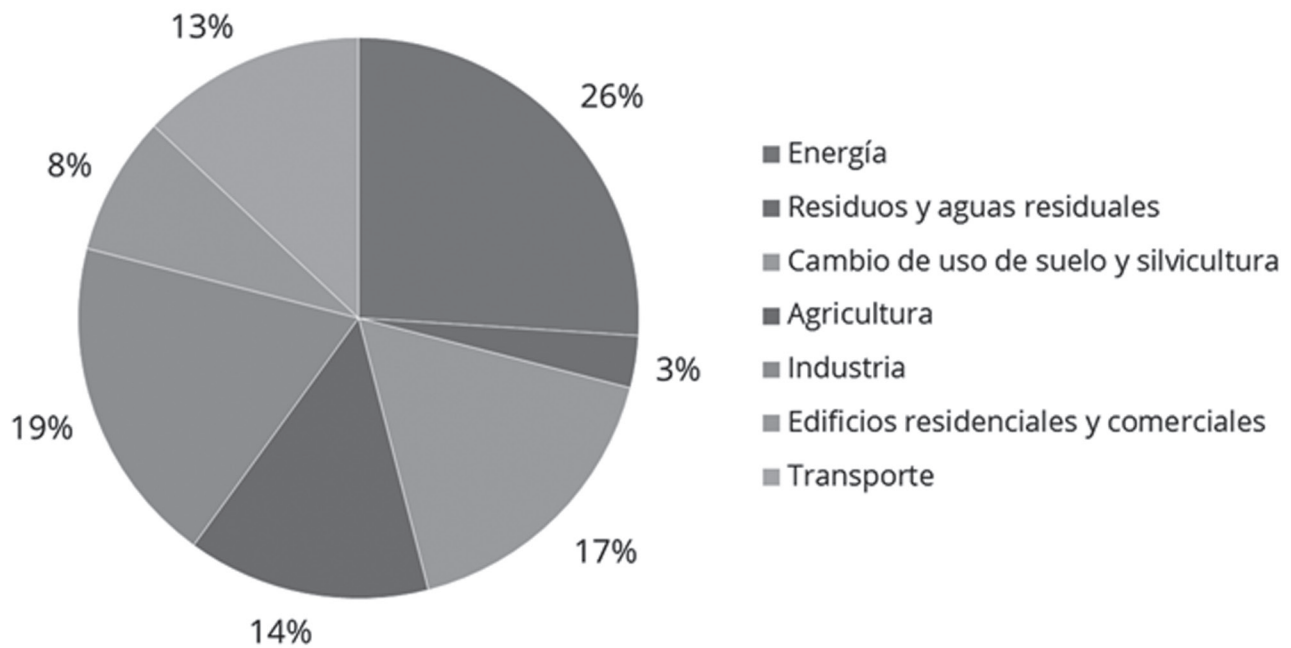
Los efectos del cambio climático no sólo se hacen patente en el territorio. Los mares y océanos también sufren con la acidificación por mayor concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, trayendo consigo amenazas para la vida marina y para aquellas economías que dependen de productos marinos para su supervivencia. Los cambios climáticos también pueden provocar efectos de contaminación de acuíferos costeros de agua dulce (IPCC, 2013), lo cual podría poner en peligro el acceso al agua potable y comprometería la higiene y saneamiento de aquellos grupos poblacionales y fauna que dependen de esos cuerpos de agua. Finalmente, también se puede esperar que con el cambio de clima se altere la biodiversidad del planeta, en sus hábitats terrestres y acuáticos y con ello la pérdida de muchas especies (IPCC, 2013), muchas de las cuales son aprovechadas por los seres humanos para fines alimentarios, comerciales o farmacéuticos.

Los efectos del cambio climático en los asentamientos humanos se reflejan en el incremento de incidencias de inundaciones, sequías y eventos climáticos extremos. Las consecuencias sociales y económicas que las sociedades asumen se reflejan, en la mayoría de los casos, en la disminución de sus propios ingresos. Por ello, la importancia de la mitigación del cambio climático y la adaptación frente a él de manera integrada y con una visión de desarrollo, más allá del concepto de emergencia.

Aunque las ciudades contribuyen a generar gases de efecto invernadero que inducen el cambio climático, como se puede apreciar en la figura 67, de las principales fuentes de CO<sub>2</sub> en el mundo,

también son espacios donde se pueden generar propuestas y acciones positivas en los temas de mitigación y adaptación al cambio climático. Principalmente con respecto a las políticas públicas, según el Banco Mundial (2010) “las ciudades son laboratorios de cambio social con una escala suficiente para lograr acciones significativas.” Las políticas locales pueden ser en general más efectivas porque en estos espacios la comunicación es más inmediata que en otras esferas, como la nacional o internacional (The World Bank, 2010). En temas de gestión adaptativa, la movilización local de recursos es de utilidad, por el dinamismo de su estructura y organización y está mejor desarrollada para la implementación de proyectos y la integración intersectorial (CDKN, 2014). De esta manera, las ciudades y los gobiernos municipales están mejor dotados para asumir un rol importante como implementadores del cambio.

Figura 67. Emisiones globales de CO<sub>2</sub> por sector



Fuente: The World Bank, 2010.

Las ciudades representan un nodo importante de vulnerabilidad ante el cambio climático. Debido a la concentración significativa de población, la cercanía a ríos y mares, la infraestructura inamovible que contienen, las ciudades son susceptibles a eventos extremos ocasionados por el cambio climático como inundaciones (The World Bank, 2010). Sin embargo, las ciudades también tienen en sus manos el poder de decisión individual y colectivo para establecer diferentes estrategias que promuevan acciones de mitigación y adaptación al cambio climático que ya se están implementando en diferentes ciudades del mundo. Entre estas acciones se pueden mencionar programas de eficiencia energética en edificios, programas de reforestación urbana, programas de agricultura urbana para proveer de sustento a la ciudad de manera local, programas de transporte sostenible, etc. (The World Bank, 2010). Un ejemplo en Latinoamérica sería el caso de Cartagena, en Colombia. La ciudad es especialmente susceptible a la alza en el nivel del mar, con lo que desarrolló un estudio de vulnerabilidad que le permitió elaborar una guía de adaptación al cambio climático, en la cual se basa ahora la municipalidad para desarrollar políticas de planeamiento urbano (CDKN, 2014). La ventaja de los programas implementados a nivel municipal es su potencial de adaptación en otras ciudades y a otras escalas (CDKN, 2014), pero lo más importante es el rol municipal en la integralidad de planificación y ejecución de los programas, he ahí la importancia que tienen los programas piloto y las iniciativas locales.

Es importante considerar que aunque las políticas y proyectos a nivel municipal tienen, en términos de escala, algunos puntos en su favor, también afrontan diversos retos que comprometen su capacidad de actuar efectivamente. Entre los retos relevantes, encontramos el acceso a fondos económicos u otros recursos fiscales y regulatorios para la implementación de proyectos climáticos, ya que en algunos países las autoridades municipales no cuentan con el poder necesario o el nivel de autoridad y discreción para acceder a estos recursos. Otro reto indudable, es la tendencia de la visión a corto plazo en la toma de decisiones locales municipales, dejando de lado la implementación de proyectos con connotaciones climáticas, que tienen resultados en un periodo de tiempo considerable. En estas situaciones, es difícil que las autoridades municipales inviertan recursos en la implementación de proyectos para mitigar o adaptarse al cambio climático, porque no es factible desde un punto de vista político-electoral (CDKN, 2014). Concentrarse en metas a largo plazo es un reto demasiado riesgoso políticamente si hay presiones más urgentes a corto plazo.

Corolario de este acápite es la urgencia de contar con una visión a futuro para lograr afrontar los retos ambientales urbanos. Retos que puedan sobrellevarse y justificarse en la autorización de recursos -decisiones estatales, regionales y nacionales- además de justificar el otorgar prioridad política a estos temas climáticos. Los planes de desarrollo tienen en su poder la integración de temas de desarrollo en una visión conjunta y de detalle en su implementación.

### **III. Alcance de la implementación de los planes de desarrollo con respecto al cambio climático**

Los planes de desarrollo con respecto al cambio climático cumplen un rol importante en el establecimiento de acciones y es conveniente considerar etapas de implementación, como lo sugiere el ICLEI (2011) en su guía para la adaptación climática municipal.

Los planes de desarrollo con aseveraciones y énfasis en la mitigación al cambio climático no surgen con ideas y acciones al azar. Una de las primeras acciones a realizar, es un análisis del riesgo urbano ante el cambio climático para que se determinen los principales puntos de peligro en la localidad, es indispensable el análisis socioeconómico de los residentes y la identificación de las instituciones locales con el objetivo de promulgar políticas en conjunto que sean congruentes con las metas de adaptación y mitigación (The World Bank, 2010).

El análisis de riesgo por lo general tiene un énfasis físico, cuantitativo, y en muchos casos se deja de lado la fragilidad y vulnerabilidad social del individuo y de las redes sociales a las que pertenecen, las cuales en muchos casos son difíciles de reintegrar una vez ocurrido el evento. La identificación de instituciones y actores locales y externos contribuye a formar un equipo de trabajo que pueda complementarse y que pueda compartir conocimientos y recursos en el futuro y determina la sostenibilidad de la acción. ICLEI (2011) asevera que en esta primera fase de reconocimiento se deberían identificar los conocimientos sobre las tendencias históricas climáticas de la localidad, además de asegurar las alianzas políticas y sociales que permitan la creación o re-creación de una agenda climática integrada en su sostenibilidad a largo plazo.

La ampliación de los conocimientos climáticos de la localidad sería la continuación lógica de la primera etapa de reconocimiento (ICLEI, 2011). La colaboración con institutos académicos y de investigación podría tener un aporte importante en la implementación de un proyecto de mitigación o adaptación al cambio climático. Estas instituciones académicas tendrían la capacidad de proyectar los impactos futuros para la región, así como establecer una relación confiable entre la comunidad y las autoridades al ofrecer una plataforma confiable de conocimientos.



La siguiente etapa sería la de planeación del desarrollo con respecto al cambio climático. Sería importante establecer en esta etapa la visión de la ciudad a largo plazo, así como las metas y objetivos. También se identificarían en esta etapa los mecanismos de financiamiento, las responsabilidades institucionales, los tiempos para el cumplimiento de las metas y las medidas de monitoreo para el plan de acción (ICLEI, 2011). En esta fase se crearía un documento con el plan de adaptación y mitigación para hacerlo público y utilizarlo como guía para todos los futuros planes. Es importante que las relaciones institucionales al realizar este plan de acción sean lo suficientemente fuertes como para crear un compromiso que perdure a pesar de los cambios políticos que pudieran ocurrir en la localidad. De nuevo se enfatiza la importancia de las instituciones civiles y académicas que pueden lograr que este compromiso perdure con el tiempo.

Finalmente, se lleva a cabo el plan de acción ante el cambio climático considerando que ya éste ha sido aprobado por las autoridades municipales y que cuenta con el reconocimiento de la comunidad (ICLEI, 2011). Nuevamente se destaca la importancia de la colaboración entre los diversos grupos y actores locales para llegar a un consenso y asegurar el compromiso ante la puesta en acción del plan. Además, son estos actores quienes traerán consigo las herramientas para llevar a cabo el plan de acción, ya sea que contribuyan con recursos económicos, como lo harían muchas instituciones gubernamentales, o con recursos humanos y de información, como sería el caso de las instituciones académicas o las asociaciones civiles.

El monitoreo continuo del plan y la actualización del mismo debería ser parte del alcance de todo proyecto de acción frente al cambio climático. Es necesario corroborar el cumplimiento de las metas, si han surgido nuevas problemáticas y determinar el procedimiento de acción con aquellas novedades que acontecen durante la implementación. Una fase que no debe omitirse es la comunicación y difusión a la comunidad de los avances y actualizaciones (ICLEI, 2011). Al mantener un canal de comunicación con los actores involucrados para notificar de los progresos, aumentan las posibilidades de mantener en pie no sólo el plan en sí, sino los recursos que hacen posible su implementación.

Un ejemplo de plan de acción ante el cambio climático que presenta integración en la planeación podría ser el caso de la ciudad de Nueva York. En su documento PlaNYC: A greener, greater New York (2011) se exponen las estrategias para la mitigación y adaptación con una visión hacia el 2050. El plan integral se compone de varios planes más pequeños y focalizados en diversas áreas específicas. Entre las áreas que se abarcan se incluyen los sectores de vivienda, espacios públicos, cursos de agua, transporte, calidad del aire, energía y residuos sólidos, considerando que cada sector es afectado de diferente manera por el cambio climático y que presentan diversos grados de vulnerabilidad y riesgo. Se hace un énfasis a través del plan conjunto en la reducción de gases de efecto invernadero, además de la creación de comunidades con la capacidad de recuperarse rápidamente de las dificultades.

Asimismo, el plan maestro cuenta con trece iniciativas ante el cambio climático que enlistan los principales objetivos a nivel municipal, fungiendo la entidad como un integrador de las diversas áreas para conformar un plan con orientación ambiental-climático (The City of New York, 2011). Los temas transversales incluyen la regulación y el marco político, además de la creación de inventarios de gases de efecto invernadero, proyecciones al futuro, y la inclusión de la comunidad para aumentar su capacidad de resiliencia. Al contar con diversos planes para cada sector, PlaNYC pareciera ser lo suficientemente detallado como para ser efectivo en cada una de sus áreas, pero a la vez se mantiene una visión global de los objetivos al ser, en conjunto, un plan maestro de acción.

La ciudad de Nueva York afirma haber logrado, con los esfuerzos de cuatro años, una reducción de emisiones de efecto invernadero del 13% con respecto a los niveles registrados en el 2005. Esto conforme a su meta de reducir el 30% de las emisiones para el 2030, con respecto a los niveles registrados en el 2005 (The City of New York, 2011). Para lograr reducir las emisiones, aseguran que fue clave



el trabajo en el sector energético, en donde se instalaron nuevas plantas de generación de energía y se importó energía renovable, disminuyendo la huella de carbono y las emisiones.

Por su parte, la ciudad de San Francisco también cuenta con un plan de acción ante el cambio climático, con algunas similitudes al de Nueva York. El plan de acción climática para San Francisco (2004) tiene diferentes categorías de acción, que en este caso son para los sectores de transporte, eficiencia energética, energía renovable y residuos sólidos. Como temas transversales también se maneja la cuestión de inventarios de gases de efecto invernadero y proyecciones futuras, aunque no se hace énfasis en aumentar la resistencia de la comunidad. El objetivo de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, en el caso de San Francisco, consistía en un 20% con respecto a los niveles de 1990, para el 2012 (San Francisco Department of the Environment, 2004). La similitud más importante con respecto al PlaNYC es que el plan de acción climática de San Francisco cuenta con categorías estratégicas dentro de cada sector y con acciones específicas para alcanzar las metas. La manera de organizar el plan en conjunto sería, entonces, equiparable a las iniciativas propuestas por la ciudad de Nueva York.

Hemos comparado los temas de los planes de acción de los casos de estudio de Nueva York y San Francisco con ejemplos en Latinoamérica, como el programa de acción ante el cambio climático 2010-2015 del estado de Nuevo León, en México (2010). En el documento de éste último, se tiene también diferentes categorías de acción, que involucran a los sectores de energía, transporte, desechos, AFOLU, procesos industriales, recursos hídricos, ecosistema, recursos naturales y salud. A su vez, como temas transversales se consideran las proyecciones a futuro y los inventarios de gases de efecto invernadero, además de la política pública, regulación y participación ciudadana (Secretaría de Desarrollo Sustentable de Nuevo León, 2010). El programa de Nuevo León cuenta también con acciones estratégicas de mitigación, equivalentes a las iniciativas de Nueva York o a las acciones específicas de San Francisco.

Otro ejemplo en Latinoamérica sería el caso de Uruguay, que cuenta con un plan climático para su región metropolitana (2012). El documento del Plan identifica también diversas líneas estratégicas de acción, que incluyen el sector de costas, hábitat construido y salud, agro-ecosistemas y biodiversidad, transporte y energía. En ellas se enlistan acciones específicas de manera similar a los planes de Nueva York, San Francisco y Nuevo León. Una novedad interesante que se plantea es una hoja de ruta para la implementación, en la cual se describe la gobernabilidad, los instrumentos jurídicos para llevar a cabo los planes, la factibilidad económica y los recursos financieros disponibles, así como la agenda política y los plazos de ejecución (PNUD Uruguay, 2012). Para las cuestiones transversales de la ruta de implementación se realizaron estudios de factibilidad jurídica y financiera, así como evaluaciones de vulnerabilidad e inventarios de gases de efecto invernadero (ICLEI, 2011). En resumen, constituye un plan integral que considera tanto las acciones a futuro como la manera de alcanzarlas, al igual que los planes de Nueva York y San Francisco.

La implementación de los planes para aminorar el cambio climático está estrechamente vinculada a la gobernanza de la ciudad. Al revisar los planes y su ejecución en cada una de las ciudades nos percatamos de la evolución de las ideas y actitudes, del cambio de necesidades. No obstante, en muchas ciudades la gobernanza no cambia ni evoluciona en la práctica. Los nuevos discursos acerca de gobernanza refieren a teorías basadas en la ley de la naturaleza como las ciencias biológicas y teoría de complejidades en lugar de teorías de ciencia política y ciencias sociales. Las ciudades son el emporio de la información y del cambio en un mundo globalizado y constituyen la implementación de políticas externas especialmente en el rubro que concierne al cambio climático. Hoy en día, el incremento de información hace posible el surgimiento de cambios más allá de las políticas hacia una administración estable, simple e innovadora, no es posible lograrlo con el solo componente que conforman los gobiernos.

Los gobiernos locales tienen su principal preocupación en el desarrollo y la inversión urbana, por ello, considerar la inserción de la industria y empresas en la maquinaria citadina es crucial en el cambio de gobernanza tradicional. En países en desarrollo, la masa crítica y la utilización masiva es aún uno de los obstáculos en el camino a lograr implicaciones positivas para el ambiente. Las ciudades son ideales para promover tecnología en masa con sistemas de producción limpia que tienen consecuencias positivas en el ambiente. Las ciudades no son solo la masa de la sociedad sino que su operación para que sea efectiva recae en el individuo, en el accionar, la identificación de un individuo para satisfacer sus necesidades y requerimientos sin sacrificar eficiencia, efectividad o costo. Las ciudades ofrecen precisamente la proximidad a este mercado social e individualizado.

La percepción de la sociedad ante la tecnología de punta es aquella de ser inalcanzable económicamente y sofisticada para su mantenimiento. No obstante, el concepto de tecnología no necesariamente tiene que ser inalcanzable para cada persona en nuestra sociedad, ni mucho menos ser operativamente compleja en su mantenimiento. La tecnología es para el cambio climático uno de los detonadores para aminorar su evolución nociva; en muchos casos la alternativa ha sido descentralizar las alternativas de solución y simplificar los procesos de mantenimiento.

En los países desarrollados, la actitud hacia el estilo de vida tiene parámetros que coadyuvan en acciones para disminuir los efectos del cambio climático. En esencia, hoy en día, en lugar de basar la riqueza solamente en valores monetarios, se incluye también el buen estilo de vida en un ambiente saludable, además de mejorar los índices de calidad en la educación, bajo grado delincencial, y bajo desempleo, por ejemplo. Asimismo, es importante promover la evolución de nuestra actitud hacia el uso de nueva tecnología que va cambiando en la medida en que se incentive la innovación y la flexibilidad, que se necesita inducir en cada individuo para dar ese salto tecnológico necesario para llevar a cabo los planes integrales urbanos, en los que se incluyen componentes para aminorar el cambio climático.

La actitud hacia tecnología, en la mayoría de los individuos, conlleva una dificultad en su operación y mantenimiento. En sociedades asistenciales, con la actitud del menor esfuerzo, el cambio de entendimiento a nivel individual y colectivo es el mayor obstáculo para lograr un avance tecnológico por más simple que fuera. El cambio y desarrollo en los programas de cambio climático en las ciudades tienen una fuerte limitación en la actitud individual de no creer que su accionar individual es conducente a grandes cambios. Cada uno de los rubros de los planes de desarrollo urbano-climáticos-sustentables tienen que ser abordados técnicamente y socialmente al alcance del entendimiento individual del común de las personas. Este rubro del conocimiento es por lo general omitido en los planes, y de mucha relevancia por cuanto es la sociedad la que apoya y sustenta el plan de desarrollo.

En un planteamiento de planificación urbana y cambio climático, la ventaja competitiva se inicia con la re-definición de los roles en dos niveles individual y colectivo, de los sectores públicos y privados. Un balance entre el nivel macro- y el nivel micro tecnológico-económico para apoyar la transición en el sistema de gobernanza de las ciudades. Los efectos del cambio climático en áreas urbanas se afrontan con el conocimiento de los orígenes de este fenómeno. La mitigación y capacidad adaptativa, herramientas utilizadas para erradicar o aminorar los efectos del cambio climático, radica en el cambio de actitud individual y colectiva hacia el cambio de acciones, un cambio en las tomas de decisión socio-económica-culturales de las autoridades.

## IV. Conclusión

La noción del cambio climático en la sociedad necesita ser divulgado como concepto y como plan de acción integrado para aminorar sus efectos en la zona urbana. La percepción del ciudadano en lo referente al origen del cambio climático es incierta y ciertamente no figura en nuestras propias ac-

ciones, sino que se traslada el problema a ámbitos que no conciernen al ciudadano individualmente ni colectivamente en un nivel local. Por otro lado, el esfuerzo para disminuir los efectos del cambio climático no sólo es individual sino también oficial y a discreción de autoridades locales en conjunción con programas ambientales integrados y cumplimiento de normativa establecida para el efecto.

Los planes de desarrollo cumplen la función de canalizar esfuerzos en una dirección, en esta ponencia se intenta canalizar los esfuerzos de lograr un mejor ambiente saludable a los esfuerzos conjuntos con una visión más amplia incluyendo las acciones para aminorar los efectos del cambio climático. Cada ciudad y sus ciudadanos tienen sus propias características, las cuales deben ser tomadas en cuenta en los programas y normativas, si bien pueden ser replicables en otras ciudades, la organización y estructura de la sociedad llevará a elaboración de estrategias diferentes para su logro. Las alternativas de solución en diferentes rubros competentes a los efectos del cambio climático no son exclusivos en el rubro, y muchas veces la integración de programas y su divulgación integrada deben llevarse a cabo en conjunto con programas socio-económicos para incentivar su implementación.

Los efectos del cambio climático dependen en gran parte del avance de la tecnología, la cual tiene un rol importantísimo para los efectos de aprovechar los recursos naturales existentes y preservar su existencia, aminorando de esta manera los efectos del cambio climático. La implementación de la tecnología no es únicamente aprehender técnicas de operación y mantenimiento, sino que dependen de la visión de cada uno de los operadores y la sociedad en pleno, de nuestra visión integrada del presente y futuro de nuestro propio hábitat, del por qué ocurren cambios en nuestro hábitat, del conocimiento básico conceptual de necesidades más allá del corto plazo. Aclarando que la sociedad no es conformada solamente por el ciudadano, sino autoridades y personal en organizaciones gubernamentales y privadas. Por otro lado, tecnología de punta no necesariamente es compleja en su concepto y operación, se desea “saltar” el uso de tecnología tradicional para usar alguna con mayores beneficios en nuestras actuales circunstancias, “leapfrogging”, sin necesidad de ser compleja.

El cambio climático es un tema recurrente y lo más importante no es un tema nuevo. Según llevemos a cabo las estrategias de acción, el tema puede ser novedoso en su integración con el desarrollo de nuestro hábitat local en nuestras ciudades. No obstante, tendremos que cuidarnos de no extrapolar programas y normativas que resulten ser sólo el producto de esta nueva tendencia del cambio climático. La integración de los programas ambientales-urbanos, la estructura de operación e implementación con organizaciones gubernamentales-sociedad civil-privadas harán posible que las acciones para aminorar los efectos del cambio climático no sean meros esfuerzos individuales y sin trascendencia para el futuro.

## Referencias

CDKN. (2014). *Close to home: subnational strategies for climate compatible development*.

Cities Alliance. (2009). *Cambio climático: ¿cómo influye en su ciudad?*

ICLEI. (2011). *Changing climate, changing communities: Guide and workbook for municipal climate adaptation*.

ICLEI. (2011). *Montevideo, Uruguay. Greenhouse gas emissions inventory: First experiences*.

IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.

PNUD Uruguay. (2012). *Plan climático de la región metropolitana de Uruguay*.

San Francisco Department of the Environment. (2004). *Climate Action Plan for San Francisco*.

Secretaría de Desarrollo Sustentable de Nuevo León. (2010). *Programa de acción ante el cambio climático para el estado de Nuevo León (2010-2015)*.

The City of New York. (2011). *PlaNYC: A greener, greater New York*.

The World Bank. (2010). *Cities and climate change: an urgent agenda*. Washington DC. visto en web. [worldbank.org](http://worldbank.org), p.1.

UN-Habitat. (n.d.). *Climate change*. Retrieved 2014, from For a better urban future: <http://unhabitat.org/urban-themes/climate-change/>

# SECCIÓN B: CLIMA Y ENERGÍA







# Acciones para el desarrollo de fuentes renovables de generación eléctrica, la sostenibilidad y la adaptación al cambio climático

*Ph.D. Roberto Jiménez Gómez<sup>20</sup>*

## **Resumen**

Como parte de las medidas de mitigación al cambio climático se encuentra la disminución de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) y medidas de adaptación diversas. El artículo desarrolla y menciona aquellas acciones necesarias y complementarias para que Costa Rica pueda disminuir o mantener controlados los GEI (producto de la generación eléctrica) y realice acciones concretas para adaptarse al cambio climático, incluyendo: la gestión de cuencas hidrográficas y la construcción de plantas de generación hidroeléctrica con embalse de regulación y uso múltiple (acción relevante para tener energía nacional que disminuya la generación térmica y permita la generación de fuentes renovables que son oscilantes o variables). Asimismo, es necesario lograr el desarrollo de otras acciones que se enumeran y que constituyen todo un reto para el ICE y el país. Entre ellas, la diversificación de la matriz de generación eléctrica con fuentes renovables no convencionales. A partir de la presentación de lo realizado por el ICE se presentan una serie de lecciones aprendidas.

**Palabras clave:** Desarrollo sostenible, fuentes renovables, adaptación al cambio climático, emisiones de gases de efecto invernadero, gestión de cuencas hidrográficas, gestión ambiental, uso multipropósito de embalses, embalses de regulación, participación social, diversificación de la generación eléctrica.

## **Actions for the development of renewable sources of electric generation, sustainability and climate change adaptation**

### **Abstract**

As part of measures to mitigate climate change include reducing emissions of greenhouse gases (GHG) and various adaptation measures. This paper develops and mentions those actions necessary and complementary to Costa Rica to reduce or maintain control GHG (product of electricity generation) and take concrete actions to adapt to climate change, including: watershed management and plant construction hydropower with reservoir regulation and multiple use (important to have national reduction in the thermal energy generation and allow the generation of renewable sources which are oscillating or action variables). It is necessary to achieve the development of other actions listed and constitute a challenge for the ICE and the country. Among them, the diversification of electricity generation matrix with non-conventional renewable sources. From the presentation of the accomplishments of the ICE a number of lessons learned are presented.

**Keywords:** Sustainable development, renewable energy, adaptation to climate change, emissions of greenhouse gases, watershed management, environmental management, use multipurpose dams, reservoirs regulation, social participation, diversification of electricity generation.

---

<sup>20</sup> Proceso de Planeamiento Ambiental, CENPE-ICE. Correo electrónico [rjimenezg@ice.go.cr](mailto:rjimenezg@ice.go.cr).

## I. Introducción

América Latina y en particular Centroamérica tienen los retos de poder abastecerse de energía de forma sostenible, a precios razonables y seguros para apoyar su desarrollo. Por ello es necesario articular políticas públicas integradas que generen complementariedades que permitan contar con la energía necesaria de forma segura, con el menor impacto socioambiental, así como con el mayor desarrollo local en las zonas de influencia de los proyectos energéticos, coadyuvando a la adaptación al cambio climático.

El ensayo busca mostrar que es posible articular un conjunto de acciones de política y participativa que permitan promover estrategias de desarrollo regional y local a partir de proyectos energéticos. Las necesidades de información hidrometeorológica, acciones de protección, manejo y recuperación de los recursos naturales y el ambiente son de utilidad para el desarrollo y aprovechamiento energético así como para medidas de adaptación al cambio climático.

Para poder tener éxito las políticas deben partir de un fortalecimiento de las capacidades de los entes responsables, enfatizando en la capacidad de planificar, ejecutar, evaluar y dar seguimiento. La participación ciudadana, el desarrollo local y el enfoque por cuencas hidrográficas son ejes básicos. Se brindan una serie de criterios y experiencias, en especial del sector eléctrico, tendientes a facilitar el desarrollo de las fuentes renovables de energía y el bienestar en las zonas de influencia de los proyectos.

El ensayo inicia con un marco de referencia conceptual que plantea la dicotomía entre crecimiento, necesidades energéticas y sostenibilidad ambiental. Posteriormente se establecerá la necesidad de energía que tiene la región y la forma cómo se ha provisto la energía eléctrica. Con el fin de comprender la especificidad del sector eléctrico de Costa Rica se dedica una sección para describirlo y rescatar políticas públicas relevantes que se han tomado, unido a ello se indica la problemática que enfrenta el desarrollo eléctrico del país, por la existencia de áreas protegidas y la alta sensibilidad ambiental existente.

Con el fin de integrar el cambio climático a la discusión se presentan algunos efectos de este fenómeno. Posteriormente se desarrollan una serie de acciones estratégicas que a criterio del autor son necesarias para compatibilizar el desarrollo de las fuentes de generación eléctrica, la protección del ambiente, el mejoramiento socioeconómico de las comunidades y la adaptación al cambio climático. Por último se plantean algunas lecciones aprendidas que son válidas para su consideración en el ámbito regional.

## II. Un marco de referencia conceptual para la relación economía, ambiente y energía

La Economía ha asumido por lo general supuestos implícitos de que las actividades económicas se realizan en un ecosistema infinito. Por ello no ha tenido presente la posibilidad de: agotamiento de los recursos naturales, llegar a los límites de capacidad de asimilación del ecosistema, afectación significativa de la calidad ambiental y la vida misma o que se puedan dar daños irreparables en el planeta, por ejemplo por el cambio climático.

Los cambios en el sistema económico que se han llevado a cabo en los últimos 200 años, producto de la industrialización, son de una magnitud y características tan especiales que han generado efectos significativos en el planeta, cuyas consecuencias son cada vez más evidentes, poniendo en peligro la reproducción de ecosistemas sustentadores de la vida misma y por ello del sistema económico.

En términos ecológicos, la situación del hombre en la Tierra ha pasado de un joven “mundo vacío” (vacío de gente y sus artefactos), pero lleno de capital natural a un “mundo lleno” maduro, donde las necesidades, percibidas o no, conllevan a una mejora cuantitativa de la conexión entre sus componentes (desarrollos), alianzas cooperativas y flujos de desechos reciclados en un “circuito cerrado” (Constanza *et al*, 1999).

El subsistema económico ya ha alcanzado o excedido importantes límites en lo que se refiere a la capacidad de los recursos y los vertederos. Evidencia de ello es: a) la apropiación humana de la biomasa, b) la degradación de la tierra, c) la ruptura de la capa de ozono, d) la extensión del subsistema económico muy grande con relación al ecosistema global, e) del ecosistema depende la capacidad de regeneración y de asimilación de los recursos que es cada vez menor, f) la capacidad de asimilación de los vertidos está siendo sobrepasada, g) el crecimiento aconsejado por diversos convenios e informes científicos escapa incluso a los límites citados anteriormente, h) hay una persistente pérdida de la biodiversidad (Common y Stagl, 2008).

Los efectos citados hacen necesario replantear el sistema económico, para tratar de hacerlo más sostenible, desmaterializado y buscando nuevas formas de realización y de mejorar la calidad de vida, congruentes con un planeta que requiere tener presente las restricciones que el ecosistema plantea.

Contrario a lo que muchos puedan pensar estos elementos (relación actividades humanas y ambiente) están en el fundamento mismo de la Economía como ciencia, el tener recursos limitados, usos alternativos, la satisfacción, el bienestar, las posibilidades de producción presentes y futuros, el capital creado por el hombre y el capital natural, son aspectos intrínsecos a la Ciencia Económica, más allá de visiones limitadas de esta, que la han llevado a un pensamiento restringido que nada le ha ayudado a su desarrollo y a su aporte a la solución de los grandes problemas de la sociedad actual.

A partir de los retos actuales en el campo ambiental y su relación con las actividades humanas, hay principios que algunas disciplinas como la Economía Ecológica han planteado que pueden ayudar a analizar la problemática actual: a) se tiene un sistema termodinámico cerrado y un sistema creciente materialmente, b) con la economía humana como un subsistema, del ecosistema, lo cual implica límites a la economía global, producción de recursos biofísicos del ecosistema (Daly y Cobb, 1993).

Al respecto un elemento esencial que ha distinguido las posiciones distintivas de la Economía Ecológica se plantea a continuación:

“Georgescu-Roegen (1971), uno de los pioneros de los fundamentos de la Economía Ecológica hizo un importante aporte al indicar que el sistema económico es subsistema del sistema mayor abierto condicionado a leyes de la termodinámica. Toda actividad requiere de energía y materiales y las leyes de la termodinámica gobiernan lo que pasa con la energía y los materiales usados por el proceso económico. La segunda ley (entropía) identifica economía como un proceso que incrementa la entropía de la naturaleza, produciendo una muerte lenta. Esta argumentación es en la actualidad necesaria de considerar sobre todo para el planteamiento de soluciones tecnológicas sostenibles, el reciclaje y el aprovechamiento de fuentes de energía no convencionales, pues en muchos casos estas leyes establecen limitaciones a la viabilidad a dichas alternativas o justifican su empleo (Daly y Cobb, 1993)” (Jiménez, 2012: 178).

Adicionalmente la Economía Ecológica plantea una visión de futuro de un planeta sostenible con una alta calidad de vida para todos sus habitantes, dentro de las reservas impuestas por: 1) el reconocimiento de que en el análisis de estos sistemas complejos, la incertidumbre es grande e irreductible, 2) las instituciones y los gestores de políticas deberían ser pro-activos y producir políticas simples, adaptables y que puedan llevarse a cabo, en un entendimiento completo de los sistemas (Common y Stagl, 2008).

Esa proactividad que se debe expresar en políticas públicas globales, nacionales, sectoriales y cambios en los hábitos y costumbres de las personas y las empresas, necesita el aporte creativo de diversas disciplinas científicas y enfoques dentro de la Economía para aplicar instrumentos de política económica ambiental útiles, que vengan a contribuir al gran reto que la humanidad tiene.

La industrialización sin precedentes que se ha tenido, en donde los combustibles fósiles han sido centrales en el campo energético y la provisión de diferentes insumos, ha llevado a que en poco tiempo, según la escala temporal de los ecosistemas naturales, el subsistema económico se ha llenado de infraestructura, materia, población y flujos de insumos, residuos; contaminación, a tal grado que la capacidad de recuperación del Capital Natural y de asimilación de los ecosistemas, no se ha dado al ritmo y condiciones requeridas, para mantener ese Capital Natural y la calidad ambiental, necesarias para la reproducción de los diferentes componentes sustentadores de la vida en el planeta (Pearce y Turne, 1995).

Uno de los problemas fundamentales que enfrenta la sociedad actual en su relación con el ambiente, es que lo común sea la falta de internalización en los precios del valor de una serie de servicios ambientales, recursos y funciones ecológicas, lo cual hace que el sistema de precios de los bienes y servicios, no brinde las señales correctas a los agentes económicos, lo cual lleva a una explotación excesiva, contaminación y daño de esos recursos vitales para la sostenibilidad del planeta. Esto ha sido denominado externalidades negativas, dentro de lo que se llama fallas del mercado (Azqueta y Barry, 1996). No obstante, para muchos esto va más allá de una falla, tiene que ver con la misma lógica del sistema económico que no ha tenido en cuenta a todos los elementos requeridos para la reproducción de la base biofísica. Una expresión de esta situación es el cambio climático asociado a las actividades humanas que se ha podido percibir en las últimas décadas.

Tal como lo indica la Comisión Económica para América Latina y El Caribe (CEPAL) y otros (2010, pág.16):

Desde la óptica económica es más rentable actuar ahora que dejar el problema a las generaciones futuras, además de las consideraciones éticas de esta posición. Los resultados confirman que el cambio climático es el mayor fracaso del mercado jamás visto por no internalizar el valor del clima como bien público global y no registrar adecuadamente los impactos sociales y los servicios ambientales.

La CEPAL proyectó que sin acciones internacionales de mitigación, la región podría sufrir para fines del siglo, pérdidas cuantiosas en el sector agrícola y en la biodiversidad, fuertes presiones sobre la infraestructura e incremento en la intensidad de eventos extremos, que se acumularían hasta representar cifras importantes del producto interno bruto (PIB) actual (CEPAL, 2009). Es decir el no tomar medidas lleva tarde o temprano al pago de la factura pendiente por los países (Stern, 2007).

Ante el fenómeno de cambio climático, se han planteado diferentes políticas internacionales y nacionales para tratar de disminuir las emisiones (Jiménez, 2011). Una de las formas es por medio de tecnologías limpias, pagos por emisiones evitadas y remuneraciones a sumideros. Igualmente se han llevado a cabo investigaciones que buscan establecer los costos que para la economía tendrían los diferentes escenarios de cambio en el clima y por otra parte, los costos de llevar a cabo medidas para mitigar y adaptarse, que permitan disminuir las emisiones y poder aspirar a escenarios menos negativos para el planeta, en especial para los países más pobres quienes son los menos preparados y se ubican en las regiones más vulnerables (CEPAL, 2009).

En el presente trabajo se busca mostrar que hay algunas medidas políticas y acciones basadas en algunas experiencias de Costa Rica, que pueden disminuir en alguna medida el escenario negativo que sobre el crecimiento económico actual se tiene. Se considera que si se siguen ciertas orientacio-

nes y se llevan a cabo ciertas acciones es posible en Centro América lograr una provisión de energía eléctrica con una proporción mayor con fuentes renovables, lo cual ayuda a la mitigación del cambio climático y a los efectos negativos que la factura petrolera por el uso de combustibles fósiles.

Tener sistemas hidrometeorológicos para estudiar proyectos de generación eléctrica, contribuye a la elaboración de escenarios más robustos para el cambio climático. El desarrollo de proyectos de generación eléctrica, en contexto de responsabilidad social empresarial, brinda posibilidades para la adopción de acciones en el desarrollo local, manejo de cuencas hidrográficas y la aplicación de beneficios compartidos en las zonas de influencia de proyectos que pueden mejorar el bienestar de las comunidades y a la adaptación al cambio climático.

Se ha dado la aplicación de políticas públicas de forma sistemática desde el plan nacional de desarrollo hasta la aplicación de presupuestos y directrices en el sector público coherentes con el énfasis en el uso de fuentes renovables. Por otra parte, junto a las políticas nacionales, se han tenido organizaciones públicas, en el caso especial del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), que han tenido la capacidad de llevar a cabo acciones que han permitido cumplir con las metas establecidas por el país: contar con una generación basada en fuentes renovables y con una alta diversificación de fuentes energéticas.

Otro aspecto a tener en cuenta es que de forma paulatina y eclética el país ha ido integrando gradualmente más actores al sistema de generación eléctrica. Generadores privados han ido integrándose, vendiendo de forma segura su energía a un comprador único, sin asumir los riesgos que las oscilaciones de la generación renovable crea en los mercados eléctricos y que serán mayores por aspectos climáticos. Unido a ello, empresas municipales y cooperativas de electrificación rural han ido integrándose a la generación eléctrica del país.

Pese a que Costa Rica tiene inventariado su potencial de generación y ha mostrado capacidad para el desarrollo de proyectos eléctricos, existen una serie de limitaciones y retos que tendrá que enfrentar los próximos años. Dentro de ellos están:

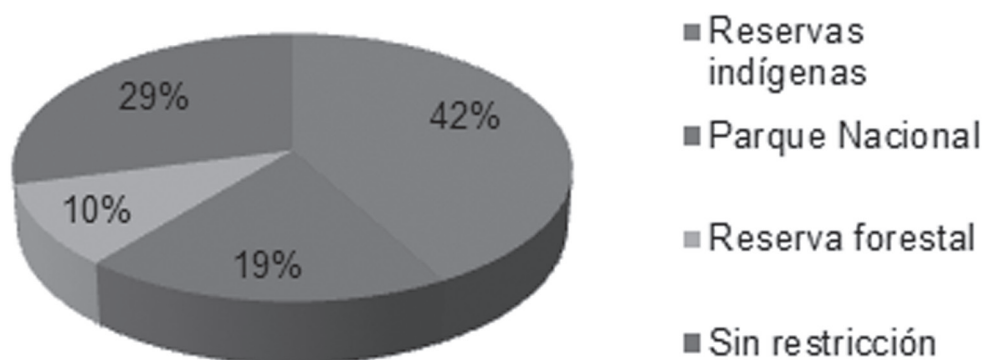
- La posible contradicción de su política de protección de los recursos naturales y el uso de los recursos energéticos.
- El uso alternativo de los recursos y el ambiente.
- La conciencia ambiental y la normativa legal desarrollada en el país.
- Unido a ello, el deterioro ambiental y los posibles efectos del cambio climático a mediano plazo son elementos que afectan significativamente, el desarrollo y operación del sistema eléctrico.

Estos aspectos, junto a otros hacen muy complejo el desarrollo de proyectos energéticos. Sobre estos retos y restricciones se tratará la siguiente sección.

### **III. Los recursos para generación y sus restricciones**

En Costa Rica se tiene una estimación del potencial de las diferentes fuentes energéticas para generar electricidad. En el caso de la fuente hidroeléctrica es la más abundante, de menor costo, más madura y con mayor valor agregado nacional. No obstante como se aprecia en la figura 68, tienen una seria restricción.

Figura 68. Costa Rica: Potencial de generación hidroeléctrica según restricción



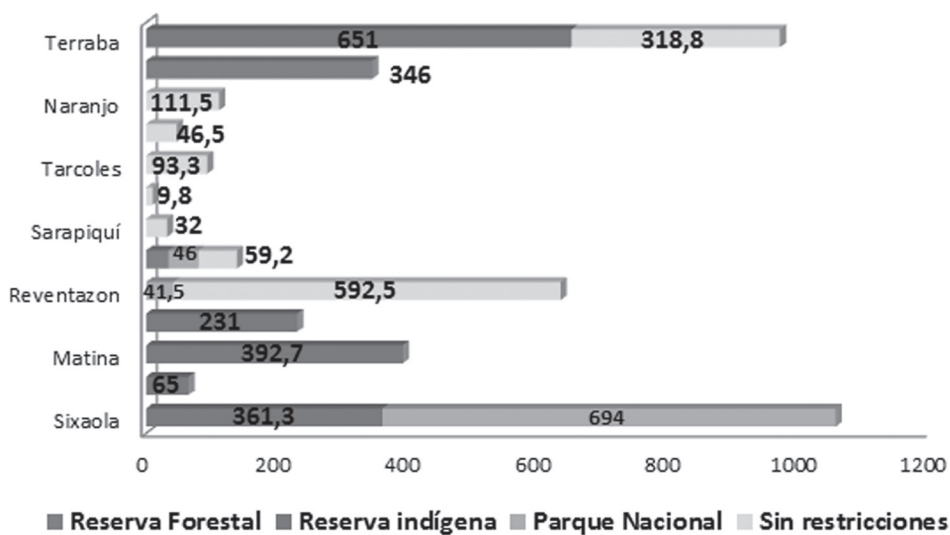
Fuente: CENPE-ICE (2013).

Como se aprecia, 42% del potencial se encuentra en Reservas Indígenas, 19% en Parques Nacionales y 10% en Reservas forestales. Únicamente 29% de los recursos se encuentran fuera de áreas con algún grado de restricción.

Unido a la restricción legal establecida el país ha desarrollado un marco normativo adicional de protección del ambiente y de derechos ciudadanos, lo cual junto con un importante desarrollo de organizaciones sociales de corte ambientalista profundo hacen muy difícil el desarrollo de proyectos eléctricos en el país.

La figura 69 presenta el potencial de generación hidroeléctrica por cuenca hidrográfica que ha sido considerada de interés para generación. La cuenca de mayor potencial es Sixaola con 1055,3 MW, representando el 25,6% del potencial en donde han sido ubicados posibles proyectos. No obstante, en esta cuenca es prácticamente imposible realizar algún proyecto, debido a que los proyectos identificados se encuentran en Reservas Indígenas o Parques Nacionales.

Figura 69. Potencial de generación hidroeléctrica por cuenca hidrográfica, en MW y por tipo de área protegida (restricción)



Fuente: Adaptación y elaboración propia con base en datos CENPE-ICE (2013).



La segunda cuenca en importancia para la generación hidroeléctrica es Térraba, en la cual se está en proceso de viabilización socioambiental del proyecto más grande con que cuenta el país, uno de los pocos con embalse de regulación plurianual. Dos terceras partes del potencial de proyectos identificados en esa cuenca tienen restricción al ubicarse en una reserva indígena.

En la cuenca de Pacuare se ubica uno de los proyectos más atractivos técnica y económicamente, con capacidad de regulación plurianual, sin embargo, diferentes grupos ambientalistas y grupos que hacen uso del río para fines turísticos han logrado evitar hasta ahora el desarrollo del proyecto.

Es evidente la fuerte restricción que tiene el país para poder desarrollar su potencial de generación eléctrica de las fuentes renovables convencionales. Un importante potencial de las fuentes hidroeléctricas y geotérmicas aún no explotadas, se ubica en áreas con restricciones totales o parciales, por ser áreas protegidas (parques nacionales, refugios de vida silvestre o reservas indígenas). Así como un considerable potencial bruto de energías no convencionales como el caso de la eólica y biomásicas (cuadro 15).

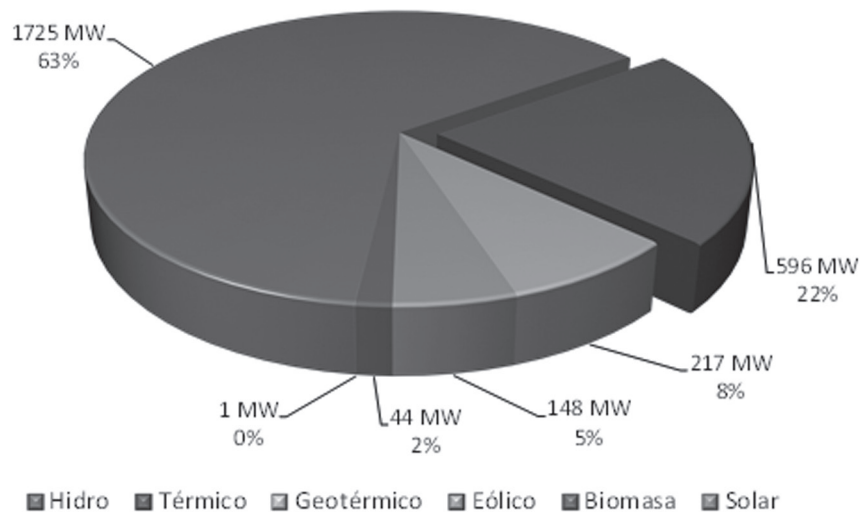
*Cuadro 15. Costa Rica: Recursos energéticos renovables para generar electricidad*

FUENTE	POTENCIAL BRUTO MW	IDENTIFICADO (incluye instalado) MW	CAPACIDAD INSTALADA MW	% INSTALADO DEL IDENTIFICADO
Hidroeléctrico	25 500	6 474	1 644	25%
Geotérmico	865	257	217	84%
Eólico	600	274	248	91%
Biomasa	635	95	44	46%
<b>Total</b>	<b>27 600</b>	<b>7 100</b>	<b>2 153</b>	<b>30%</b>

Fuente: ICE (Datos relevantes del sector electricidad a diciembre 2013).

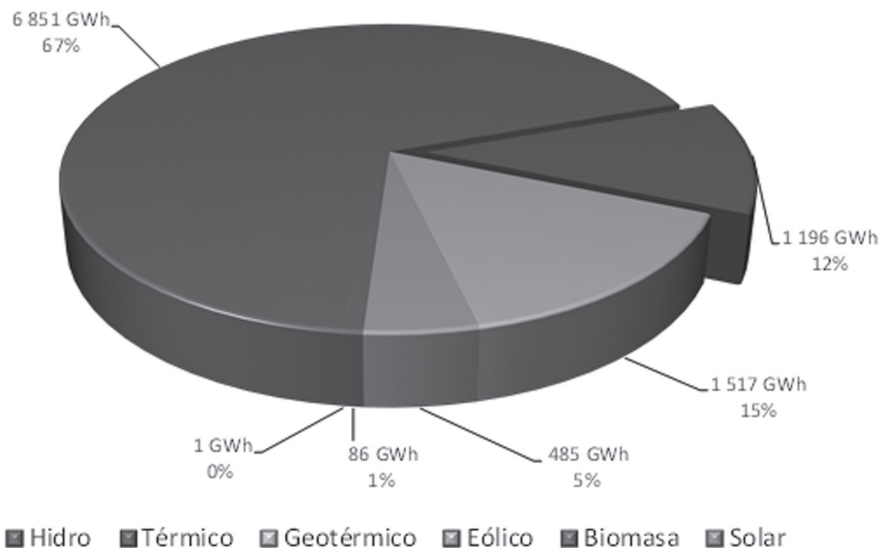
La energía eólica representa un potencial de alrededor de 600 MW (cuadro 15) para Costa Rica, es rentable y se ha ido incorporando paulatinamente. Por sus características no proporciona energía firme al sistema, lo que obliga a complementos en energía firme como la hidroeléctrica o la térmica. Este hecho contradice el planteamiento de algunos que pretenden un desarrollo eléctrico basado únicamente en fuentes renovables no convencionales, las cuales en el ámbito internacional muestran de forma clara fuertes limitaciones a mediano plazo para subsanar la creciente demanda energética del modelo de crecimiento económico actual. En Costa Rica a diciembre del 2013 la generación con energías no convencionales no superaba 6% del total generado en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), con una capacidad instalada de 8% del mismo SEN, como se muestra en las siguientes figuras:

Figura 70. SEN: Capacidad instalada por tipo al 31 de diciembre del 2013



Fuente: ICE, Centro Nacional de Control de Energía (Diciembre 2013).

Figura 71. SEN: Generación por tipo (GWh) al 31 de diciembre del 2013



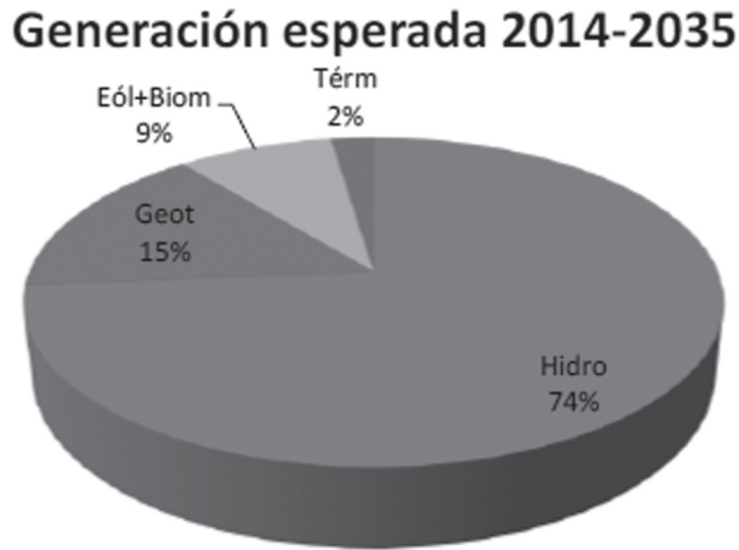
Fuente: ICE, Centro Nacional de Control de Energía (Diciembre 2013).

La energía solar fotovoltaica tiene un alto costo y su componente importado es elevado, lo cual restringe su efectivo aporte a mediano plazo (15 años). Si ésta fuente fuera sometido a un análisis del ciclo de vida y las entropías generadas, los efectos ambientales de ésta fuente serían significativos.

Según el Consejo de Electrificación Centroamericana (CEAC, 2010), la dependencia del sistema eléctrico a los combustibles fósiles importados aumentó en la década de los 90, cuando la participación de las energías renovables cayó de un 90% a un 60%, mientras que la participación del petróleo subió. Según los planes de expansión de este ente regional, el desarrollo futuro estará basado en la hidroelectricidad, gas natural licuado, geotermia, carbón, bunker, así como aportes menores de energía eólica y bagazo. Esto lo evidencia, en el caso de Costa Rica, el más reciente Plan de Expansión de la Generación Eléctrica del período 2014-2035, donde se indica que la generación esperada del

período, por fuente de energía, será 74% hidroeléctrica, 15% geotérmica y un 9% de fuentes eólicas, biomásicas y solares. El térmico, usado solo como complemento de las renovables, cubrirá el 2% de la generación total, como se muestra en la figura 72.

Figura 72. Porcentaje de generación por fuente 2014-2035



Fuente: ICE: Plan de expansión de la Generación Eléctrica del periodo 2014-2035 (Abril 2014).

Se debe mantener la investigación, desarrollo e incentivar proyectos que aprovechen recursos renovables, disminuyan contaminación al menor costo y entropía posible. Se debe estar atento para que en el momento que estas energías resulten competitivas, se incorporen a la producción eléctrica y den su aporte.

Unido a lo anterior las comunidades son más críticas y exigentes en relación con los posibles efectos de los proyectos eléctricos, debido a diferentes razones, entre las cuales se encuentra: La exclusión social debido a la inequidad del modelo de crecimiento económico, la búsqueda de beneficios, mayor exigencia de prácticas ambientales apropiada, influencia por parte de grupos ambientalistas sobre las comunidades, entre otros.

Algunos grupos ambientalistas se oponen al desarrollo hidroeléctrico. Un grupo pequeño de dirigentes de organizaciones no gubernamentales tienen en su agenda con el apoyo de organismos o agencias de cooperación internacionales para oponerse a cualquier desarrollo eléctrico del país. Los desaciertos en algunos casos de proyectos eléctricos en diversos países, son un buen argumento para que se fortalezcan estas posiciones<sup>21</sup>.

Durante muchos años las tarifas eléctricas tenían un rezago en muchos ocasionado por razones políticas, esto generó una subvaloración de la electricidad, que no permitió que acciones tendientes al uso eficiente de la electricidad y de administración de la demanda tuvieran relevancia, tanto en las políticas públicas como en las acciones de los agentes privados.

<sup>21</sup> Según el criterio de funcionarios de PH Itaipú Brasil, han encontrado grupos ambientalistas de diferentes tipos. Algunos pagados por las empresas petroleras internacionales, otros financiados por las empresas desarrolladoras de fuentes renovables no convencionales, mientras que otros son dirigentes locales con intereses específicos que acceden a recursos económicos internacionales o nacionales. Presentación Colegio de Ingenieros de Costa Rica, octubre 2004.

Los aumentos de los últimos años (2011, 2012 y 2013) han creado un buen ambiente al ahorro de electricidad y a la generación propia estimulada mediante el plan de generación distribuida del ICE, en especial el uso de la energía solar fotovoltaica.

Con base en la situación expuesta, si no se llevan a cabo acciones tendientes a modificar el panorama expuesto, es de esperar que en el mediano plazo (10 a 15 años) el subsector electricidad tenga que utilizar un mayor componente térmico para generar electricidad, lo cual profundizaría el problema que tiene en la actualidad el sector energía de Costa Rica en cuanto a la alta dependencia energética externa, uso de divisas y alto grado de contaminación ambiental<sup>22</sup>.

#### IV. El riesgo climático en Centroamérica

Para American Capital Rating ([www.ratingspcr.com](http://www.ratingspcr.com)), las decisiones fiscales, el comportamiento económico y las decisiones de inversión estarán influenciados por el grado de riesgo que los países tengan. Para ello se basan en un informe de riesgo por cambio climático que se elaboró en Alemania (publicado por la Editorial Germanwatch e.V. en su sitio web).

Por el fenómeno del cambio climático, se pone en riesgo la vida de seres humanos, especialmente los más pobres por sequías, inundaciones y tormentas (CEPAL y otros, 2010). Se pueden identificar cinco mecanismos de transmisión de los efectos nocivos del cambio climático, que ponen en riesgo las posibilidades de avanzar en el desarrollo humano, principalmente en países como los centroamericanos (Jiménez *et al.*, 2010):

1. Menor producción agrícola y mayor inseguridad alimentaria;
2. Conflictos por falta de agua;
3. Aumento del nivel del mar y mayor exposición a desastres meteorológicos;
4. Extinción de ecosistemas y biodiversidad; y
5. Aumento de epidemias.

El Índice de Riesgo Climático publicado por Germanwatch e.V., establece que Honduras, Nicaragua, Guatemala y El Salvador se ubican entre los países con mayores costos sociales (muertes) y económicos (pérdida de producción) como resultado del cambio climático, mientras Costa Rica y Panamá se encuentran en mejor posición (Germanwatch e.V).

Para hacer frente al cambio climático se requerirá de acciones nacionales y de la cooperación internacional (Stern, 2007). Será necesario, por un lado, reducir los niveles de contaminación, pero también se debe lograr una adaptación mundial a la nueva realidad climática, que se integre a las políticas públicas de desarrollo y eliminación de la pobreza. Naciones Unidas estima que se necesitarán entre US\$170 y US\$765 miles de millones anuales para costear estos programas de mitigación y adaptación, lo que requerirá el cumplimiento de compromisos relacionados con la ayuda al desarrollo y reformas fiscales que aumenten la capacidad de maniobra de los gobiernos en el mundo ([www.icefi.org](http://www.icefi.org)).

Uno de los principales problemas que produce actualmente la variabilidad climática, es la escasez de alimentos causada por una de las peores sequías en la región centroamericana entre el 2009 y 2010, en especial en Guatemala, Honduras y Nicaragua, provocada por el fenómeno de El Niño. Este fenómeno se vuelve cada vez más común y severo en esta región, siendo la población rural, en especial las economías campesinas de subsistencia, las que tengan los efectos más graves (World Bank, 2009).

---

<sup>22</sup> En esa década, los hidrocarburos crecieron a una tasa promedio anual del 6,1% y en el año 2000 representaban el 72% del consumo total de energía. El consumo de electricidad creció a una tasa promedio anual del 5,2%. En el 2000, la electricidad representó el 20% del consumo total de energía. MINAE, Plan Nacional de Energía 2002-2016.

Dentro de los potenciales efectos por el cambio climático para el sector energía se menciona: a) reducción de la capacidad de generación hidroeléctrica, debido a alteraciones en las precipitaciones y a mayor sedimentación de presas y embalses, B) ampliación de la demanda de energía eléctrica en horas pico debida al incremento en el uso de sistemas de climatización, c) deterioro de torres y cables de transmisión y subestación eléctrica por eventos hidrometeorológicos extremos, d) incremento de precios al consumidor (CEPAL *et al.*, 2010).

Uno de los sectores que será más afectado por el cambio climático es el eléctrico, tendrá por una parte mayores demandas de electricidad por los aumentos de temperatura. De igual manera, por las variaciones que se darán en la cantidad de agua, sol, viento y biomasa disponible para la producción de electricidad.

Un aspecto positivo a destacar es que por la necesidad de contar con información de la disponibilidad del recurso hídrico, los países que han podido identificar su potencial con mayor precisión, dada su red hidrometeorológica, son los que podrán efectuar mejores proyecciones de escenarios de cambio climático al integrar los registros que por muchos años han recabado para efectos del desarrollo eléctrico.

Además hay oportunidades de que las acciones que puedan desarrollarse en el marco de planes de gestión ambiental de los estudios ambientales, planes de acción y de manejo de cuencas, puedan contribuir a adaptarse, mejorando el ordenamiento y uso de los recursos potencialmente afectados por el cambio climático (Jiménez, 2008).

Las variables climáticas son un elemento a considerar en los procesos de planificación y definición de las políticas públicas, de los procesos de decisión de las inversiones públicas y privadas, por ello, no se debe ver como elemento que no le corresponde considerar a las diferentes entidades públicas o privadas, por el contrario es un elemento sustantivo que deberá tenerse presente para la mayoría de decisiones económicas y de política ambiental en Centro América (Jiménez, 2011).

## **V. Acciones estrategias para el aprovechamiento sostenible del potencial de generación eléctrica**

Las restricciones, usos conflictivos y alternativos, derechos ciudadanos, normativa ambiental, así como la existencia de un enfoque de protección absoluta en algunos sectores y organizaciones plantea el reto de demostrar que es posible un uso de los recursos de forma sostenible.

Para mantener y mejorar el aporte del subsector eléctrico con fuentes renovables, debe lograrse un acuerdo de grupos sociales con diferentes visiones e intereses; lo cual requiere del diseño, discusión, validación y ejecución de un conjunto complejo y sistémico de políticas públicas que permitan al subsector electricidad seguir contribuyendo al desarrollo sostenible de nuestros países.

Seguidamente se detallan las acciones con el fin de poder subsanar los problemas y restricciones que enfrenta para el desarrollo eléctrico futuro:

### *Planificar desde las fases previas*

Los proyectos eléctricos requieren de periodos de maduración generalmente largos, mediante estudios de diferente tipo. Se considera que es fundamental integrar los estudios ambientales desde la identificación de los proyectos con el fin de planificar el aprovechamiento de los recursos en la cuenca, establecer las restricciones ambientales existentes y dar alternativas de diseño, si es posible que técnicamente minimicen las afectaciones mediante la prevención. De igual forma en las fases de pre

y factibilidad los estudios ambientales en sus diferentes ámbitos deben irse profundizando, de tal manera que formen parte del proceso de análisis y decisión del desarrollo del proyecto. Incorporar el criterio de las comunidades e interesados es vital, con el fin de ir creando la viabilidad social de proyecto.

Una vez completados los estudios, se determinará la viabilidad ambiental por medio de la identificación y valoración preliminar de los impactos más significativos del proyecto. En esta etapa será conveniente iniciar el proceso de información a las comunidades sobre la posibilidad de desarrollo de un proyecto y del horizonte temporal del mismo. Se deben desarrollar políticas, estrategias, normas y procedimientos para la relación con las comunidades.

En el área ambiental la factibilidad está compuesta por el Estudio de Impacto Ambiental (EslA). Estos estudios se crearon como instrumentos de planificación y toma de decisiones. El proceso del EslA en sus diferentes fases busca la mayor rigurosidad técnica científica, adicionalmente los estudios se validan y enriquecen con procesos participativos en las diferentes etapas. Así pues, en la fase de diagnóstico, identificación y valoración de impactos, realizada por los equipos interdisciplinarios se participan a las comunidades, rescatando sus observaciones en el estudio. De forma muy especial el plan de gestión ambiental se prepara con el propósito de minimizar las afectaciones ambientales y obtener los mayores beneficios el proyecto en las comunidades, para ello se presentan y concilian los diferentes criterios, con el fin de contar con un medio efectivo para la prevención, mitigación y compensación ambiental de los proyectos eléctricos.

### *Enfoque y responsabilidad en la gestión de cuencas*

Se debe usar el enfoque de cuenca hidrográfica, en los procesos de análisis para identificar y evaluar los proyectos de desarrollo hidroeléctrico. Los planes maestros de desarrollo hidroeléctrico expresiones concretas del esfuerzo de planificación del país aplicando el enfoque de cuenca hidrográfica deben utilizarse. Para esto se deben realizar de forma permanente estudios básicos que permitan medir el caudal de los ríos, la radiación solar, el viento, la distribución estacional, los cambios ocurridos en los patrones de las lluvias, la calidad del agua, entre otras variables que permiten estimar el aporte energético y ayudan a predecir los posibles escenarios futuros que se pueden tener ante el cambio climático.

De forma responsable las empresas de generación eléctrica pueden contribuir a la ejecución de planes de manejo y de acción para la gestión sostenible de cuencas de su interés. En la planificación e implementación de acciones en las cuencas, las empresas productoras de electricidad deben actuar como un usuario responsable y comprometido. Se requiere necesariamente la participación activa de distintas instituciones, las comunidades y las organizaciones sociales de diferente índole, de manera que permita establecer la factibilidad económica, institucional, social y legal de los planes y programas identificados, para su posterior ejecución (Basterrechea, M. y otros, 1996).

### *Participación social y compromiso con las comunidades aledañas a los proyectos eléctricos*

Se debe estudiar y desarrollar formas, metodologías y la creación de instancias para la participación social, en lo relacionado con el desarrollo de proyectos. El criterio de las comunidades de forma paulatina se debe tener presente, según la etapa en que se encuentre el proyecto. Se debe buscar aplicar metodologías participativas con el fin de que puedan tenerse presente en las concepciones del proyecto, diseño y ubicación de obras, así como en su posible operación de la planta, los aspectos socio ambientales indicados por las comunidades en las zonas de influencia de los proyectos.

Se debe tener el compromiso con la transparencia, el respeto y acercamiento oportuno con las comunidades, para buscar que el desarrollo de las obras. Los proyectos deben ser una fuente de desarrollo local y de la cuenca; que permita minimizar los potenciales efectos del cambio climático (Jiménez, R., 2005).



## *Uso de instrumentos económicos para una mejor distribución de beneficios*

Es conveniente buscar el empleo de instrumentos económicos para la sostenibilidad ambiental y social. Los afectados directos; dueños de tierras, poblaciones indígenas entre otros, requieren de estímulos económicos para sentirse parte beneficiada de los proyectos eléctricos. El uso de canon, beneficios compartidos, pago de servicios ambientales o participación minoritaria entre otros instrumentos, permitirá la ejecución de acciones para financiar planes integrados para la gestión de cuencas y procesos de desarrollo local y regional a partir de la ejecución de proyectos eléctricos.

Lo anterior permite originar un círculo virtuoso entre creación de infraestructura eléctrica y procesos de fomento del desarrollo, a través de esquemas de transferencia de recursos hacia las comunidades directamente afectadas, por medio de los programas de gestión ambiental de los estudios de impacto ambiental, los planes de gestión de cuencas y planes de desarrollo local, empleando diferentes instrumentos económicos y acuerdos institucionales.

Los aspectos indicados tienen especial importancia para obtener mayor viabilidad de los proyectos eléctricos, ya que en el medio rural existe un alto grado de desconfianza y molestia hacia el modelo de crecimiento económico de los últimos 25 años, que ha llevado a una distribución poco equitativa del ingreso y a la pérdida de opciones productivas y de bienestar en diferentes regiones de Centro América.

El criterio indicado, de que las obras son para el beneficio del país, ya no resulta tan válido o aceptado por las comunidades, ya que precisamente son las poblaciones ubicadas en las zonas de influencia de los proyectos futuros, los que en menor grado han disfrutado el bienestar resultante del modelo de crecimiento económico asumido en los últimos 25 años. Esta situación plantea la necesidad de un cambio de enfoque y la creación de mecanismos de política pública redistributivos que propicien las condiciones para el desarrollo en regiones o poblaciones afectadas por el desarrollo eléctrico.

## *Promover proyectos con embalses multipropósito y multianuales*

La necesidad de electricidad durante todo el año con la mayor seguridad y uso de fuentes renovables es posible en una alta proporción si en los próximos años se construyen proyectos con embalses grandes, en especial si se logra construir obras que guarden agua de épocas lluviosas para usarse en los períodos de menor lluvia. Esto es fundamental para el funcionamiento de los sistemas eléctricos, dados los recursos energéticos disponibles y desarrollados hasta ahora. Unido a ello los embalses pueden ser un medio para disminuir los efectos negativos de los fenómenos climáticos que causan daños a la infraestructura e inundación. Además, el estrés hídrico plantea la necesidad de almacenar agua para usos humanos, irrigación y otros usos, acciones que son medidas urgentes de adaptación al cambio climático, en especial en las regiones en donde las lluvias disminuirán, cambiarán su distribución en el año y aumentarán las temperaturas, esto hace conveniente la promoción de embalses multipropósito y plurianual (Jiménez, 2012).

## *Comunicación e información*

Es necesario que los planes de desarrollo nacional en el sector eléctrico tengan un alto apoyo de los diferentes entes y organizaciones. Para ello se debe comunicar, informar, explicar los planes y proyectos. Estos deben ser los mejores, en el marco de las posibilidades técnicas, ambientales y económicas. Si esto es así, el convencimiento mediante una asertiva información y comunicación con los actores y las comunidades es vital, para poder aprovechar de forma sostenible los recursos energéticos que el país tiene.

## VI. Plan de Fuentes Renovables No Convencionales (PFRNC)

El ICE ha estado desarrollando un conjunto de acciones que se resumen en el plan de fomento de fuentes renovables no convencionales (PFRNC). Este plan integra diversas acciones estratégicas, planes y proyectos que buscan aumentar la participación de las renovables no convencionales, hacer investigación, proyectos pilotos, inversiones en proyectos y cambios en normativas, con el fin de propiciar un desarrollo relevante en los próximos años en fuentes renovables no convencionales, en donde la sociedad tenga un mayor papel (redes inteligentes, generación distribuida, programas de ahorro de electricidad) y que complementen las otras fuentes existentes, con el fin de hacer más robusto y sostenible el sistema eléctrico de Costa Rica.

*El PFRNC tiene el siguiente objetivo*

Promover el aprovechamiento de fuentes renovables no convencionales en la generación de electricidad, de forma que contribuyan a la diversificación de las fuentes de generación, a la sostenibilidad y a las políticas nacionales de Cambio Climático, procurando su incorporación al sistema eléctrico nacional, a un costo razonable, mediante un esfuerzo sistemático de investigación, desarrollo e innovación. Para concretar el plan se tienen una serie de acciones que se aplicarán a los programas por fuente, que permitirán en cada caso cumplir con las metas perseguidas y obtener los productos finales propuestos, en la siguiente figura se resume de forma simplificada este proceso (ICE, 2012).

*Figura 73. Acciones estratégicas del Plan de fuentes Renovables no convencionales (PFRNC).*



Fuente: ICE (2012).

De forma ilustrativa en la figura 74 se presenta la estructura y contenidos generales del plan. Se partió en la elaboración del plan de un seguimiento y diagnóstico de las fuentes y tecnologías, mostrándose parte de la información en el plan. Por otra parte, se analizó la legislación aplicable y se definieron lineamientos y acciones estratégicas para guiar la acción futura.

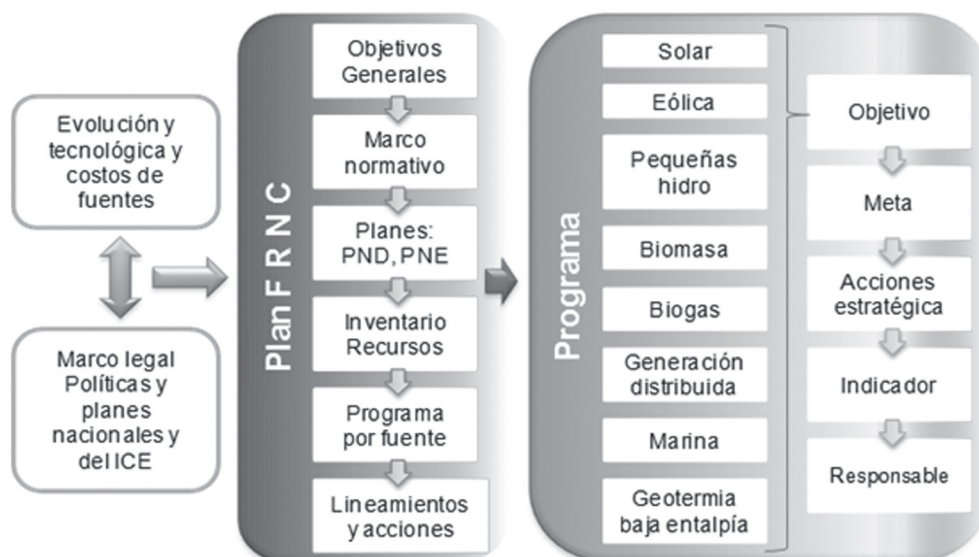
El plan se concreta en programas en su mayoría por fuente de generación, integrando el esfuerzo existente en generación distribuida que se convierte en un medio para que diferentes fuentes en pequeña escala se sumen al esfuerzo nacional guiado por el ICE.

Cada programa tiene definido objetivos y metas, las acciones estratégicas para cumplirlo y los indicadores de desempeño. Unido a ello se ha definido el responsable de esa labor con el fin de poder definir sus tareas.

Así cómo fue posible asumir el reto de abastecer la demanda en décadas pasadas como la de 1960 con tasas de crecimiento de la economía mayores al 8%, con aumentos permanentes en la cobertura eléctrica, el reto y la oportunidad futura del ICE Electricidad es mostrar que es factible lograr un abastecimiento seguro, de calidad y con preponderancia con fuentes renovables y la participación de diferentes actores, bajo un modelo solidario.

Para lograr abastecer la demanda futura el ingenio, la creatividad y la visión de largo plazo deberán estar presentes, para hacer uso de todas las fuentes, integrar diversos sectores al esfuerzo por producir y ahorrar energía, manteniendo un modelo eléctrico basado (comprador único que evita los riesgos de mercado y financieros a los pequeños emprendimientos de renovables) en el ICE, que es solidario y sostenible (ICE, 2012).

Figura 74. Estructura y contenidos del Plan de fuentes Renovables no convencionales (PFRNC)



Fuente: ICE (2012).

## VII. Lecciones aprendidas del subsector eléctrico de Costa Rica

Costa Rica es el país de la región con mayor generación con fuentes renovables. Esto se ha debido a una política nacional de largo plazo, a las características de las instituciones existentes, que no fueron desmanteladas en las décadas del ochenta y noventa.

En ese sentido pareciera necesario hacer algunas reflexiones sobre los resultados obtenidos por los países en su generación eléctrica a partir de algunas enseñanzas del caso de Costa Rica:

- Contar con recursos potenciales para generar electricidad es relevante, pero igual o más importante es tener la capacidad de medir, inventariar y valorar el potencial de las fuentes existentes.
- El mantener capacidad de gestión institucional para tener una apropiada rectoría, planificación, ejecución, seguimiento, regulación y evaluación es vital para sectores estratégicos como el eléctrico y para conocer y predecir escenarios futuros por el cambio climático (Jiménez et al, 2010).

- c. Si se establecen mecanismos de mercado, estos deben tener reglas o incentivos que favorezcan las fuentes renovables, pues en caso contrario, tenderán a dominar las fuentes fósiles que tienen energía firme y mejor capacidad de participar en mercados competitivos (Jiménez, R., 2009).
- d. Se debe tener procesos de planificación con diferentes horizontes temporales, lo cual implica tener la capacidad de estudiar y tener en cartera proyectos de fuentes renovables para su desarrollo. Para esto se requiere de un proceso mediante el cual se determinan acciones que guíen el desarrollo a futuro del abastecimiento energético de una región, de forma que se dé un crecimiento sostenible basado en estrategias y escenarios que progresivamente logren el objetivo propuesto
- e. El régimen de propiedad no es determinante, como si las reglas y una política energética claras y que se cumpla. En general hay complementariedades entre la participación pública y privada para sectores intensivos en capital como el sector eléctrico.

Es necesario construir formas e instancias que permitan un efectivo desarrollo sostenible. El sector eléctrico ha contribuido al desarrollo de forma importante. En la actualidad se tiene como reto el seguir siendo un agente de desarrollo mediante el abastecimiento eléctrico con la mayor proporción posible de fuentes renovables, las siguientes son acciones recomendables en la región:

- a. Informar a la opinión pública nacional de las opciones energéticas, sus limitaciones, sus costos y beneficios.
- b. Continuar integrando la variable ambiental en el proceso de evaluación, decisión y diseño de sus proyectos.
- c. Desarrollar instancias y metodologías de rendición de cuentas, información y participación social y planes de comunicación social efectivos.
- d. Desarrollar en las zonas de influencia de los proyectos acciones de gestión de cuencas, programas de gestión ambiental y planes de desarrollo local, articulados y en conjunto con las instituciones y organizaciones de las zonas de los proyectos.
- e. Aplicar sistemas de gestión ambiental en sus procesos.
- f. Continuar investigando y desarrollando programas pilotos con fuentes renovables no convencionales, con el fin de establecer parámetros técnicos, económicos y ambientales que permitan su evaluación y determinación de la viabilidad a mediano plazo.
- g. Internalizar los costos ambientales en los servicios públicos de electricidad.
- h. Integrar la problemática del cambio climático como un aspecto que afectará la generación futura, para lo cual se debe considerar este elemento, en la ubicación, diseño de proyectos de generación eléctrica y los planes de manejo en las cuencas como un potencial medio para adaptarse y disminuir los potenciales efectos por éste fenómeno.
- i. Elaborar y aplicar programas de uso eficiente de la energía y administración de la demanda, en ese sentido la región tiene carencias que se deben subsanar.
- j. Impulsar el uso de fuentes de energía renovable a pequeña y mediana escala, complementado con el desarrollo de la generación distribuida.

Se es del criterio que con sus variantes, estos elementos mencionados pueden ser de utilidad para los sectores eléctricos de Centro América, lo cual permitirá mejorar el aporte de las fuentes renovables, mejorar la capacidad de gestión institucional, disminuir los efectos ambientales negativos ocasionados por proyectos eléctricos, lograr viabilizarlos y además disminuir los potenciales efectos ante el fenómeno de cambio climático, si se desarrollan paralelamente a los proyectos de generación eléctrica, planes de gestión ambiental, planes de manejo de cuencas, planes de desarrollo local, acciones que pueden tener efectos positivos sobre la capacidad de asimilación de los ecosistemas y mejorar la adaptación.

## Referencias

- Azqueta, D. y Barry, F. (1996). *Economía y Medio Ambiente*. Colombia: MacGraw-Hill.
- Basterrechea, M. y otros. (1996). *Lineamientos para la preparación de proyectos de manejo de cuencas hidrográficas*. Estados Unidos: Banco Interamericano de Desarrollo.
- CEPAL, SICA. (2007). *Estrategia energética sustentable Centroamericana 2020*. Recuperado en: <http://www.cepal.org/publicaciones/xml/7/31977/L828.pdf>
- CEPAL, Naciones Unidas. (2009). *Informe de factibilidad Economía del Cambio Climático en Centroamérica*. México: Subsede México.
- CEPAL. (2010). *Centroamérica: Estadísticas del subsector eléctrico, 2009*. México: Sede Subregional México.
- CEPAL, UKAID, CCAD, SICA. (2010). *La economía del cambio climático en Centroamérica*. Recuperado en: [http://www.cepal.org/mexico/cambioclimatico/documentos/sintesis\\_2012baja.pdf](http://www.cepal.org/mexico/cambioclimatico/documentos/sintesis_2012baja.pdf)
- Common, M. y Stagl, S. (2008). *Introducción a la Economía Ecológica*. España: Editorial Reverté S.A.
- Consejo de Electrificación de América Central. (2010). *Plan indicativo de expansión de la generación de la generación, período 2011-2025*. Recuperado en: [http://www.ceaconline.org/documentos/INFORME\\_GTPIR\\_2011\\_2025.pdf](http://www.ceaconline.org/documentos/INFORME_GTPIR_2011_2025.pdf)
- COP 15. (2009). *Copenhagen Accord. Advanced unedited version*. Recuperado en: [http://unfccc.int/meetings/cop\\_15/items/5257.php](http://unfccc.int/meetings/cop_15/items/5257.php)
- Costanza et al. (1999). *Introducción a la Economía Ecológica*. México: Primera Edición, Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V.
- Daly, H. y Cobb, J. (1993). *Para el bien común: Reorientando la economía hacia la comunidad, el ambiente y un futuro común*. México: FCE.
- Dourojeanni, A. (1994). *La Gestión del agua y las cuencas en América Latina*. Chile: Revista de la Cepal 53.
- Georgescu-Roegen, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Estados Unidos: Harvard University Press.
- ICE. (2012). *Plan de promoción y desarrollo de fuentes no convencionales: 2012-2016*. Costa Rica: Gerencia de Electricidad, UEN CENPE, ICE.
- ICE. (2013). *Centro de Control de Energía. Datos de generación eléctrica año 2013, documento de trabajo*
- ICE. (2014). *Plan de expansión de la Generación Eléctrica del periodo 2014-2035, Centro Nacional De Planificación Eléctrica Proceso Expansión Integrada*. Costa Rica: ICE.
- International Institute for Sustainable Development (IISD). (2009). *Summary of the Copenhagen Climate*. Recuperado en: [http://www.iisd.org/pdf/2009/enb\\_copenhagen\\_commentary.pdf](http://www.iisd.org/pdf/2009/enb_copenhagen_commentary.pdf)



Jiménez, R. (2005). *Ciudadanía, sociedad civil y participación ciudadana en el desarrollo eléctrico*. Costa Rica: ICE.

Jiménez, R. (2008). *El sector eléctrico y el Plan institucional para el Cambio Climático (PICC) del Grupo ICE*. Costa Rica: Revista Vida ICE ISSN 1659-3154.

Jiménez, R. (2009). *Análisis del proceso de formulación de políticas para la reforma del sector eléctrico y su potencial incidencia en el marco institucional y la producción con fuentes renovables*. Universidad de Costa Rica: Tesis sometida para optar al grado de Doctor en Gobierno y Políticas Públicas.

Jiménez, R., Amit, R., Vindas, R. (2010). *Políticas de cambio climático en Costa Rica, integrando esfuerzos para asumir los retos*. Vicerrectoría de Investigación. Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia (UNED).

Jiménez, R. (2012). *El fenómeno del cambio climático: un análisis crítico desde la perspectiva de la Economía Ecológica*. Costa Rica: Revista Rupturas, Centro de Investigación en cultura y desarrollo (CICDE), Universidad Estatal a distancia (UNED).

Jiménez, R. (2012). *Importancia de los embalses de regulación en el sistema eléctrico de Costa Rica. El Caso del P. H. El Diqúis*. Costa Rica: Revista Ambientico, 227, ISSN 1409-214X.

Jiménez, R. (2012). *Enfoque y propuestas de políticas para enfrentar el cambio climático*. Costa Rica: Revista Ambientales, 44, ISSSN: 1409-2158, UNA.

Organización de la Naciones Unidas (ONU). (1998). *Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Recuperado en: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>

Pacific Credit Rating. (2014). *PCR Pacific Credit Rating*. Recuperado en: <http://www.ratingspcr.com/>

Pearce, D. y Turner, R. (1995). *Economía de los Recursos Naturales y el Medio Ambiente*. España: Celeste Ediciones.

Sönke Kreft & David Eckstein. (2014). *Global Climate Risk Index 2014*. Alemania: Germanwatch e.V.

Stern, N. (2007). *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Reino Unido: Cambridge, UK, Cambridge University Press.

World Bank. (2009). *Vulnerability to Climate Change in Agricultural System in Latin America and the Caribbean: Building Response Strategies Final Report*. Estados Unidos: World Bank.



# Determinación de Potenciales de Energía Marina en Costa Rica

*Dr. José Rodrigo Rojas Morales<sup>23</sup>*

## Resumen

Cerca del 95% de la energía eléctrica que usa el país se genera con fuentes hidroeléctricas, geotérmicas y eólicas, es un modelo que reduce la generación térmica, la dependencia de combustibles fósiles y la emisión de gases efecto invernadero. Sin embargo existen una serie de restricciones técnicas, legales, sociales y culturales que limitan el desarrollo de proyectos con base renovable, comprometiendo la estabilidad y seguridad energética nacional. Resulta fundamental que el modelo de desarrollo energético se diversifique incorporando opciones a partir de fuentes renovables no convencionales.

Bajo este contexto se presentan los resultados de una investigación con tres propósitos: determinar el potencial de energía marina contenida en olas, corrientes y mareas, zonificar los potenciales en ambas costas y analizar las opciones tecnológicas para extraer ese potencial. La ruta metodológica comprendió la compilación y sistematización de información disponible sobre las características físicas, topográficas, geológicas, ecológicas y restricciones legales de la zona marino-costera, así como la determinación de los parámetros oceanográficos fundamentales que definen la energía contenida en olas, mareas y corrientes. El cálculo se basó batimetrías, simulación computacional (Wavewatch III), validación con boyas (NOAA y NASA) y datos de velocidad de las corrientes oceánicas (OceanNOMADS).

Los resultados indican que las olas son el recurso energético más importante, su potencial técnico de generación es de 2000 MW y la producción anual de energía es 17,6 TWh/año. Si únicamente el 10% de este potencial fuese aprovechado, podrían ser satisfechas cerca del 17% de las actuales necesidades energéticas de Costa Rica. El potencial técnico de generación con corrientes oceánicas es de 32,3 MW y con mareas es de 0,5 MW. Los resultados, aunque preliminares, son alentadores y para la siguiente fase se requiere una estrategia nacional de desarrollo de energía marina como parte del proceso de planificación energética del país. Se recomienda el fortalecimiento de una red de monitoreo oceanográfico que considere clima de olas, corrientes en golfos, agitación oceánica y desarrollo de proyectos piloto. La hoja de ruta debe considerar la gobernanza marino costera y el marco legal, condiciones que facilitarán la priorización de sitios para prototipos adaptados a condiciones locales.

**Palabras claves:** energía marina, oleaje, corrientes en golfos, gobernanza marino costera

## Estimation of marine energy potentials in Costa Rica

### Abstract

About 95% of the country matrix energy comes from hydropower, geothermal and wind sources, such condition reduces the generation and dependence of fossil fuel and decrease greenhouse gas emissions. However there are several legal, social and cultural restrictions that blocks the growth and use of energy from renewable sources, bring in to the stability and national energy security. Therefore it is

<sup>23</sup> Proceso de Planeamiento Ambiental, CENPE-ICE, Costa Rica. [rrojasm@ice.go.cr](mailto:rrojasm@ice.go.cr)

fundamental the diversification of energy development pathway, through in corporation of non-conventional renewable energy sources. Under this context is presented the main findings of a research with three goals: determination of marine energy potentials from waves, tides and currents, a both coast potentials prioritization and technical options for potentials extraction. The methodological route includes compilation and systematization of all available information on the physical, topographical, geological, ecological and legal restrictions on coastal-marine zones as well as the fundamental oceanographic parameters defining the energy from waves, tides and currents. The calculation of the potential of different sources was based on specific information of bathymetry, computational simulation (WAVEWATCH III), buoys validation (NOAA and NASA) and data base on ocean currents speeds (Ocean NOMADS). Main results indicate that waves are the most important energy resource. Its technical potential generation is 2000 MW and annual energy production is 17.6 TWh/year. For instance, if only 10% of this potential was exploited, it could be satisfied about 17% of current energy needs of our country. The technical potential of ocean currents is 32.3 MW, and tide is the lowest with 0.5 MW. Although preliminary, the findings are encouraging for the next phase, however we need a national strategy for marine energy development as part of the country's energy planning. A network of oceanographic monitoring is suggested, which considers wave, currents in gulfs and development of pilot projects. The road map should also consider marine governance and legal framework issues, both ways will facilitate the prioritization of sites for prototypes adapted to local conditions.

**Keywords:** Marine energy, waves, ocean currents, coastal marine governance.

## I. Introducción

La demanda eléctrica en Costa Rica crece exponencialmente a tasas anuales cercanas al 2% (ICE, 2014). Para cubrir esta necesidad, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) ha establecido como política y modelo de desarrollo energético, la generación a partir de la hidroelectricidad y la geotermia (ICE, 2014). Dicho esquema ha sido reconocido a nivel internacional, no solo por el desafío de cubrir las necesidades energéticas del país con 95% de participación con fuentes renovables, sino por ser una estrategia enfocada en reducir la dependencia de combustibles fósiles apostando por la meta país de alcanzar la carbono neutralidad mediante la reducción de emisiones de gases efecto invernadero (Informe Estado de la Nación, 2013).

Sin embargo, aunque estos argumentos parecen suficientes para continuar con el desarrollo de proyectos que aseguren el fortalecimiento de la matriz energética, mediante embalses de regulación estacional y geotermia a la base, también existen una serie de restricciones y limitaciones que impiden este aprovechamiento. Literalmente el país cuenta con miles de mega-watts aprovechables, sin embargo no es posible utilizarlos debido a prohibiciones legales del desarrollo de proyectos en parques nacionales, áreas protegidas y territorios indígenas. Como si esto fuera poco, en todo el país han surgido bloques de grupos ambientalistas extremos en contra de casi cualquier proyecto del ICE. Ante este escenario resulta de carácter obligatorio incursionar en el desarrollo de alternativas de generación de energía con fuentes renovable, que ayuden a satisfacer la demanda eléctrica nacional a mediano y largo plazo. Un primer paso obligatorio es el fortalecimiento del Plan de Fuentes Renovables No Convencionales (PFRNC) del Sector Electricidad del ICE, este es la hoja de ruta y promoción de una serie de fuentes alternativas que respaldan, fortalecen y complementan la demanda energética nacional. Dentro del PFRNC se encuentra el programa de investigación de energía marina, objeto de este artículo.

En el sentido más amplio y en concordancia con lo indicado por (Bairdy Associates, 2012), la energía marina es aquella que es transportada por las olas, mareas, corrientes (costeras u oceánicas) o la producida por gradientes de temperaturas y salinidad. Desde el punto de vista físico y de acuerdo con Murillo (2001), el principio fundamental es que el movimiento de mares y océanos literalmente

representan un almacén de energía cinética capaz de ser transferida en una cantidad infinita de electricidad. Bajo esa perspectiva Costa Rica cuenta con un gran potencial ya que su territorio marino es 11 veces mayor que el terrestre y con una serie de condiciones oceanográficas aptas para la generación de electricidad mediante olas, mareas, corrientes o gradientes térmico/salinos (ICE, 2013). A pesar de lo indicado, el país no ha aprovechado tal recurso energético, los centros universitarios no cuentan con experiencia en el campo, el principio de realidad señala una débil línea base técnica y un campo desconocido y poco atendido por la comunidad científica local (ICE, 2013). Ante la necesidad de conocer las posibilidades energético-marinas, el Centro Nacional de Planificación Eléctrica (CENPE) del ICE, con el apoyo financiero del Banco Interamericano de Desarrollo, coordinó y ejecutó una consultoría internacional cuyos objetivos fueron:

- a. Para toda la Zona Económica Exclusiva (ZEE) determinar los potenciales energéticos de olas, mareas y corrientes marinas costeras y de origen térmico y salino.
- b. Establecer una zonificación y priorización del potencial energético considerando restricciones ecológicas, legales (parques nacionales, áreas marinas protegidas), económicos-financieras, o de otra naturaleza.
- c. Analizar las tecnologías capaces de extraer la energía bajo las condiciones oceanográficas locales.
- d. Diseñar, con base en criterios técnicos, un programa de investigación y una hoja de ruta de acciones para el desarrollo de energía marina en Costa Rica.

## II. Metodología

Esta investigación se centró en el estudio de energía undimotriz (la generada por el movimiento de las olas), energía mareomotriz (la que se produce por la atracción gravitacional que ejerce la luna y en menor medida por el sol) y la energía de las corrientes marinas que aprovechan la fuerza cinética de las corrientes costeras y profundas alejadas de la costa y que pueden ser de origen térmico y salino.

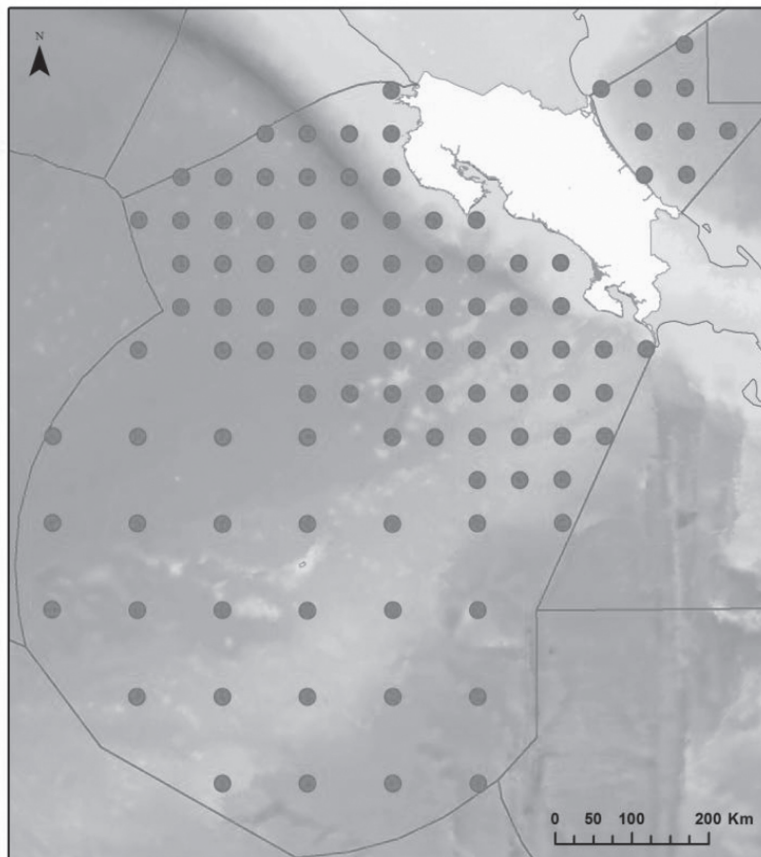
La primera fase de este estudio sistematizó información disponible sobre investigaciones relacionadas con las condiciones y dinámica marino costera del Pacífico y del Caribe de Costa Rica, se incluyeron factores climáticos, aspectos ecológicos, condiciones socio-económicas y marco legal vigente (ICE, 2013). Además se contó con el apoyo de informantes claves y especialistas de la Universidad Nacional de Costa Rica, Laboratorio de Ingeniería Marítima y Fluvial de la Universidad de Costa Rica, Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR), Fundación MarViva, BIOMARCC, Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC-MINAET), Instituto Costarricense de Turismo, Ministerio de Obras Públicas y Transporte y la UEN PySA-ICE.

El potencial teórico bruto se refiere al recurso energético extraíble sin ninguna restricción. El potencial teórico se obtiene restando todas las restricciones (legales, económicas, culturales, ecológicas y físicas) que existen en la zona marino costera y que impiden el desarrollo de proyectos. El potencial técnico es el extraíble con las tecnologías actuales. Para la evaluación del potencial energético bruto teórico se utilizaron datos disponibles en bases de información locales e internacionales (WAVEC, 2004, 2012). Para la zonificación y priorización de este potencial se emplearon extensiones geoespaciales del SIG aplicadas al análisis de batimetría, geología del fondo marino, ubicación de los puertos, red de distribución eléctrica, subestaciones conectoras, parques nacionales marinos, áreas protegidas, concesiones pesqueras y rutas comerciales de navegación de buques. Para el potencial teórico se valoraron los niveles técnicos factibles de profundidad y geología del fondo del mar, así como los diferentes tipos de restricciones no-técnicas y legales disponibles en las costas del Pacífico y el Mar Caribe, finalmente para la determinación del potencial técnico se consideraron las tecnologías disponibles y funcionales bajo las condiciones locales (WAVEC, 2012).

*a. Determinación de potenciales de energía de las olas*

La energía de las olas se calculó siguiendo la metodología “Preliminary Actions on Wave Energy R&D” (1991-1993) de la Comunidad Europea y propuesta por Pontes *et al.* (1993), el potencial bruto parte del análisis de batimetrías y simulación computacional que establece el modelo espectral de oleaje Wave watch III (ICE 2013). Para la calibración y validación se utilizaron los datos de observación generadas por las boyas NDBC (National Data Buoy Center, NOAA) y el altímetro del satélite oceanográfico Jason-1, operado por el CNES (Centre National d’Études Spatiales, de Francia) y la NASA (WAVEC 2012). Para calcular el potencial teórico se consideraron las restricciones locales de áreas marinas protegidas, áreas marinas de pesca responsable, zona de paso de cables submarinos rutas de navegación y una profundidad inferior a 50 m y superior a 200 m. Para la selección de sitios donde se pueda construir un proyecto, se utilizó el enfoque de análisis multi-criterio geo-espacial, este considera el clima de olas, cercanía de la costa a un punto de conexión a la red eléctrica, distancia a puertos (Operación y Mantenimiento) y geología del fondo marino. Los parámetros fundamentales para la determinación de la energía de las olas son la altura significativa de las olas ( $H_s$ , altura, en metros, media del tercio de las olas más altas), el periodo de pico (TP, inverso de la frecuencia de pico, en segundos, correspondiente al valor máximo de la densidad espectral) y dirección pico (DP en grado de las olas). Para el análisis se utilizó una malla de resolución espacial de  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  con resolución temporal de tres en tres horas. Para el análisis se seleccionaron un total de 105 puntos que cubren la ZEE de Costa Rica (figura 75) y un periodo temporal de 10 años comprendido entre enero de 2000 y diciembre de 2009, con resolución de 3 horas (ICE 2013).

*Figura 75. Localización del área de estudio, indicando la posición de los puntos obtenidos del modelo de re-análisis WWIII.*



Fuente: Con base en ICE, 2013.

### *b. Determinación de potenciales de energía de mareas*

La energía de las mareas se basa en el aprovechamiento de los gradientes de altura que resultan que se dan entre la marea alta y la baja. El principio del funcionamiento para la extracción es semejante a una central hidroeléctrica, a medida que la marea sube o bajase forma un flujo de agua que pasa en ambos sentidos a través de compuertas especiales, moviendo con ello turbinas que transforman la energía mecánica en energía eléctrica. Los parámetros básicos que se han considerado para identificar lugares para la explotación de la energía de las mareas son la amplitud media de marea y área de cuenca cerrada (ICE, 2013). El cálculo del potencial parte del principio que la energía extraída es proporcional al cuadrado de la amplitud de las mareas. La ecuación general que se aplica es la siguiente:

$$P(t) = \frac{1}{2} \rho g h^2(t)$$

Donde  $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$  y  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Para este tipo de energía, sólo pueden aprovecharse los lugares con una amplitud media de marea (h) superior a 5 metros. Por debajo de este valor los costos son prohibitivos. El primer paso para evaluar el potencial de explotación de la energía de las mareas es, por tanto, la identificación de lugares con un desnivel de marea superior a 5 metros (Hammons, 1997). Según esta premisa y de acuerdo con estudios locales, esta premisa no se cumple, resultados de investigaciones señalan que el valor más elevado es en Golfo Dulce (diferencias mareales de 3,3 m), sin embargo son gradientes muy bajos para ser aprovechados. Con estos datos, y teniendo en cuenta el lento avance tecnológico, no hay potencial suficiente para la explotación de la energía de las mareas en Costa Rica (ICE, 2013).

### *c. Determinación de potenciales de energía de corrientes*

Para el cálculo de las velocidades de corrientes costeras se utilizó la información generada por Lei (2002), Lizano & Alfaro (2004) y Quirós (2003), sin embargo debido a la escasa información y a la gran dispersión espacial y temporal de las series de datos, se corrieron modelos computacionales para simular el flujo de las mareas locales. Estos modelos son de 2D y se aplican a condiciones de profundidad promedio donde se supone un flujo uniforme en toda la profundidad de la columna de agua, asumiendo una ley de potencia  $1/7^\circ$ . Debido a la calidad y variabilidad de la información utilizada se recomienda una campaña sistemática de medición y un mejoramiento del modelado computacional. Para el análisis de las corrientes oceánicas se utilizaron los modelos de simulación desarrollados por la NCOM (Navy Coastal Ocean Model) (Barron et al., 2006), por NAVOCEANO (Naval Oceanographic Office) y por POM (Princeton Ocean Model) del Laboratorio de Investigación Naval (Blumberg y Mellor, 1987 y Martin et al. 1998).

Para el cálculo del potencial teórico de las corrientes de marea se valoraron sectores marinos con estrechos o donde el flujo está limitado por la presencia de islas o montañas sumergidas. Las zonas del Golfo Dulce y el Golfo de Nicoya han sido reconocidas como las áreas más adecuadas para el desarrollo de proyectos de energía con corrientes. Para el cálculo de velocidades se utilizó el principio de la potencia hidráulica de un fluido en un tubo de corriente con un área de sección transversal A que está dada por:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

donde V es la velocidad media del flujo. Esto significa que la potencia es altamente sensible a las variaciones de la velocidad del flujo (ya que depende de  $V^3$ ). Las corrientes tienen la misma periodicidad que las oscilaciones verticales de la marea. Por eso es que en los estuarios y golfos, tales como Dulce y Nicoya, relativamente estrechos, las corrientes típicamente fluyen en una dirección durante



la mitad del ciclo de las mareas y en la dirección opuesta en la otra mitad. El nivel de potencia media en una sección transversal de área A sigue lo propuesto por Fraenkel (2002) en su fórmula.

$$P=1/2\rho AK_s K_n V_{\text{peak}}^3$$

donde  $K_s$  es un factor de velocidad (0,424 para un flujo sinusoidal),  $K_n$  un factor de mareas muertas/mareas vivas y  $V_{\text{peak}}$  la velocidad máxima de marea viva. El potencial teórico se ha determinado teniendo en cuenta dos líneas que cruzan los golfos en las áreas identificadas con la más alta corriente de marea. La longitud de la línea en el Golfo de Nicoya es aproximadamente 5 km, y en Golfo Dulce es de 16 km. La profundidad y la velocidad a través de estas líneas no son constantes. Por lo tanto, las líneas se dividieron en una serie de segmentos para las cuales se obtuvieron los valores de profundidad (por lo tanto el área) y la velocidad. Se supuso una variación lineal de la profundidad entre dos puntos consecutivos. Sólo profundidades iguales o superiores a 10 m se consideraron. Se asumió la velocidad de la corriente en aproximadamente 40-60% de la sección central (ICE, 2013).

Con respecto a las corrientes oceánicas hay que tomar en cuenta que estas tienden a ser más lentas que las corrientes de marea, ya que el flujo es continuo. Para las simulaciones de flujos de velocidad se utilizó el programa NCOM, los datos procesados incluyen desde febrero 2010 a marzo 2013 (ICE, 2013).

### III. Resultados

#### 3.1. Energía de las olas

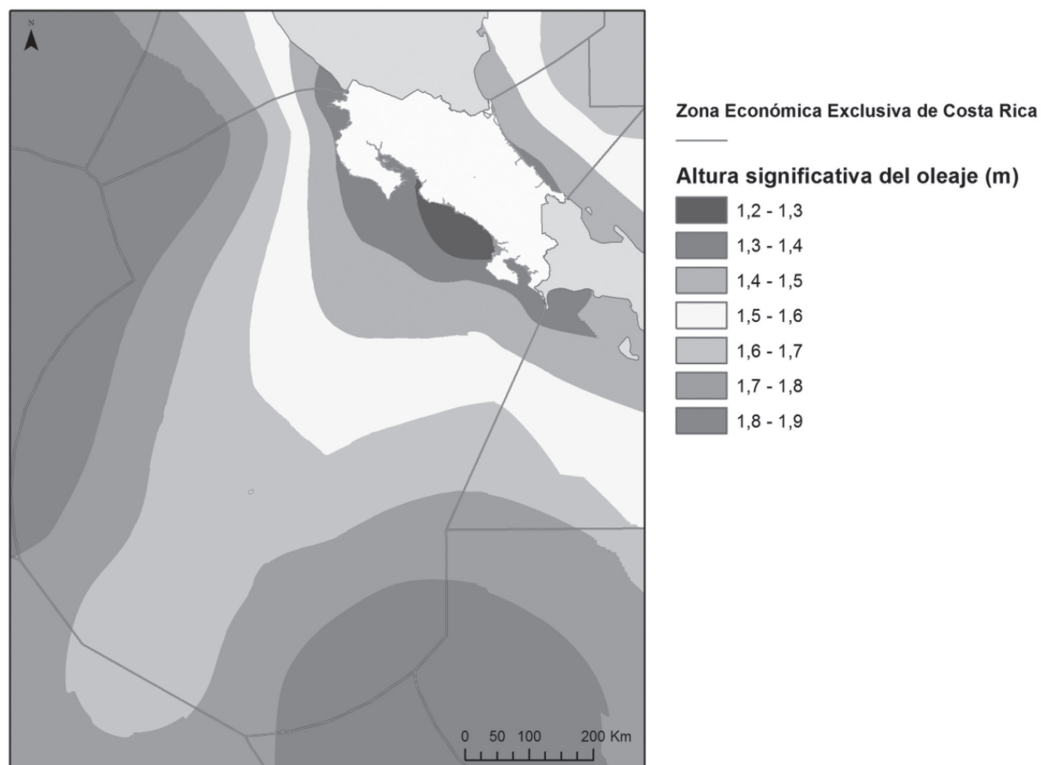
Los resultados siguen el orden de presentación que se utilizó en la sección de metodología. El clima de olas a lo largo de las dos costas (Océano Pacífico y Mar Caribe) presenta características significativamente dispares. En el Caribe las condiciones son típicas de mar cerrado, con predominio de sistemas de mar de viento, con un valor medio de la altura significativa  $H_s$  que varía entre los 1,38 m (frente a la Ciudad de Limón) y 1,66 m (en la zona norte) (figura 76). En relación al período de pico (figura 77), el valor medio más elevado  $T_p = 7.9$  s se alcanza en la zona frente a Limón (10°N, 83°O) y el menor valor (7.78 s) se alcanza en la zona a lo largo de la costa norte (11.5°N, 82.5°O). La dirección predominante de la agitación marítima es de este-norte-este con valores entre  $D_p = 63.4^\circ$  y  $D_p = 72.8^\circ$ .

El valor medio de la densidad de potencia de las olas en la ZEE en el Mar Caribe varía entre 7,5 kW/m a lo largo de Limón (10°N, 83°W) y 10.6 kW/m a lo largo de la costa norte (11.5°N, 82.5°W). El valor medio global a lo largo de la costa Caribe es 9,1 kW/m., detalles en la figura 78. En la ZEE del Océano Pacífico, el valor medio de la densidad de potencia de las olas varía entre 9 kW/m en la Bahía de Coronado (9°N, 84°O) y 22,6 kW/m en el extremo sur (3°N, 85°O). El valor medio global a lo largo de la costa oeste es 15,9 kW/m. Este patrón estará relacionado con el efecto de abrigo provocado por el archipiélago de los Galápagos, que bloquean parcialmente los regímenes de mar de fondo originados en el Pacífico Sur.

El potencial teórico bruto de energía de las olas en la ZEE se calcula suponiendo que dos líneas rectas que cruzan las regiones con mayor recurso energético en las costas del Pacífico y el Mar Caribe, están orientados perpendicularmente a la dirección del medio de propagación de la ola. El uso de energía de las olas a lo largo de una línea en la ZEE del Pacífico se estima en 13,8 GW, lo que resulta en un potencial de producción anual de electricidad de 121,3 TWh (asumiendo una eficiencia de conversión en electricidad 100%). Por otra parte, la potencia teórica a lo largo de una línea en el Mar Caribe se estima en 1,7 GW, lo que resulta en un potencial de producción anual de electricidad 15 TWh. Por lo tanto, el potencial de producción bruta teórica de electricidad, a partir de energía de las olas en Costa Rica, es de aproximadamente 136,3 TWh/año.

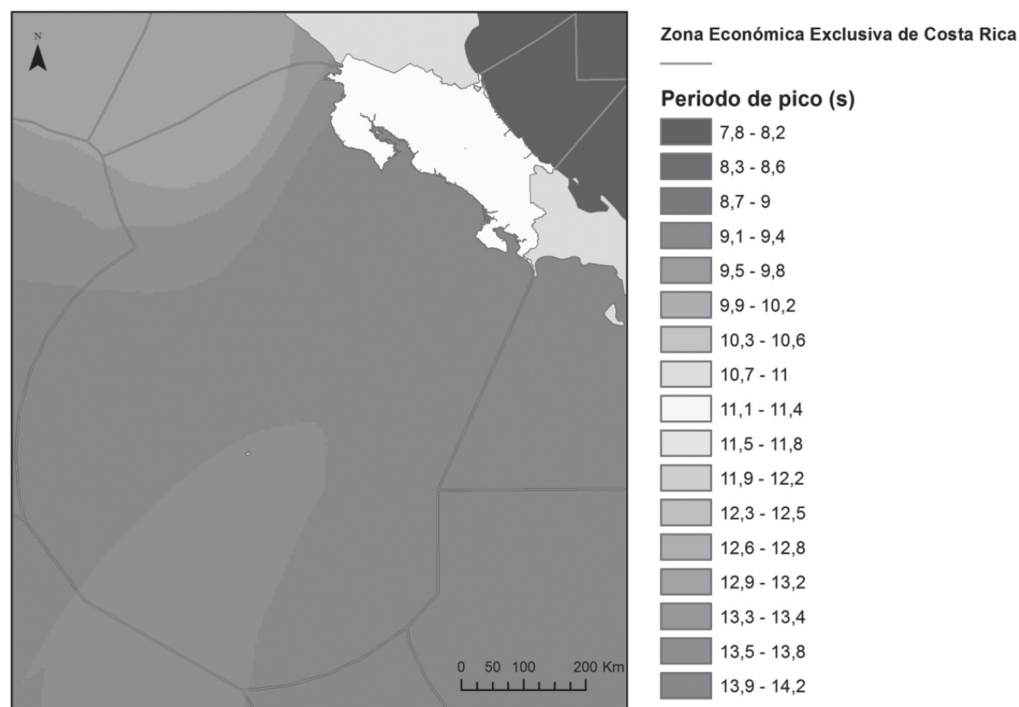


Figura 76. Valor medio de la altura significativa en la ZEE de Costa Rica obtenido a partir de los resultados del modelo WAVEWATCH III para el periodo 2000-2009.



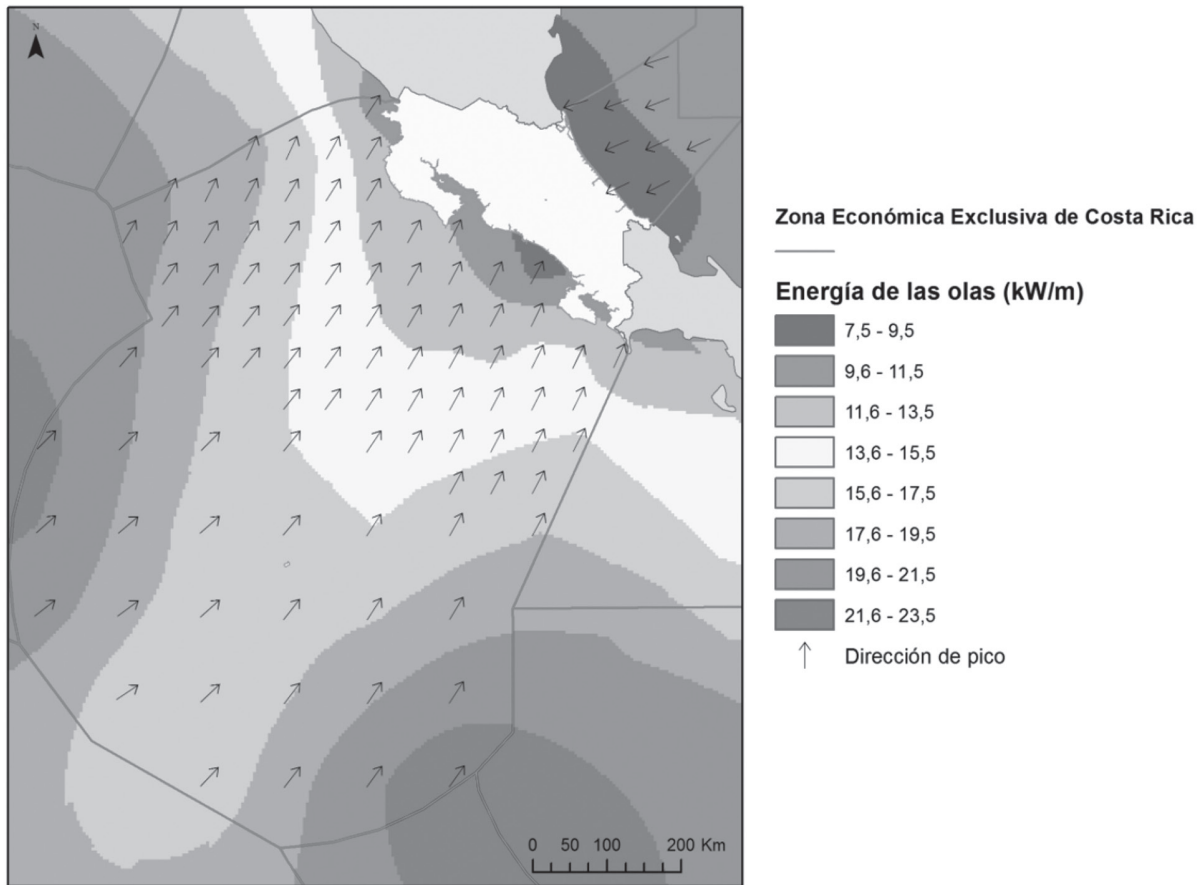
Fuente: Con base en ICE, 2013.

Figura 77. Valor medio del periodo de pico en la ZEE de Costa Rica obtenido a partir de los resultados del modelo WAVEWATCH III para el periodo 2000-2009.



Fuente: Con base en ICE, 2013.

Figura 78. Valor medio de la potencia de las olas en la ZEE de Costa Rica obtenido a partir de los resultados del modelo WAVEWATCH III para el periodo 2000-2009.



Fuente: Con base en ICE, 2013.

Con respecto a la variación típica de la altura significativa y por lo tanto a la generación de energía, las condiciones de agitación marítima en el Pacífico presentan una variación cercana al 9%. En el caso del Mar Caribe la variabilidad inter-anual y estacional es mayor, la diferencia máxima entre las medias anuales de la potencia de las olas alcanza el 25%. Esta condición tiene un impacto positivo en la planificación de proyectos de energía con olas, ya que esta variabilidad posibilita el dimensionamiento de dispositivos con mayor precisión.

Para la determinación del potencial teórico disponible se excluyeron áreas de protección ambiental, zonas de pesca responsable, rutas de navegación marítima y cables submarinos y líneas batimétricas entre 50 m y 200 m. Con base en estas condiciones el potencial teórico disponible es de 1100 MW (Caribe) y 5600 MW (Pacífico). A partir de estos valores, y suponiendo una eficiencia en la conversión de 100%, se estima el potencial de producción anual de energía eléctrica en 9,5 TWh en el Caribe y en 48,8 TWh en el Pacífico.

Respecto al potencial técnico de generación de energía eléctrica a partir de las olas se calculó considerando las eficiencias de los dispositivos, así como las limitaciones tecnológicas. Basándose en la información que Babarit & Hals (2011) reunieron sobre diversos tipos de dispositivos para obtener energía de olas, se asume una longitud de captura adimensional de 40% con sistemas flotantes de columna de agua oscilante y oscilante vertical (e.g. Wavebob), son los que prometen un desarrollo a gran escala en Costa Rica. Por lo indicado, para el Mar Caribe se estima un potencial técnico de producción anual de energía eléctrica de 2,9 TWh y 14,8 TWh en Pacífico.

Sobre la priorización y selección de zonas para el desarrollo de la energía de olas, los mejores sitios costeros son entre Playa Mina y Playa Carbón, entre Playa Avellana y Playa Junquillal, entre Playa Bote y Puerto Carrillo, la entrada al Golfo de Nicoya y entre Herradura y Playa Hermosa. En la costa del Caribe, cerca de Puerto Limón se identificaron condiciones aptas de proximidad a la red y profundidad.

### 3.2. Energía de las mareas

Costa Rica tiene una condición oceanográfica muy específica y una distribución de corrientes de marea muy particular, esto obliga a que el desarrollo de proyectos requiera mediciones e información sólida. Del análisis oceanográfico se ha detectado que las corrientes de mareas son causadas por la aceleración de la circulación del agua en determinados sectores costeros del Pacífico, especialmente evidentes en estrechos entre islas. Las corrientes de marea más fuertes se registraron en secciones angostas y estrechas donde el flujo se ve modificado por la presencia de islas o promontorios sumergidos. Con los datos disponibles se determinó que las áreas más adecuadas para proyectos piloto de energía de corrientes de mareas son el Golfo Dulce y el Golfo de Nicoya. Los valores de potencia teórica total media resultante son aproximadamente 7,2 MW para el Golfo de Nicoya y 4,1 MW para el Golfo Dulce.

Para la determinación del potencial técnico se consideraron los supuestos que los dispositivos ocupan 70% de la profundidad del campo de flujo, que hay una reducción, de 0.625 de flujo respectivo, que la eficiencia total del dispositivo es de 30%, que hay una pérdida en la red de 2%, un 90% de disponibilidad de parques y una eficiencia de los parques también de 90%. Sumando lo anterior, el recurso técnico en el Golfo de Nicoya es de 0,3 MW y en el Golfo Dulce de 0,2 MW. El potencial técnico anual se estima 2,6 GWh en el Golfo de Nicoya y 1,5 GWh en el Golfo Dulce (4,1 GWh/año en total para Costa Rica).

Sobre el aprovechamiento del potencial energético a partir del movimiento mareal depende de los desniveles del agua y es similar al funcionamiento de una central hidroeléctrica, a medida que la marea sube o baja, el agua pasa a través de compuertas en uno y otro sentido, accionando con ello las turbinas que transforman la energía mecánica en energía eléctrica. Los parámetros básicos que definen los lugares adecuados para la explotación de la energía de las mareas son: (i) la amplitud media de la marea y (ii) el área de la cuenca cerrada. La energía extraída es proporcional al cuadrado de la amplitud de las mareas y sólo pueden aprovecharse los lugares con una amplitud media de marea (h) superior a 5 metros. Por debajo de este valor los costes se consideran prohibitivos. En el cuadro 16 se presentan las amplitudes de marea en diferentes estaciones de ambas costas, como resultado más relevante es que el valor más elevado se da en el Golfo Dulce (3.3m), aún muy por debajo para ser aprovechado. Con estos datos no hay potencial suficiente para la explotación de la energía de mareas en Costa Rica.

*Cuadro 16. Amplitudes de marea registradas en estaciones en ambas costas del país.*

Estación / Ubicación	Marea alta (ft)	Marea baja (ft)	Amplitudes (m)
Herradura	-1	-6	1,5
Quepos	-4	-13	2,7
Limón	-29	-32	0,9
B. Uvita	-20	-25	1,5
Golfo de Dulce	-2	-13	3,3
Papagayo	-2	-2	0
B. Sta. Elena	-2	-2	0

### 3.3. Energía de las corrientes oceánicas

Debido a que el flujo es continuo, la diferencia entre la velocidad máxima y la velocidad media de las corrientes oceánicas es considerablemente menor que en el caso de corrientes de marea. Mientras que en las corrientes de marea, con flujos sinusoidales bidireccionales típicos, la velocidad media del pico es igual o superior a 2,5 m/s, en corrientes oceánicas es entre 1,2-1,5 m/s.

Para el cálculo de la energía de corrientes oceánicas en Costa Rica se consideró un registro de datos en febrero 2010 y marzo 2013 y los parámetros bajo el estándar de velocidad media, dirección media y a 40 metros de profundidad. En el cuadro 17 se exponen los resultados del cálculo de potencia y producción de energía para ambas costas.

*Cuadro 17. Parámetros para el cálculo de potencial teórico de las corrientes oceánicas*

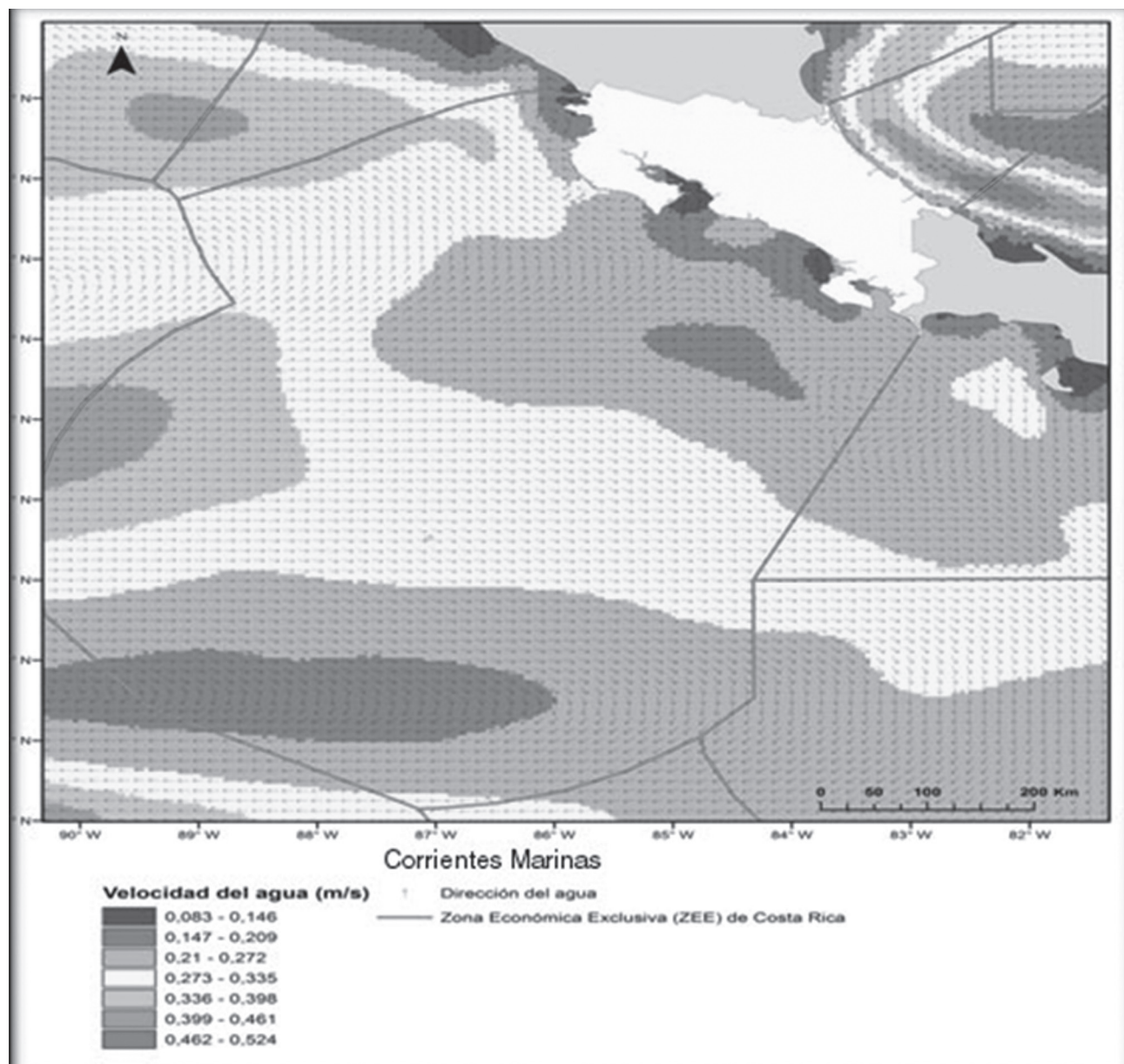
Parámetro	Giro Caribe	CCEN (Pacífico)	CCCR (Pacífico)	Total
Ancho Km	60	60	60	
Velocidad m/s	0.56	0.23	0.18	
Profundidad m	40			
Densidad de potencia W/m <sup>2</sup>	90.0	6.2	3.0	
Potencia lineal kW/m	3.60	0.25	0.12	
Potencia total MW	216	15	7.2	
Potencial teórico MW	127.4	8.8	4.2	140.5
Producción de energía anual TWh/año	1.1	0.08	0.02	1.2

Del lado Pacífico los lugares más interesantes se encuentran en la punta del extremo oeste de la ZEE, donde la Contra-corriente Ecuatorial del Norte (NECC) alcanza velocidades promedio de aproximadamente 0,23 m/s, y en la parte norte de la ZEE, al oeste de Golfo de Papagayo, con velocidades medias de 0,18 m/s y asociados a la Contra-corriente de Costa Rica (CRCC). En el lado del Mar Caribe, el Giro de Colombia-Panamá alcanza velocidades máximas de cerca de 0,56 m/s. La densidad de potencia asociada, es de 90 W/m<sup>2</sup>. Suponiendo que la anchura total de la región rápida de la corriente es de aproximadamente 60 km y que la energía se extrae de una sola línea de turbinas, la energía de corriente del océano es de 216 MW. Siguiendo un razonamiento similar, la fuente de energía de corriente oceánica en el Pacífico se estima en 15 MW en la zona de la Contra-Corriente Ecuatorial del Norte (NECC) y 7,2 MW en la zona de la Contra Corriente de Costa Rica (CRCC) (figura 79).

Con la aplicación del límite teórico de Betz, el recurso energético del océano utilizable es de 127,4 MW para el Giro de Colombia-Panamá, 8,8 MW para la corriente NECC y 4,2 en la corriente CRCC. Asumiendo una eficiencia de 100% de conversión de la energía eléctrica, el potencial teórico total a partir de las corrientes del océano en Costa Rica es de 1,2 TWh/año.

Para el caso del potencial técnico se calculó bajo los siguientes coeficientes, eficiencia total del dispositivo de 30%, 10% de pérdidas en la red, disponibilidad de los parques de 85%. Además se supuso que las turbinas pueden ser instaladas en varias líneas, a lo largo de la costa que abarcan la región de alta corriente, donde no existe un factor de eficiencia. Por lo indicado el recurso técnico es 29,2 MW para el Giro Colombia-Panamá, 2 MW para la Contra-Corriente Ecuatorial del Norte (NECC) y 1 MW en la zona de la Contra Corriente de Costa Rica (CRCC), lo que resulta en un potencial técnico total de 0,3 TWh /año.

Figura 79. Valores medios de velocidad y dirección de corriente a 40 metros de profundidad, en la ZEE de Costa Rica para febrero 2010 y marzo 2013.



Fuente: Con base en ICE, 2013.

## IV. Discusión

Con excepción de Canadá y Estados Unidos, la determinación de potenciales de energía marina es un asunto reciente en el continente Americano. Chile, quizás es el único país que ha avanzado hacia la puesta en marcha de proyectos para extraer energía del mar (Acuña & Monárdez, 2007, Monárdez, et al. 2008, Baird & Associates, 2012, Garrad Hassan, 2009 y GdC, 2013).

Debido a las condiciones oceanográficas, marco legal, e incluso tipo de recursos energéticos estudiados, existen limitadas posibilidades de establecer escenarios de comparación. No obstante los hallazgos de las investigaciones de Chile y en Costa Rica, pueden ser cotejados en términos dispositivos tecnológicos, fuentes de generación de energía y costos de proyectos. De acuerdo con Garrad



Hassan (2009), desde el punto de vista metodológico, el cálculo de potenciales que se hizo en Costa Rica sigue los mismos criterios utilizados en Sur América, específicamente batimetría, clima de olas, distancia de la línea costera, distancia de los puertos, presencia de áreas marinas protegidas, rutas de cables y cercanía de la red de distribución.

Aunque la investigación que se hizo en Costa Rica coincide con los resultados de Baird & Associates (2012) para Chile en que la energía undimotriz es el recurso renovable más prometedor y el que presenta una serie de indicadores positivos para la toma de decisión sobre la ruta de desarrollo de proyectos de extracción de energía marina, las escalas de las estimaciones tienen diferentes órdenes de magnitud. Chile tiene 4000 km de costa Pacífica versus un poco más de 1000 km en Costa Rica, el potencial teórico bruto también es muy diferente (240 GW versus 13.8 GW). Cuando se compara los valores de energía promedio vemos que en Costa Rica, en la costa Pacífica, es de 15,9 kW/m, mientras que en el Norte de Chile se indican 20 kW/m y de 50 kW/m en el sur en la región de Los Lagos (Acuña & Monárdez, 2007, Monárdez, et al. 2008, Baird & Associates, 2012, Garrad Hassan, 2009 y GdC, 2013).

Al margen de estas comparaciones, lo cierto es que existe la posibilidad de que Costa Rica genere una cantidad significativa de energía renovable a partir de las olas, mareas y corrientes. Se trata de un almacenamiento potencial de energía que podría, en el mediano plazo, convertirse en una solución emergente al problema de demanda energética. Tal condición ha comenzado a generar interés e impulso a través del Plan de Fuentes Renovables No Convencionales. Aunque es preciso superar varias fases para el posible desarrollo de pilotos, lo cierto es que esta fuente representaría una nueva opción para el portafolio de energías de Costa Rica y que estaría disponible para el desarrollo económico marino-costero que requieren las comunidades especialmente aisladas y alejadas del sistema de distribución eléctrica nacional.

Para el desarrollo de proyectos comerciales a partir de energía del mar, hay una serie de desafíos que deben superarse. Legalmente debe generarse un espacio para proyectos de esta naturaleza dentro de la planificación marino-costera. La meta es conseguir que el uso de energía de las olas, mareas o corrientes sea una actividad más del territorio marino-costero nacional. Para tal propósito se requiere propiciar una coordinación con la CONAMAR (Comisión Nacional del MAR), así como el SINAC para efectos de incluir la energía marina como parte de los planes de desarrollo marino costero del Pacífico y del Caribe Costarricense.

El principio de realidad señala un redoble de múltiples esfuerzos para lograr evolucionar del cálculo de potenciales a la construcción de un proyecto piloto. Sin embargo ya se cuenta con una base técnica y una hoja de ruta con los pasos y acciones que deben ejecutarse para que Costa Rica, en los próximos decenios, cuente con infraestructura marina capaz de extraer y suministrar energía marina al sistema eléctrico nacional.

## V. Conclusiones

Este estudio representa la primera aproximación y esfuerzo técnico para calcular el potencial teórico y técnico de la energía de las olas, corrientes y mareas en Costa Rica. Se trata de información fundamental para la toma de decisiones y para el respaldo de la hoja de ruta energética que el país requiere hacia la consolidación del Plan de Fuentes Renovables No Convencionales.

La investigación tiene un carácter preliminar, sin embargo de sus conclusiones se constata que no existen mediciones de agitación marítima en Costa Rica, y que sobre corrientes de mareas la información es puntual y dispersa.



Teniendo en cuenta los recursos analizados, se concluye que la energía de las olas es el recurso más atractivo de todos los analizados. Sin embargo este estudio se centró específicamente en la evaluación del potencial a lo largo de la costa, y será necesario mejorar el alcance e incluir tecnologías que pueden ser instaladas a bajas profundidades y cerca de la línea costera.

Las bajas amplitudes de marea no parecen justificar el aprovechamiento de este recurso, aunque fueron ubicados algunos sitios en los Golfos de Nicoya y Dulce, la relación costo beneficio descarta en la actualidad cualquier emprendimiento.

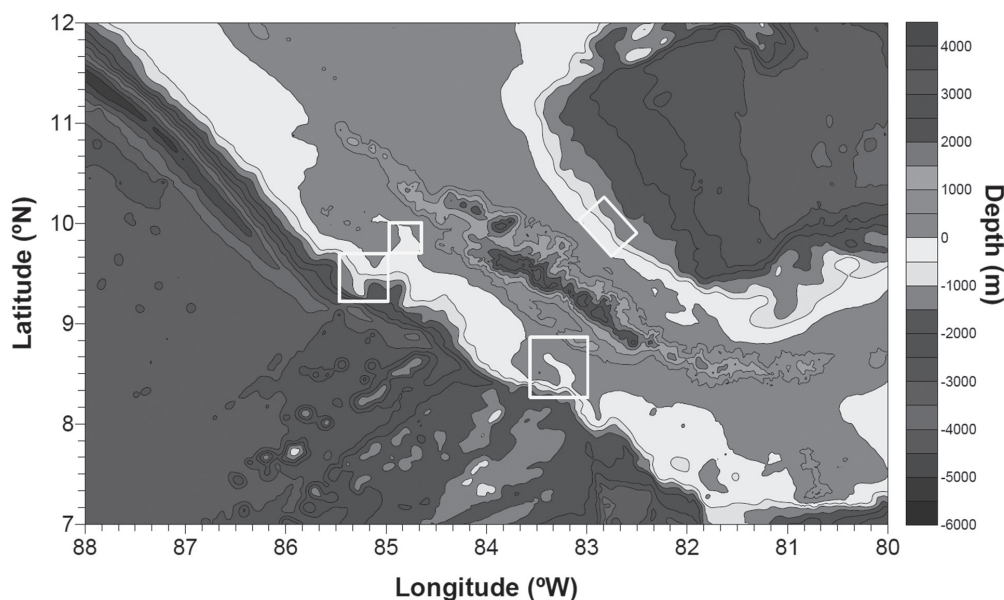
Se concluye que las velocidades de corrientes son bajas en los golfos, sin embargo esta conclusión es preliminar ya que se requiere mejorar la línea base de medición con datos de campo y un estudio de potenciales más profundo.

Si se mantiene el interés por fomentar el aprovechamiento de las energías marinas, se deberá identificar una zona específica que reúna condiciones oceanográficas y criterios técnicos (legales, ambientales, económicos) para el desarrollo de infraestructura de pruebas de tecnologías, prototipos y pilotos.

El aprovechamiento de la energía de los océanos depende de la investigación oceanográfica. Se considera esencial el desarrollo de una red de monitoreo y medición de parámetros asociados a energías marinas. La línea base será fundamental para planificar el aprovechamiento futuro de las olas, mareas y corrientes, así como de otras fuentes como los gradientes térmicos (OTEC) y el viento marino (wind-offshore).

Finalmente para enfrentar la ausencia de información para evaluar el recurso energético marino, se requiere un programa nacional marino que estudie las condiciones oceanográficas y meteorológicas dominantes en ambas costas. Para ello se proponen dos redes de monitoreo, una dedicada a condiciones de océano y otra red en los golfos Dulce y Golfo de Nicoya. Para los monitoreos deben instalarse boyas multi-paramétricas en el área de influencia de las corrientes más fuertes de la "Contracorriente Panamá-Colombia y cerca de Cabo Blanco, en profundidades de 800 a 1000 metros (figura 80).

*Figura 80. Sitios seleccionados para la ubicación de boyas para una red de monitoreo.*



Fuente: Con base en ICE, 2013.

## Referencias

- Acuña, H. y Monárdez, P. (2007). Evaluation of the wave energy potential of Chile. *Chilean Society of Hydraulic Engineering*, 10, 1-15.
- Bairdy Associates, (2012). Wave energy map in intermediate and shallow water depth in Chile based on a 30 year long validated 2D spectral hind cast of the Pacific Ocean. Dublin.
- Babarit, H., and Hals, C. (2011). On the maximum and actual capture width ratio of wave energy converters. *Proceedings of the EWTEC Conference 2011*. Dublín.
- Barron, C., Kara, A., Martin, P., Rhodes, R., y Smedstad, L. (2006). Formulation, implementation and examination of vertical coordinate choices in the global Navy Coastal Ocean Model (NCOM). *Ocean Modelling*, (11), 347-375.
- Blumberg, A. y Mellor, G. (1987): A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: Heaps, N. (Ed.) *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*, Amer. Geophys. Union, New York
- Fraenkel, P. (2002). Power from marine currents, *Proclnsth Mech Engrs* (216), 1-13.
- Garrad, H. (2009). Preliminary Site Selection - Chilean Marine Energy Resources.
- GdC, (2013). Gobierno de Chile. Estrategia Para el Desarrollo de Las Energías Marinas en Chile, s.l.: Ministerio de Energía, Gobierno de Chile (GdC).
- Hammons, T. (1997). Tidal power. *Proceedings of the IEEE - University of Cambridge*.
- ICE. (2013). Instituto Costarricense de Electricidad. Informe Final e Consultoría Determinación del Potencial de Energía Marina para Generación Eléctrica. ICE. (2014). Instituto Costarricense de Electricidad. Plan Nacional de Expansión de la Generación Eléctrica. Período 2014-2035.
- Lei, Z. (2002). Marine coastal dynamics and primary production response in Golfo Dulce, Costa Rica - A multi-sensor satellite approach. Master Thesis for International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation, USA.
- Lizano, O. y Alfaro, E. (2004). Algunas características de las corrientes marinas en el Golfo de Nicoya, Costa Rica. *Revista Biología Tropical*, 52 (2), 77-94.
- Martin, P., Peggion, G. y Yip, K. (1998). A comparison of several coastal ocean models. *NRL Report No. NRL/FR/7322/97/9692*.
- Monárdez, P., Acuña, H. y Scott, D., (2008). Draft: evaluation of the potential of wave energy in Chile. Estoril, OMEA.
- Murillo, L. (2001). Las mareas en Costa Rica. *Inter Sedes*, 2, 93-108.
- Pontes, M.; Mollison, D.; Cavaleri, L.; Nieto, J. y Athanassoulis, G. (1993). *Wave Studies and Development of Resource Evaluation Methodology*. Final Report.
- Quirós, G. (2003). Circulación del Golfo Dulce: un fiordo tropical. *Journal Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 10 (2), 75-83.
- WavEC. (2004). Potencial e Estrategia de desenvolvimento da energia das ondas em Portugal", relatório para a Direcção Geral de Geologia e Energia.
- WavEC. (2012). "GIS tool with all data from Tasks 2.2 to 2.4 integrated", Deliverable 2.4 of the EU funded project Tropos, available at: [www.troposplatform.eu](http://www.troposplatform.eu).

# Estudio de factibilidad de una planta solar fotovoltaica ubicada en el techo de un edificio en Liberia, Guanacaste

*Isaac Rojas-Hernández<sup>24</sup>  
Fernando Lizana Moreno  
Jorge Jiménez Jiménez  
Antonio Paz Jiménez  
Luis Moya Vargas*

## Resumen

Dado que la generación de energía a partir de paneles solares fotovoltaicos está en auge, es necesario contar con herramientas para el estudio integral de posibles emplazamientos a ser utilizados como plantas de generación. Aún a pequeña escala, es preciso definir criterios y parámetros que provean al inversionista (que en este caso puede ser desde una empresa de generación, hasta un usuario final de electricidad en un esquema distribuido) un alto nivel de seguridad respecto al valor que el sistema fotovoltaico le aportará, ya sea a nivel energético o económico.

El objetivo del trabajo es completar un estudio de factibilidad técnico-económico para sustentar la instalación de un sistema fotovoltaico en los techos de un edificio en Liberia, el cual cuenta con las etapas de: i) Inspección del sitio, ii) Diseño conceptual de planta fotovoltaica, iii) Estimación de la producción de la planta fotovoltaica, v) Análisis financiero y vi) Entrega de informe. En el presente trabajo se detallan cada una de estas fases y los elementos que se han tomado en cuenta para completar el estudio.

Las etapas del estudio incluidas son replicables, por lo tanto, se presentan pautas generales que pueden utilizarse en otros estudios similares, aplicables en la misma región donde este fue realizado. Tomando en cuenta la disponibilidad del recurso solar en Liberia, este documento es una guía para que otros puedan contar con criterios específicos al momento de involucrarse en proyectos fotovoltaicos.

Los hallazgos más importantes muestran que aunque hay un mercado creciente, las inversiones en este tema se deben realizar con especial cuidado, aunque pueden existir muchas empresas que instalen sistemas fotovoltaicos, no todas cuentan con la capacidad de determinar el tiempo de recuperación de la inversión, ni de optimizar los sistemas para un máximo aprovechamiento del recurso solar, de ahí la importancia de contar con metodologías abiertas, que se puedan aplicar al estudio de nuevos sitios para la prospección y aseguramiento de un mejor futuro energético en el país.

**Palabras clave:** Factibilidad, energía solar, metodología, planta fotovoltaica, techo

*Feasibility study of a solar photovoltaic plant located on the roof of a building in Liberia, Guanacaste*

---

<sup>24</sup> Investigación en Energías Alternativas, Centro de Servicio Investigación y Desarrollo, UEN PySA. Instituto Costarricense de Electricidad.  
Correo electrónico: irojashe@ice.go.cr

## Abstract

Since power generation from photovoltaic solar panels is growing, it is necessary to have tools for the comprehensive study of potential sites to be used as power plants. Even on a small scale, it is necessary to form criteria and set parameters to provide the investors (a wide range: from a generating company to an electric customer in a distributed way) a high level of certainty about the electrical and economic value its photovoltaic system will provide.

The objective of this work is to complete a study of technical and economic feasibility to support the installation of a roof mounted photovoltaic system in Liberia. The feasibility study has the following stages: i) site survey, ii) conceptual photovoltaic design, iii) estimation of energy production, iv) financial analysis, and v) final report. In this paper we detail each of these phases and the elements that have been taken into account to complete the study.

Since the stages can be repeated, this study provides guidelines that can be used in other similar studies in the same region. Since enough solar resource is available in Liberia, this document can be used as a guide for others (engineers and investors) to have specific criteria when involved in PV projects.

The major findings show that although there is a growing market, investments in this area should be performed with special care. There may be many companies installing photovoltaic systems, but not all of them have the ability to devise the investment's recovery time, or optimize the system for maximum efficiency utilization of the solar resource, hence the importance of enable open methodologies that can be applied to the study of new sites for prospecting and securing a better energy future for our country.

**Keywords:** Feasibility, solar energy, methodology, photovoltaic generator, roof

## I. Introducción

La necesidad de contar con energía más limpia es latente alrededor de todo el mundo, el uso de fuentes energéticas basadas en hidrocarburos aportan de manera importante a los niveles de gases de efecto invernadero. Ante el cambio climático se debe poder suplir las nuevas demandas de energía de una manera más sostenible.

Costa Rica ha sido líder en generación con fuentes renovables de energía y en políticas de sostenibilidad (United Nations Environment Programme, S.f.), la diversificación de fuentes de generación le asegura al país un abastecimiento confiable, a la vez que facilita el desarrollo de sus actividades productivas (Cárdenas, 2012).

Como antecedentes, en el año 2010, se publicó en Costa Rica la ley 8829 para "Incentivar el desarrollo y la utilización de fuentes renovables de energía", en el que se exime de algunos impuestos a los equipos importados o de fabricación nacional (La Gaceta, 2010). A partir de ese mismo año el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) lanzó un Programa de Generación Distribuida (Lara, 2014), con el que ha facilitado la instalación de fuentes para el autoconsumo, para el año 2013 ya contaba con 6 MW de potencia nominal en solicitudes de instalación recibidas (Arias, 2013). En el 2014 la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP), aprobó la metodología para fijar tarifas para la generación con recursos renovables, entre los cuales se encuentra la energía solar fotovoltaica (Recio, 2014).

Ante este panorama, es necesario contar con herramientas que permitan la identificación, valoración y construcción de nuevos proyectos fotovoltaicos, con el propósito de favorecer el crecimiento de las energías renovables, la diversificación de la matriz energética y fortalecer el desarrollo del país. En el presente trabajo, se realiza el análisis de un sitio específico en el que se desea instalar un sistema solar fotovoltaico, se detallan los elementos a ser valorados en un estudio de factibilidad de este tipo y los resultados encontrados, los cuales pueden ser aplicados para otras posibles instalaciones en la zona de Liberia, Guanacaste y que cuenten con características similares.

## II. Metodología

Se realizó un estudio de factibilidad para la ubicación de una instalación solar fotovoltaica en un edificio del ICE, ubicado en Liberia, Guanacaste. El estudio realizado incluyó las siguientes etapas: i) Inspección del sitio, ii) Diseño conceptual de planta fotovoltaica, iii) Estimación de la producción de la planta fotovoltaica, iv) Análisis financiero y v) Entrega de informe.

Cada una de estas etapas se desarrolló para un edificio en específico, sin embargo, esta metodología es aplicable al estudio de otros sitios, y está considerada dentro de un proceso de mejora continua, por lo que se podría actualizar.

## III. Resultados y estudio del caso

### 3.1. Inspección del sitio

En una única inspección preliminar, se debe tener la capacidad de verificar el estado actual de todas las instalaciones eléctricas, las cargas eléctricas nominales y el perfil de uso de la energía, las estructuras/espacios que soportarán/albergarán los paneles, las orientaciones e inclinaciones de los techos, y finalmente, un estudio de sombras cercanas y lejanas, para que después de realizar el analizar el recurso solar disponible, se tomen en cuenta las pérdidas pertinentes.

#### 3.1.1. Revisión de instalaciones eléctricas

Al revisar las instalaciones eléctricas, se debe chequear primeramente la acometida, verificar el calibre de la acometida y el dimensionamiento de las protecciones principales, la caja de distribución principal y los calibres de los circuitos principales y ramales, idealmente, se debe disponer de un plano eléctrico, sin embargo esto no siempre es posible, entonces se requiere realizar el levantamiento del mismo. Adicionalmente, se debe chequear el balance de las líneas y los sistemas de puesta a tierra.

#### 3.1.2. Histórico de consumo y perfil de uso de cargas

Es necesario establecer un patrón de consumo de potencia del sitio según las horas del día, los días de la semana y las épocas del año. Por ejemplo, si se trata de una oficina, se deben conocer las horas a las que se enciende el aire acondicionado, si hay artefactos eléctricos como hornos de microondas, televisores, cocinas, etc. y los días de la semana en que hay consumo, o si hay alguna diferencia entre las épocas seca y lluviosa en cuanto al consumo, por ejemplo, hay bombas que solo funcionan en verano o equipos que solo funcionan en invierno. Adicionalmente, Dunlop (2012) y Brooks & Dunlop (2013) hacen énfasis en que se debe contar con un histórico del consumo de energía, en las facturas normalmente se indica el consumo mensual, por lo que sería adecuado recurrir al proveedor para que entregue el histórico al menos del último año. Toda esta información es indispensable para determinar si el sistema es útil para el sitio y se utiliza para dimensionar el campo fotovoltaico.

Para el caso en estudio, se hizo un levantamiento de los circuitos principales a partir de la inspección y se determinó el perfil de uso de las cargas, se encontró un desbalance entre las tres fases de hasta un 40%, lo que permite visualizar una necesidad de mejorar el balance en el sitio para mayor eficiencia. El desbalance máximo producido se debe sobre todo a aires acondicionados, en horas del día, que de manera complementaria se usan en su máxima potencia cuando hay más radiación solar incidiendo en el sitio, por lo que se puede suponer un diseño desbalanceado que ayude a balancear el sistema en las horas de máximo consumo, el faltante en el balance se debe hacer por medios tradicionales (por ejemplo, bancos de capacitores).

### 3.1.3. Verificación del espacio para la instalación del campo fotovoltaico

Al revisar los espacios o estructuras donde se considera la instalación de los paneles, se debe tomar en cuenta la cercanía a la caja de distribución principal del edificio o a la acometida, se debe buscar espacios para los equipos adicionales protecciones, inversores, etc. Idealmente que estén en un lugar de acceso controlado y que no se encuentren a la intemperie. Las estructuras deben ser evaluadas según su estado, las condiciones del sitio y tiempo de vida (The German Energy Society, 2008).

En el edificio seleccionado, ubicado en Liberia, se determinó el uso de los techos, ya que en las zonas aledañas no contaban con suficiente radiación, debido a sombras cercanas, específicamente otros edificios que se interponen entre la trayectoria del sol y los posibles sitios donde ubicar los paneles. De igual manera, se identificaron secciones del techo con altos niveles de sombreado producido por árboles cercanos, pertenecientes a propiedades aledañas. Adicionalmente, se solicitó un estudio de Ingeniería Civil, para asegurarse de que las estructuras pudieran soportar la carga mecánica que significaría la instalación de un campo fotovoltaico sobre los techos.

### 3.1.4 Orientaciones e inclinaciones de los techos

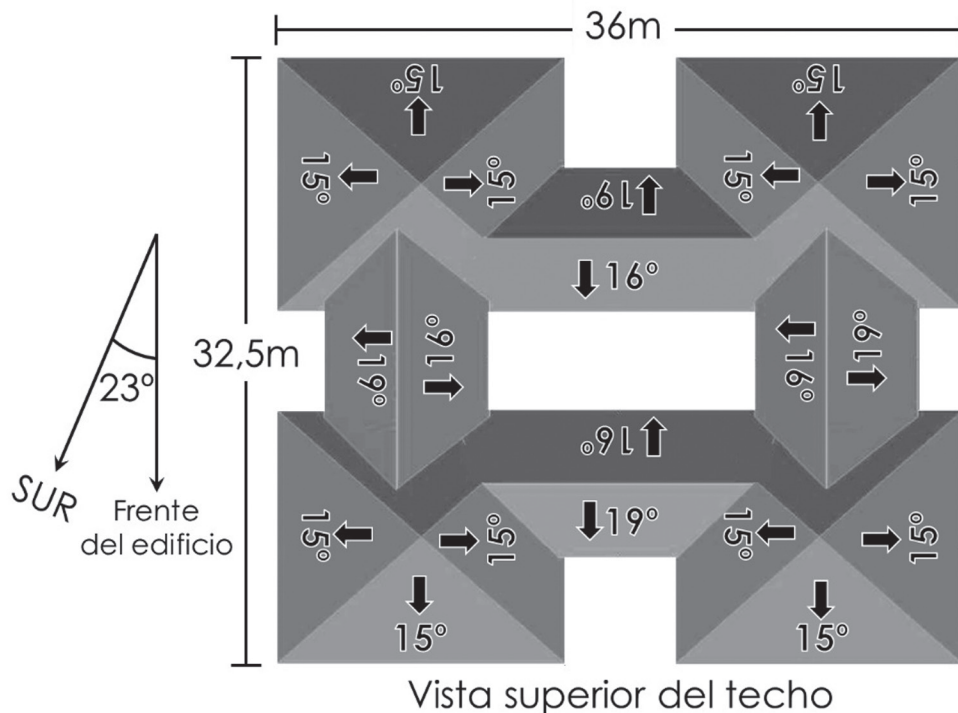
En el caso de que se decida realizar las instalaciones en techos, se debe determinar cada una de las inclinaciones de las diferentes caídas del techo con respecto al plano horizontal, así como la orientación (azimut) de acuerdo a la guía de la North American Board of Certified Energy Practitioners (2013). Si se instalan los paneles en la misma orientación e inclinación que el techo (lo cual reduce las cargas por ráfagas de viento), se podrá realizar un cálculo de la radiación solar sobre los paneles en cualquier época del año, a cualquier hora del día.

La inclinación y orientación es importante, especialmente en sistemas fijos, porque de estos dos parámetros depende la cantidad de radiación solar.

Para el sitio en específico se determinaron múltiples caídas (direcciones del agua) en el techo. En la figura 81, se muestra el detalle del mismo, las flechas indican la dirección de la caída del agua, y al lado, se incluye la inclinación en grados con respecto a un plano horizontal. El frente del edificio tiene una orientación o azimut de 23° hacia el este, partiendo desde el sur.



Figura 81. Inclinación y orientación de techos de edificio en estudio.



Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede observar, es un reto de instalar un sistema fotovoltaico eficiente en este tipo de techos con múltiples inclinaciones y orientaciones, puesto que un grupo de paneles solares que conforman una misma cadena en serie, tienden a comportarse como el más ineficiente de los paneles (entre ellos, la corriente será la menor), es decir, si se conectaran paneles con orientación Este y paneles con orientación Oeste en una misma cadena, se tendrían pérdidas importantes todo el día, puesto que los que se orientan al Oeste tienen menor radiación en la mañana y los que se orientan al Este menor radiación en la tarde, por lo tanto, la cadena tendría un comportamiento como los de menor radiación durante todo el día. Adicionalmente, otras pérdidas se deberán tomar en cuenta al analizar la cantidad de energía a ser extraída del sistema, por ejemplo desbalances entre paneles (mismatch), para mayor detalle respecto a esta característica se sugiere la referencia de Chouder & Silvestre, (2009).

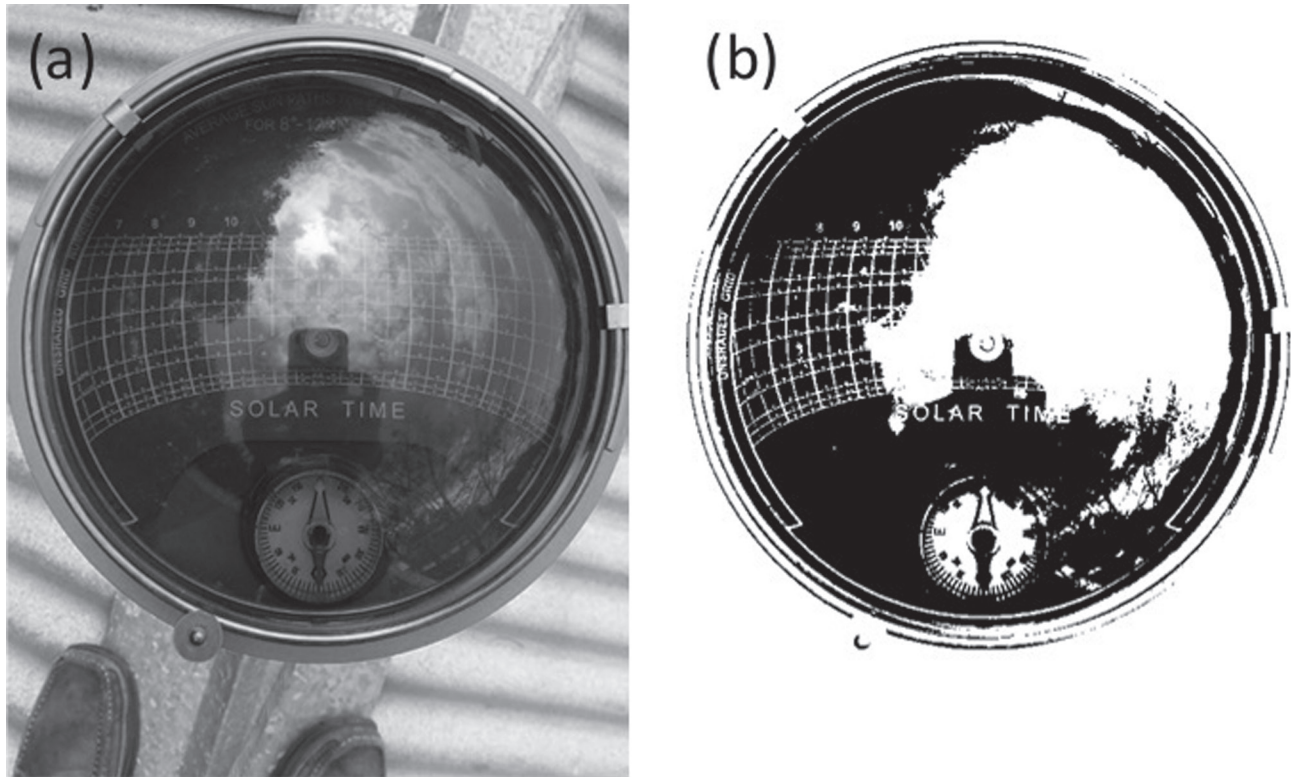
### 3.1.5 Estudio de sombras lejanas y cercanas

Es necesario contar con métodos que permitan contabilizar la cantidad de energía que es absorbida por construcciones, vegetación y objetos cercanos, hay que tomar en cuenta que la radiación que estos elementos absorbe varía según la hora y día del año, y puede afectar directamente la producción de un sistema fotovoltaico. Se pueden tomar decisiones de mover el sistema, o disminuir la vegetación en los casos en los que se requiera, mientras que las sombras lejanas, como perfiles montañosos o edificios lejanos, no son elementos que se puedan controlar en la instalación, por esta razón la diferenciación.

Para el sitio en estudio se utilizó el equipo comercial Solar Pathfinder, que permite estimar de manera rápida los sombreamientos lejanos y cercanos, mediante un lente convexo, una fotografía y un diagrama de la posición del sol. En la figura 82a se puede observar una fotografía tomada con este dispositivo, se pueden ver las líneas en la fotografía que representan la trayectoria del sol en diferentes meses (de izquierda a derecha) y horas del día (de arriba hacia abajo), además se puede observar

el perfil en la figura 82b las horas efectivas de radiación que podría tener este lugar(en blanco). En este ejemplo, la vegetación da sombra durante las horas de la mañana (izquierda) y el perfil montañoso lejano da sombra horas avanzadas de la tarde (derecha).

*Figura 82. Ejemplo de prospección de sombreado para un sitio utilizando Solar Pathfinder.*



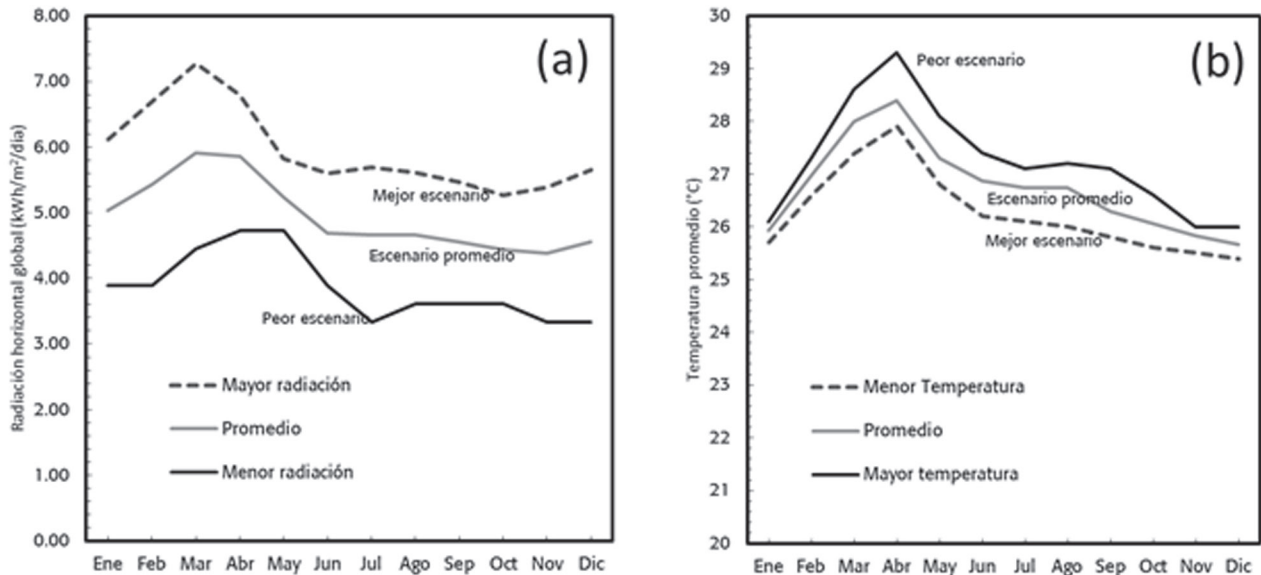
Fuente: Elaboración Propia.

Otros equipos comerciales que permiten prospecciones similares son Solmetric Sun Eye y Wiley Electronics ACME Solar Site Evaluation Tool (Wiles, 2006). Recientemente se pueden encontrar aplicaciones para dispositivos inteligentes que permiten hacer evaluaciones similares, al menos para hacer estimaciones generales son muy útiles, por ejemplo, Solar Shading (Ross, 2012).

### 3.1.6 Estudio de recurso disponible

Existen bases de datos de mediciones terrestres y de estimaciones satelitales sobre la irradiación global sobre ciertas regiones, para el estudio se utilizaron las diferentes bases de datos disponibles, se mapearon los mejores y los peores escenarios posibles de radiación global (esta sería la radiación que incide sobre una superficie horizontal) y de temperatura, esta variable se debe tomar en cuenta, puesto que la temperatura afecta de manera directa la eficiencia de los paneles fotovoltaicos. Los datos utilizados provienen de NASA, (2013), Retscreen (2013), Meteonorm (2013) y Wright (2008). En la figura 83 se puede ver los resultados y posibles escenarios para contabilizar el recurso disponible. El uso de diferentes bases de datos aporta solidez al estudio, puesto que se consideran las variaciones esperadas en el recurso solar, las diferencias entre bases de datos se deben a las diferencias de años medidos, las diferencias en equipos utilizados en la medición y los métodos utilizados para el cálculo final, sin embargo, todas tienen una tendencia similar en sus resultados.

Figura 83. Escenarios de los promedios mensuales de (a) radiación horizontal global diaria y (b) temperatura diurna para Liberia, Guanacaste.



Fuente: Elaboración Propia.

### 3.2. Diseño conceptual de la planta

Como parte del diseño conceptual de la planta se dispusieron dos tipos de ubicación para el campo:

- El uso de los techos con paneles en las mismas orientaciones e inclinaciones
- El uso de una estructura adicional sobre el techo

Además se analizaron tres tipos de soluciones técnicas para el sitio:

- Cadenas de paneles con inversores
- Microinversores para cada panel
- Optimizadores para cada panel, con inversores centrales

A continuación, se presentan los resultados para las opciones indicadas.

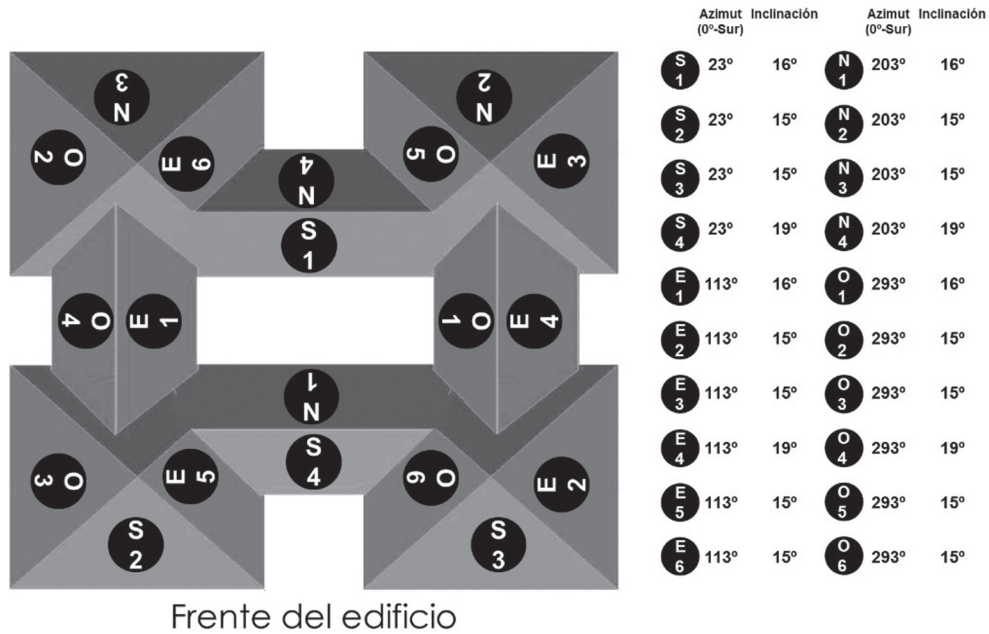
#### 3.2.1 Uso de techos

- Cadenas de paneles con inversores

Esta es una de las opciones más complejas de implementar, debido a las múltiples direcciones del techo, sin embargo, desde el punto de vista de diseño es la configuración más común y tradicional que se puede encontrar en sistemas fotovoltaicos. Utilizar cadenas implica agrupar paneles con un desempeño similar, y posteriormente, esos grupos interconectarlos en un mismo inversor. En una misma cadena en serie, el comportamiento esperado para cada panel es similar del que tenga el peor desempeño en un momento dado, ya sea por alguna sombra o por una incidencia diferente de la radiación, se tendrán variaciones en el desempeño y un efecto en detrimento de la eficiencia de la cadena, por lo que se debe cuidar que las cadenas tengan elementos con la inclinación y la orientación lo más similares posible.

Se agruparon las cadenas según la orientación, en la figura 84 se pueden ver los techos con orientaciones similares.

*Figura 84. Vista superior del techo y sectores con su respectiva inclinación y orientación.*



Fuente: Elaboración Propia.

Se agruparon las cadenas según la orientación, en la figura 80 se pueden ver los techos con orientaciones similares.

Se calculó la diferencia en radiación para paneles con inclinación de 15° y 16°, la diferencia es mínima de alrededor de 0.1%, por esta razón se pueden agrupar paneles en la misma cadena con esta inclinación sin afectar fuertemente la eficiencia de las cadenas. Caso contrario sucede al comparar las radiaciones entre paneles con inclinaciones de 15° y 19°, cuya diferencia asciende a un poco más del 1%. Debido a esta condición se dejaron de considerar los sectores S4, N4, O4 y E4, para evitar reducir la eficiencia del sistema.

Los sectores E5, E6, O5 y O6 se descartaron por su poca área disponible, lo que implicaba que necesariamente los paneles colocados en estas zonas, tuvieran que conectarse eléctricamente con otras zonas para formar una sola cadena, aumentando los costos de instalación por cableado.

Los sectores O2, N2, N3 y E3 se descartaron por sombras cercanas, debidas a la vegetación ubicada en la parte posterior del edificio. Los sectores O1 y E1 se descartaron debido a las sombras que producen los compresores de los aires acondicionados instalados en el techo, en la parte más alta.

Por lo tanto, con las zonas disponibles y optimizando la cantidad de paneles dejando espacio (limitado pero suficiente) para la operación y mantenimiento, se dispusieron 120 paneles de 235 W<sub>p</sub> como se muestra en la figura 85, esta cantidad es aproximada, ya que según las configuraciones eléctricas, se podría incluir o excluir unos pocos para ajustar los parámetros de entrada a los inversores.

Figura 85. Vista superior de la disposición de 120 paneles fotovoltaicos sobre los sectores óptimos para el aprovechamiento del recurso solar disponible en el sitio.



Fuente: Elaboración Propia.

Con respecto a la configuración eléctrica, se eligió realizar cableados entre sectores para completar las cadenas, a pesar de que a nivel de operación y mantenimiento, así como en la instalación, esta es una configuración compleja, de esta manera se optimiza la generación de energía para el campo fotovoltaico.

A manera de resumen se muestra en el cuadro 18 la configuración que consta de un total de 116 paneles con una potencia nominal de  $27,26 \text{ kW}_p$  y una energía producida por año de  $38,9 \text{ MWh}$ .



*Cuadro 18. Resumen de la configuración según los sectores para instalación de los paneles.*

Sector(es)	Inversor seleccionado	Cantidad de inversores	Cantidad de cadenas	Cantidad de módulos	Potencia nominal CA (kW)	Potencia pico CD (kWp)
S1, S2, S3	SB5000TL-21 (SMA)	3	6	60	13,8	14,1
N1	SB3600TL-21 (SMA)	2	2	28	7,36	6,58
E2	SB3000TLST-21 (SMA)	1	2	14	3,00	3,29
O3	SB3000TLST-21 (SMA)	1	2	14	3,00	3,29

Fuente: Elaboración Propia.

#### b) Microinversores para cada panel

La solución con microinversores descentraliza la función del inversor y la distribuye en cada panel, la mayor ventaja es que la producción de cada panel se maximiza según su capacidad y se eliminan los efectos de balance (mismatch) entre paneles de la misma cadena, la mayor desventaja es el aumento de puntos de falla y el mayor costo de inversión inicial, sin embargo, las fallas en un sistema con microinversores no son tan graves, puesto que una falla de un microinversor afecta directa y únicamente la producción del panel que tiene conectado. Existen estudios que muestran que la producción utilizando microinversores por cada panel es mayor que utilizando inversores con cadenas de paneles (Meriwether Lee, 2011).

Si se mantiene la misma configuración que en el escenario anterior, se tendría un microinversor por panel, es decir, se deben adquirir 116 microinversores, lo que incide directamente en el costo de instalación de la planta, elevando la inversión, lo que se reduce es el costo de operación y mantenimiento, ya que un sistema descentralizado no se ve tan afectado por la falla de un microinversor, como los casos de fallas de un inversor en casos centralizados y el tiempo de reparación se puede tardar más sin afectar la producción en gran manera.

Al simular el escenario utilizando un microinversor Sunny Boy 240 se obtuvo un incremento en la energía total aportada al sistema, en total se reporta una producción promedio de aproximadamente 40,5 MWh/año.

#### c) Optimizadores para cada panel, con inversores centrales

Los optimizadores son una solución similar al uso de microinversores, pero en este caso no se descentraliza la función del inversor. Los optimizadores son convertidores CD/CD que permiten por un lado lograr la mayor eficiencia del panel, a la vez que entrega valores parametrizados de corriente y voltaje para su funcionamiento maximizado en el lado de los inversores. No necesariamente representan un sobrecosto en la inversión inicial.

Si se mantiene la configuración de la figura 81, se requieren entonces 116 optimizadores, para obtener una energía entregada al sistema simulada de 41,9MWh/año.

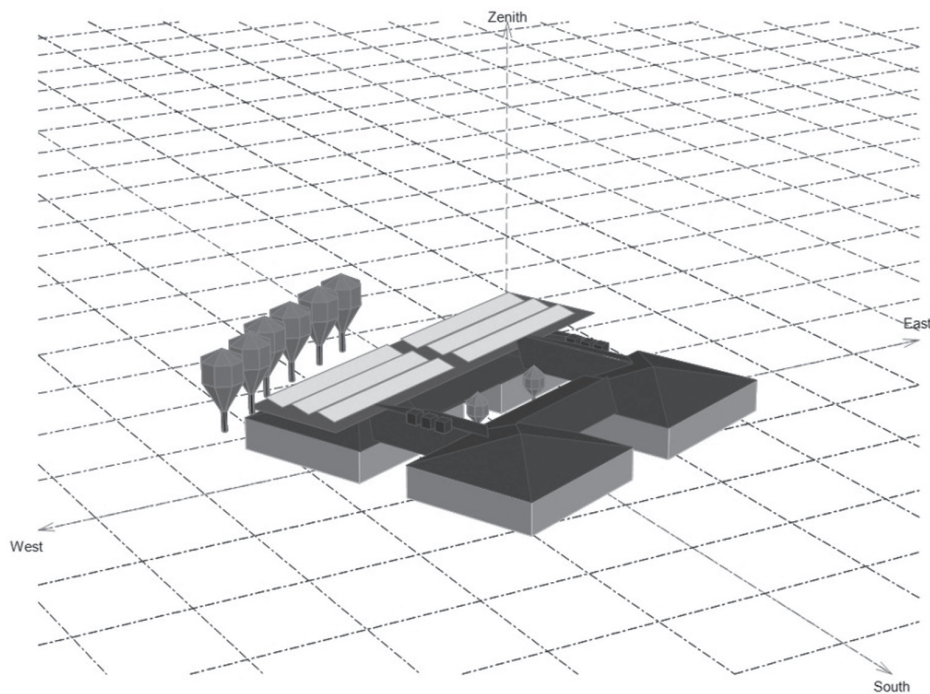


### 3.2.2 Uso de estructura sobre el techo

A manera de diseño conceptual, en el simulador se ubicó una plataforma sobre el techo del edificio, y por temas estéticos se mantuvo la orientación de los paneles hacia el sur con  $23^\circ$  al este, mismo azimut que el frente del edificio. En la figura 86 se observa una pantalla del programa PVSyst en la que se incluyeron las cadenas de paneles para la correspondiente simulación.

Este escenario tiene el inconveniente de que se debe realizar la inversión para construir la estructura sobre el techo, esta estructura debe ser muy firme por su posición con respecto al edificio.

*Figura 86. Pantalla del software PVSyst utilizado para simular una plataforma con paneles fotovoltaicos sobre un techo.*



Fuente: Elaboración Propia.

Al elevar la plataforma, la mayoría de sombras cercanas desaparecen y se mantiene un 3% de pérdidas por sombras lejanas.

#### a) Cadenas de paneles con inversores

Para esta opción se incluyeron los mismos 120 paneles de la corrida que se realizó en techos, de manera que se tenga una comparación adecuada. Al simular la situación se encontró una producción de energía anual por aproximadamente 40,5 MWh.

En la solución técnica se utilizaron 6 inversores SB4000TL-21 (SMA) cada uno con dos cadenas de 10 paneles.

#### b) Microinversores para cada panel

La solución con microinversores descentraliza la función del inversor, sin embargo en esta situación, el impacto es mucho menor, la simulación mostró una producción de aproximadamente 41,7 MWh/año.

### c) Optimizadores para cada panel, con inversores centrales

Al simular utilizando optimizadores, se mejora la cantidad de energía absorbida, sin embargo, no hay gran diferencia entre la producción con optimizadores en techo o con la plataforma, aproximadamente 42,9 MWh/año.

#### 3.2.3 Resumen












A manera de resumen de los pros y los contras hallados para las diferentes soluciones planteadas se confeccionó el cuadro 19, en éste se pueden observar los detalles de cada una de las opciones.
















### 3.3. Estimación de la producción de la planta fotovoltaica

En la sección anterior, se anotaron los resultados de la energía obtenida mediante simulación. Se realizaron simulaciones de cada una de las opciones utilizando el software PVSyst, en el que se incluyeron los distintos parámetros de radiación solar, variables de velocidad del viento y temperatura. En este reporte se anotó únicamente el resultado promedio anual en cada uno de los escenarios de radiación previamente presentados, sin embargo, el software permite evaluar la producción en cada mes e incluir variaciones de recurso solar de acuerdo con la información disponible. Además, se pueden estimar parámetros como el performance ratio o el factor de planta, que pueden ser importantes a la hora de evaluar la inversión.

Se considera imprescindible contar con una herramienta de simulación para la estimación de la producción de energía de la planta, a partir del recurso solar medido o estimado en las bases de datos disponibles, esta es una necesidad imperativa, ya que la energía aportada por la planta, es parte fundamental de la información que se suministra para completar el análisis financiero. No se recomienda utilizar los programas desarrollados por los mismos proveedores, por el contrario, se recomienda utilizar programas como PVSyst que no dependen directamente del proveedor y que permiten la inclusión de equipos de múltiples fabricantes; inclusive permite la creación de nuevos equipos si se cuenta con los parámetros por parte del fabricante, sobre el comportamiento del dispositivo en diferentes condiciones de operación.

*Cuadro 19. Resumen de las opciones simuladas con los detalles encontrados en cada una de ellas, a manera de comparación.*

	Techos	Estructura sobre el Techo
Inversión	 No requiere adicional en la estructura, solamente en los elementos de soporte y montaje para la estructura existente.	Se requiere una inversión importante para la estructura que soporta la instalación fotovoltaica
Operación y mantenimiento en general	 El mantenimiento es más complejo, porque se tienen inclinaciones y se trabaja sobre el mismo techo del edificio, lo que podría provocar goteras y accidentes.	 El mantenimiento es más sencillo se cuenta con espacio para caminar entre las filas de paneles. Hay mayor seguridad al caminar sobre una superficie horizontal, sin ángulo de inclinación.
Cadenas de paneles con inversión	 Técnicamente la instalación es compleja y se requiere configuración en cadenas con paneles de diferentes inclinaciones y orientaciones o bien la inclusión de más cadenas e inversiones, con grupos de inclinación y orientación similar. La operación y mantenimiento es más compleja.   Estimación de energía: 38.9 MWh/año.	 Se diseña el sistema en grupo de cadenas fácilmente identificables, la operación y mantenimiento es mucho más sencilla.  La afectación por sombras cercanas es menor, ya que la plataforma está más elevada que el techo.  No se presentan problemas de ineficiencia por colocar en una misma cadena paneles con diferentes inclinaciones y orientaciones, ya que todos se orientan e inclinaciones y orientaciones, ya que todos se orientan e inclinan de la misma forma.  Estimación de energía: 40.5MWh
	 El fallo es un inversor implica la salida de una o varias cadenas de paneles en el sistema fotovoltaico instalado   Al tratarse de pocos inversores pueden ubicarse dentro del edificio en algún lugar de acceso restringido	

Microinversores para cada panel	<p> Se facilita el diseño y la instalación, al no tener que utilizar grupos de diferentes áreas del techo o cadenas conectados a un mismo inversor.</p> <p> Estimación de energía : 40.5 MWh/año</p>	<p> Es una inversión mayor para infraestructura que no lo requiere, ya que todos los paneles tendrán la misma orientación e inclinación y fácil acceso para operación y mantenimiento.</p> <p> Estimación de energía : 41.7 MWh/año</p>
	<p> El fallo en un microinversor o en un panel, implica la salida únicamente de ese panel y no afecta al sistema en más que la proporción que ese panel aporta.</p> <p> Al estar conectado cada panel a un microinversor se puede operar el panel en su mejor punto de eficiencia entregada, disminuyendo las pérdidas por desbalance entre paneles (mismatch).</p> <p> Invertir en muchos Microinversores es más costoso que invertir en pocos inversores de mayor tamaño.</p> <p> Se colocan con el panel a la intemperie y esto puede reducir su vida útil, especialmente en climas extremos de muy alta temperatura o humedad, hay más puntos de falla.</p>	
Optimizadores para cada panel con inversores	<p> Los sistemas con optimizadores se pueden integrar a un sistema centralizado de monitoreo e indicar la producción real de cada panel de la instalación, de esta misma manera la operación y mantenimiento es mucho más sencilla, puesto que se puede identificar con un sistema como este cual panel u optimizador ha fallado.</p> <p> Estimación de energía: 41.9MWh/año</p>	<p> Es una inversión mayor para una infraestructura que no lo requiere, ya que todos los paneles tendrán la misma orientación e inclinación y fácil acceso para operación y mantenimiento.</p> <p> Estimación de energía : 4209 MW/h año</p>
	<p> El fallo en un optimizador o en un panel, implica la salida únicamente de ese panel y no afecta al sistema en más que la proporción que ese panel aporta.</p> <p> Al estar conectado cada panel a un optimizador se puede operar el panel en su mejor punto de eficiencia entregada, disminuyendo las pérdidas por desbalance entre paneles (mismatch).</p> <p> La inversión en muchos optimizadores es menos costosa que la inversión en muchos Microinversores</p>	

Fuente: Elaboración propia

### 3.5. Análisis Financiero

Dentro del análisis financiero se incluyen los conceptos de inversión, instalación de equipo, operación y mantenimiento, todos como parte negativa del flujo de caja, y como positivo, se considera el ahorro producto de la inclusión de la energía producida por el sistema solar en el edificio.

Inicialmente se consideró una inversión aproximada de 2000 USD por cada  $1kW_p$  instalado, conforme al comportamiento que se ha visto en el mercado. Debido a que se consiguieron los 120 paneles de 235Wp a través de una donación, se contempla únicamente una inversión estimada de 1500 USD por cada  $kW_p$ .

Se utilizaron las siguientes variables en el análisis financiero (cuadro 20)

*Cuadro 20. Variables para el análisis financiero*

Ítem	Monto/Valor
Costo de electricidad	\$0,23/kWh
Inflación	5%
Aumento anual del costo de la electricidad	3%
Años de amortización de los equipos	10
Tasa de descuento	12%
Periodo de análisis	20 años

Fuente: Elaboración propia

Para la configuración en los techos (misma orientación e inclinación) con mejor producción de energía, se obtuvo una tasa interna de retorno (TIR) del 13,9% y un periodo de recuperación de la inversión de 6,9 años. Como inversión inicial se requiere de al menos \$40 000 USD.

Para la configuración utilizando una plataforma por encima del edificio se obtuvo una tasa interna de retorno (TIR) 4,4% y un periodo de recuperación de la inversión de 13,4 años. Como inversión inicial se requiere de \$85 000 USD.

Como recomendación técnico-económica, la mejor opción es utilizar los mismos techos para instalar los paneles, que proveerán una recuperación mucho más pronta, además de utilizar la opción de optimizadores para mejorar la producción total anual de energía.

### 3.6. Entrega de informe

Es muy común que a nivel técnico no se le preste suficiente importancia a la entrega de los informes de factibilidad, es importante estar informando al cliente de las etapas llevadas a cabo y hacer una entrega completa de la documentación, así como tener una comunicación activa para que conozca los detalles y hallazgos del estudio, de manera tal que no se formen conceptos incorrectos sobre la cantidad de energía que le puede aportar el sistema o los costos reales del proyecto.

## IV. Discusión

Se aplicó una metodología propia para llevar a cabo el estudio de factibilidad con etapas propias de seguimiento y control, la mayoría de las actividades indicadas en este documento se encuentran enlistadas en documentos de NABCEP<sup>25</sup> (2013) y Brooks & Dunlop (2013), son recomendaciones de etapas que deben existir en un estudio de factibilidad. Es importante conocer y poner en práctica las guías basadas en mejores prácticas para este tipo de estudio aplicado al diseño y construcción de plantas fotovoltaicas en el país. Se presentó una metodología con los componentes indispensables que debe contener un estudio de factibilidad, es importante poder guiar a los inversionistas y mostrarles los niveles de seguridad que su inversión puede tener. Sobre todo, a la luz de un crecimiento de la energía generada a través de sistemas solares fotovoltaicos y la integración de energías distribuidas en el país.

## V. Conclusiones

Se documentó y se presentó la metodología para la valoración de nuevos proyectos fotovoltaicos, específicamente se elaboró como caso de estudio, un sistema a ser instalado en un edificio en Liberia.

<sup>25</sup> North American Board of Certified Energy Practitioners

Las etapas seguidas y los análisis llevados a cabo, muestran el potencial de recurso solar con el que se cuenta en el país, especialmente en zonas como Guanacaste.

Es necesario contar con herramientas para la prospección de sitios, como Solar Pathfinder y sistemas para la estimación de energía como PVSyst, ya que permiten estimar con detalle la cantidad de energía que el sistema podría aportar y de esta información, tomar las decisiones técnicas y financieras que sustenten una inversión en este tipo de tecnología.

Para el proyecto en estudio, se debe dar seguimiento a las etapas posteriores de construcción de la planta fotovoltaica, para validar la información de estimaciones de energía y costos, de manera que se establezca un proceso de mejora en la metodología utilizada realizar el estudio de factibilidad.

Las empresas de instalación de sistemas fotovoltaicos deben preocuparse por fomentar una adecuada factibilidad de los casos de estudio, que les facilite a los clientes mayor posibilidad de financiamiento de los proyectos.

## Referencias

Arias, A. (2013) ICE: Plan piloto generación distribuida para autoconsumo [diapositivas de Power Point]. Recuperado de <http://www.grupoice.com/>.

Brooks, W. & Dunlop, J. (2013) PV Installation Professional Resource Guide. North American Board of Certified Energy Practitioners: Estados Unidos, pp: 123-148.

Cárdenas, G. (2012) Matriz energética argentina. Situación actual y posibilidades de diversificación. Revista de la Bolsa de Comercio de Rosario, pp. 32-36. Argentina.

Chouder, A. & Silvestre, S. (2009) Analysis Model of Mismatch Power Losses in PV Systems. Journal of Solar Energy Engineering Vol. 131, Estados Unidos: ASME, pp. 024504(1-5).

Costa Rica, Ministerio de Gobernación y Policía. (2010). Diario Oficial La Gaceta N° 126. Ley para incentivar el desarrollo y la utilización de fuentes renovables de energía, N° 8829. San José: Imprenta Nacional.

Dunlop, J. (2012) Photovoltaic Systems. Amer Technical Pub; 3ra Edición, Estados Unidos, pp.: 55-83.

Lara, J. (2014, 13 de febrero) ICE lanza piloto para atraer interesados en generar su propia electricidad. Recuperado de <http://www.nacion.com/>

Meriwether, D. (2011) A Direct Comparison Between a Central Inverter and Microinverters in a Photovoltaic Array (Tesis de Maestría). Appalachian State University, Estados Unidos.

Meteonorm (2013). Climate Database. Alemania: Meteotest.

NASA (2013). Surface meteorology and Solar Energy – AvailableTables. Recuperado de: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> el 22 de julio de 2013.

North American Board of Certified Energy Practitioners (2013) PV Technical Sales Resource Guide. NABCEP: Estados Unidos, pp.: 10-12.

Recio, P. (2014, 29 de abril) ARESEP fija tarifas para generación de energía solar y biomásica. Recuperado de <http://www.nacion.com/>.



RETScreen (2013). Climate Data. Recuperado de: <http://www.etscreen.net/> el 22 de julio de 2013.

Ross, C. (2012) Energy App-grades. Electrical Contractor, recuperado de <http://www.ecmag.com/section/green-building/energy-app-grades> el 19 de mayo de 2014.

The German Energy Society (2008) Planning and Installing Photovoltaic Systems. Estados Unidos: Earthscan, pp.: 224-235.

United Nations Environment Programme (s.f.) Costa Rica: A Leader in Sustainable Practice and Policy. Recuperado de <http://www.unep.org/> el 5 de mayo de 2014.

Wiles, J. (2006) Considerations for PV Site Surveys. Home Power N° 115 – Oct/Nov, Estados Unidos, pp. 98-100.

Wright, J. (2008). Cálculo y mapeo de la radiación solar directa y difusa en Costa Rica. UNICIENCIA 22, pp. 55-69.



# Eficiencia y simulación matemática de los parámetros operativos de la central eólica Tejona

*Ing. Edgardo Porras Calderón<sup>26</sup>*

## Resumen

Este documento tiene por objetivo mostrar un modelo matemático que permite simular las curvas de potencia y de eficiencia de los aerogeneradores de la central eólica Tejona del Instituto Costarricense de Electricidad. A partir de estos modelos se propone una metodología para la medición de eficiencia en línea de las unidades generadoras, así como una metodología para calcular pre-despachos de energía.

Para alcanzar esta meta fue necesario realizar pruebas de campo para medir la temperatura ambiental así como la presión atmosférica para calcular la densidad del aire del sitio donde se ubica la central generadora Tejona; ya que es uno de los parámetros requeridos para modelar las curvas de eficiencia; así como las curvas de potencia de cada uno de los aerogeneradores del parque eólico.

Definido el modelo matemático se obtuvieron valores de potencia y de eficiencia para velocidades de viento entre 4 y 25 m/s, con el fin de comparar los resultados obtenidos con los valores de potencia y eficiencia reales de cada unidad generadora registrados en la base de datos del sistema SCADA, ubicado en la sala de control de la central generadora. Al evaluar los resultados obtenidos de los modelos, como son las curvas de potencia y de eficiencia comparándolas con la información del fabricante de los aerogeneradores, se concluye que los modelos matemáticos funcionan adecuadamente y se pueden utilizar para evaluar la condición de cada unidad generadora; así como para calcular la potencia que podría generar el parque eólico ante un pronóstico de viento, o sea realizar pre-despachos de energía.

**Palabras clave:** Curvas de eficiencia, curvas de potencia, aerogenerador, pre-despachos de energía, SCADA, pronóstico de viento.

## Efficiency and mathematical simulation of the operating parameters of the Tejona wind farm

### Abstract

This document aims to show a mathematical model that allows you to simulate the power curves and efficiency of wind turbines in the Central Tejona wind of the Instituto Costarricense de Electricidad. From these models a methodology is proposed for the measurement of efficiency in line of the generating units, as well as a methodology for calculating pre-releases of energy.

To achieve this goal it was necessary to perform field tests to measure the ambient temperature as well as the atmospheric pressure to calculate the density of the air of the site where is located the Central Generating Tejona; because it is one of the parameters required to model the efficiency curves; as well as the power curves of each of the wind turbines in the wind.

<sup>26</sup> UEN-Producción de Energía -Instituto Costarricense de Electricidad.

The mathematical model defined values were obtained power and efficiency for wind speeds between 4 and 25 m/s, with the purpose of comparing the results obtained with the values of real power and efficiency of each generating unit registered in the database of the SCADA system, located in the control room of the central generator. To evaluate the results obtained from the models, as are the power curves and efficiency by comparing them with the information of the manufacturer of wind turbines, it is concluded that the mathematical models are working properly and can be used to evaluate the condition of each unit generator; as well as to calculate the power that could generate the wind park before a forecast of wind, or pre-releases of energy.

**Keywords:** efficiency curves, power curves, wind turbine, energy pre-releases, SCADA, wind forecast.

## I. Introducción

Como resultado del incremento de un espíritu ambientalista en todo el mundo, se da el desarrollo de nuevas tecnologías que procuran ser amigables con el planeta, como es el caso de la generación eólica, medio de generación con el cual se produce energía eléctrica de bajo impacto ambiental, utilizando una fuente aparentemente inagotable (aire).

El constante desarrollo de esta forma de generación, ha hecho que en los últimos años muchos países traten de que sus centrales de generación eólica se incrementen en cantidad, tamaño y capacidad de generación con el fin de dejar de utilizar centrales térmicas o de combustión, las cuales son conocidas por emanar gases de efecto invernadero a gran escala, debido a las cantidades de combustible que requieren y a las características de las maquinas utilizadas en el proceso de combustión.

La utilización de estas formas de generación alternativas ha evolucionado, con la mejora de los rendimientos de las maquinas o partes que se emplean en el proceso de generación como son: turbinas, generadores y sistemas de control. En términos generales se han desarrollado aerogeneradores de potencia a gran escala con varios KW o MW de capacidad de generación.

A pesar del gran crecimiento de esta fuente alterna de energía; siguen existiendo muchos retos para la ciencia e ingeniería en esta área, como mejorar el rendimiento de los aerogeneradores para reducir el costo de la energía obtenida del viento (Bianchi, 2007). Es por esta razón que es muy conveniente medir la eficiencia de las unidades generadoras de las centrales eólicas, así como la obtención de un modelo matemático que permita simular el comportamiento de las mismas. Sin lugar a dudas con estas herramientas se podrá mejorar la planificación operativa y de mantenimiento de los parques eólicos.

El Instituto Costarricense de Electricidad consiente del compromiso que ha asumido con el medio ambiente, emprendió una serie de estudios para valorar el potencial uso de fuentes no convencionales de energía, tales como: hidráulica en pequeña escala, biomasa, solar y eólica.

A finales de la década de 1970, con la crisis del petróleo que impactan la sociedad y el incremento de la conciencia ecológica en la opinión pública costarricense, se realizan estudios de factibilidad para la instalación de plantas de producción de energía eólica en Costa Rica.

Los estudios identificaron tres zonas propicias para el desarrollo de proyectos de generación eólica de acuerdo a las intensidades de los vientos: Guanacaste (especialmente en la vertiente de barlovento de la cordillera homónima), zona del Lago Arenal y Valle Central (Laporte, 1979). De estas zonas, las que ofrecen mejores condiciones son las dos primeras, especialmente el cantón de Tilarán, ubicado al sur del Lago Arenal. En Tilarán, la localidad de Tejona fue el sitio elegido ya que fue la zona que registró la mayor intensidad de viento en todo el territorio costarricense.

Según los estudios realizados, una planta de 20 MW en la zona de Tilarán, sería capaz de reducir en 60 000 toneladas métricas anuales las emisiones de CO<sub>2</sub> de las plantas de generación térmica operantes en Costa Rica (ICE y USAID, 1992). Aprovechando los estudios realizados por el Instituto Costarricense de Electricidad, empresas privadas construyeron los tres primeros parques eólicos que entraron en funcionamiento en el segundo lustro de la década de 1990: PESA, AEROENERGIA y MOVASA (Montero, 2005).

Al finalizar dicho decenio, se inicia la construcción de la central eólica estatal Tejona, entrando en operación en el año 2002 con una capacidad instalada de 19.8 MW, se ubica en la Provincia de Guanacaste-Costa Rica aproximadamente a 8 Km de la ciudad de Tilarán (figura 87). Está conformada por 30 unidades Vestas V42-660 en una fila montañosa al oeste del Embalse Arenal, conocidas como Fila Montecristo (figura 88).

Figura 87. Localización de la central eólica Tejona en Costa Rica

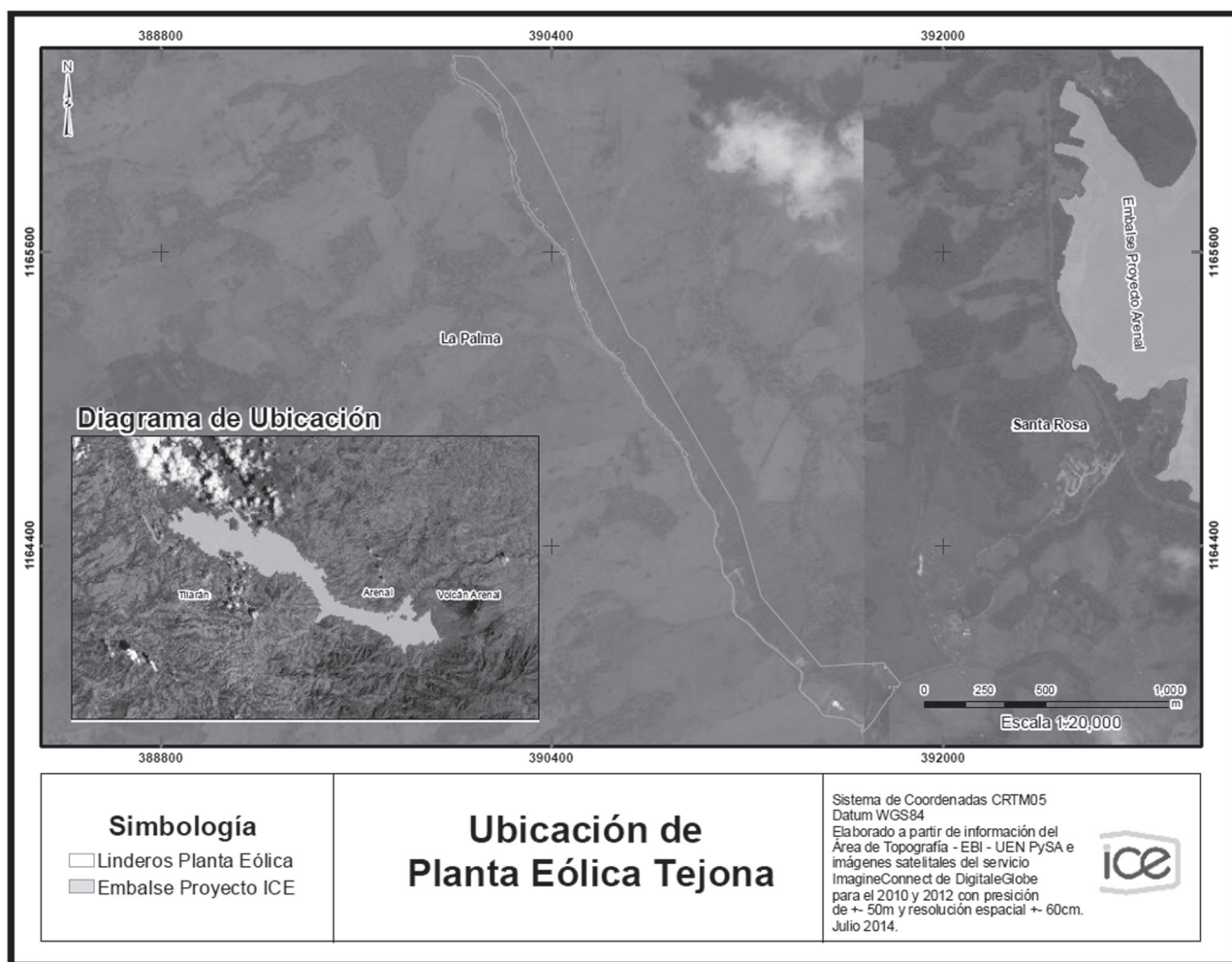


Figura 88. Central eólica Tejona en Costa Rica.



Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad-2014

Con el fin optimizar la operación de la central eólica Tejona, en este documento se resume los análisis de las características físicas de las unidades generadoras, así como las condiciones ambientales donde se ubica esta central, para definir un modelo matemático que permita obtener las curvas de potencia así como la curva característica del coeficiente de potencia de cada unidad.

Con las curvas de potencia y el pronóstico de velocidad del viento se puede programar pre-despachos de energía, por otro lado el coeficiente de potencia indica con que eficiencia cada aerogenerador convierte la energía del viento en electricidad.

## II. Metodología

Para definir el modelo matemático de los aerogeneradores de la central Tejona se consideró la información técnica de diseño de las unidades, así como las características de las condiciones ambientales del sitio donde se localiza la central generadora.

### a. Caracterización Energética del Viento: Potencial Eólico

La conversión de energía del viento a potencia eléctrica en las unidades aerogeneradoras depende del área de barrido del rotor, densidad del aire y velocidad del viento que actúa sobre las aspas del



rotor (Sánchez, 2002). La figura 89 muestra un esquema del área de barrido del rotor de una turbina eólica, el cual depende directamente del tamaño de las aspas (diámetro del rotor). De esta forma el área de barrido del rotor será:

$$A = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (1) \quad d = \text{Diámetro del rotor}$$

*Figura 89. Área de barrido del rotor.*



Fuente: Elaboración propia, Instituto Costarricense de Electricidad-2014

## b. Densidad del Aire

Uno de los parámetros importantes para dimensionar la capacidad de producción de un parque eólico es la densidad del aire o sea la masa por unidad de volumen del aire en el sitio donde se ubican las unidades generadoras, a mayor densidad, más energía recibirán las turbinas y por lo tanto mayor capacidad de producción.

Para la central eólica Tejona; se realizaron pruebas de campo, con el fin de medir la temperatura y presión atmosférica que permitan calcular la densidad atmosférica según la fórmula recomendada por el standard de la IEC 600-41.

$$\rho_a = \left( \frac{P_{atm}}{T_a} \right) * 3.4837 * 10^{-3} (2)$$

$\rho_a$  = Densidad atmosférica (Kg/m<sup>3</sup>)

$P_{atm}$  = Presión atmosférica (Pa)

$T_a$  = Temperatura ambiente (° K)

El cuadro 21 muestra los datos obtenidos durante en las mediciones de campo así como el valor de la densidad atmosférica calculado correspondiente a 1.0763 Kg/m<sup>3</sup>.

Cuadro 21. Mediciones de campo en Tejona para el cálculo de la densidad atmosférica

Datos registrados de las condiciones atmosféricas de Planta Eólica Tejona									
T1 (°C)	T2 (°C)	V (Volt)	Patm (bar)	Patm (pa)	$\rho_a$ (T1) (Kg / m3)	$\rho_a$ (T2) (Kg / m3)	$\rho_a$ (promedio) (Kg / m3)	Hora	
26.3763	24.7245	0.4375	0.93125	93125	1.0831	1.0891	1.0861	11:07:23	
26.4398	25.5382	0.4375	0.93125	93125	1.0829	1.0861	1.0845	11:28:22	
26.8413	25.487	0.4375	0.93125	93125	1.0814	1.0863	1.0839	11:31:00	
26.8413	25.6057	0.4373	0.93119	93119	1.0814	1.0858	1.0836	11:00:00	
28.4484	26.5429	0.4375	0.93125	93125	1.0757	1.0825	1.0791	13:07:22	
29.9676	26.4535	0.4330	0.9299	92990	1.0687	1.0813	1.0750	13:14:02	
29.253	26.4769	0.4329	0.92987	92987	1.0712	1.0811	1.0762	13:16:46	
31.9697	26.84	0.4322	0.92966	92966	1.0614	1.0796	1.0704	13:21:58	
28.2222	27.3012	0.4323	0.92969	92969	1.0747	1.0780	1.0763	13:26:52	
29.679	27.6832	0.4319	0.92957	92957	1.0694	1.0765	1.0729	13:35:23	
29.4805	26.8405	0.4319	0.92957	92957	1.0701	1.0795	1.0748	13:39:23	
29.9166	27.4779	0.4318	0.92954	92954	1.0685	1.0772	1.0728	13:40:36	
29.6311	27.0781	0.4318	0.92954	92954	1.0695	1.0786	1.0740	13:41:42	
30.8934	27.358	0.4318	0.92954	92954	1.0651	1.0776	1.0713	13:42:54	
30.0045	27.8706	0.4317	0.92951	92951	1.0681	1.0757	1.0719	13:52:14	
29.3106	26.6339	0.4305	0.92915	92915	1.0702	1.0797	1.0749	14:21:27	
29.3876	27.5111	0.4305	0.92915	92915	1.0699	1.0766	1.0732	14:22:52	
30.1831	27.3565	0.4304	0.92912	92912	1.0671	1.0771	1.0721	14:23:59	
29.6378	26.6625	0.4303	0.92909	92909	1.0690	1.0796	1.0742	14:26:57	
28.4346	25.858	0.4302	0.92906	92906	1.0732	1.0824	1.0778	14:28:28	
28.4595	26.3565	0.4300	0.929	92900	1.0730	1.0806	1.0768	14:29:21	
28.3479	26.3825	0.4300	0.929	92900	1.0734	1.0805	1.0769	14:37:50	
28.3536	26.3518	0.4300	0.929	92900	1.0734	1.0806	1.0770	14:38:28	
<b>Promedio</b>							<b>1.0763</b>		

Fuente: Elaboración propia, Instituto Costarricense de Electricidad, 2014

### c. Cuantificación del Potencial Eólico

Una masa de aire (m) que se mueve a una velocidad v tiene una energía cinética:

$$E = \frac{mv^2}{2} \quad (3)$$

La energía por unidad de volumen de la corriente de aire es:

$$e = \frac{\rho_a v^2}{2} \quad (4)$$

La potencia mecánica disponible en las masas de aire en movimiento es proporcional al cubo de la velocidad del viento y al área expuesta a la corriente de aire:

$$Pd = \frac{\rho_a v^3 A}{2} \quad (5)$$

Debido a la alta variación temporal del viento, el potencial eólico disponible se caracteriza mediante la potencia media disponible por unidad de área expuesta:

$$\frac{\overline{Pd}}{A} = \frac{\rho_a \overline{v^3}}{2} \quad (6)$$

$Pd$  = Potencia disponible

$A$  = Sección transversal de área perpendicular a la corriente de aire.

$\rho_a$  = Densidad atmosférica de  $1,0763 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$  valor obtenido para la Central Eólica Tejona

Si solo se dispone de la velocidad media mensual, la potencia media aprovechable será:

$$\frac{\langle P \rangle}{A} = \frac{\rho_a \overline{v^3}}{2} \quad (7)$$

Donde la relación entre ellas es:

$$\frac{\overline{Pd}}{\langle P \rangle} = FPE = \frac{\overline{v^3}}{\overline{v^3}} \quad (8)$$

Por lo tanto, la potencia media eólica disponible en un lugar en el que sólo se conoce la velocidad media mensual será:

$$\overline{Pd} = \frac{FPE \rho_a A \overline{v^3}}{2} \quad (9)$$

La potencia aprovechable ( $P_a$ ) para un generador eólico con un área de barrido A frente a un flujo de aire a una velocidad v y densidad atmosférica es:

$$P_a = \frac{1}{2} \rho_a A v^3 C_p \quad (10) \quad C_p = \text{Coeficiente de potencia}$$

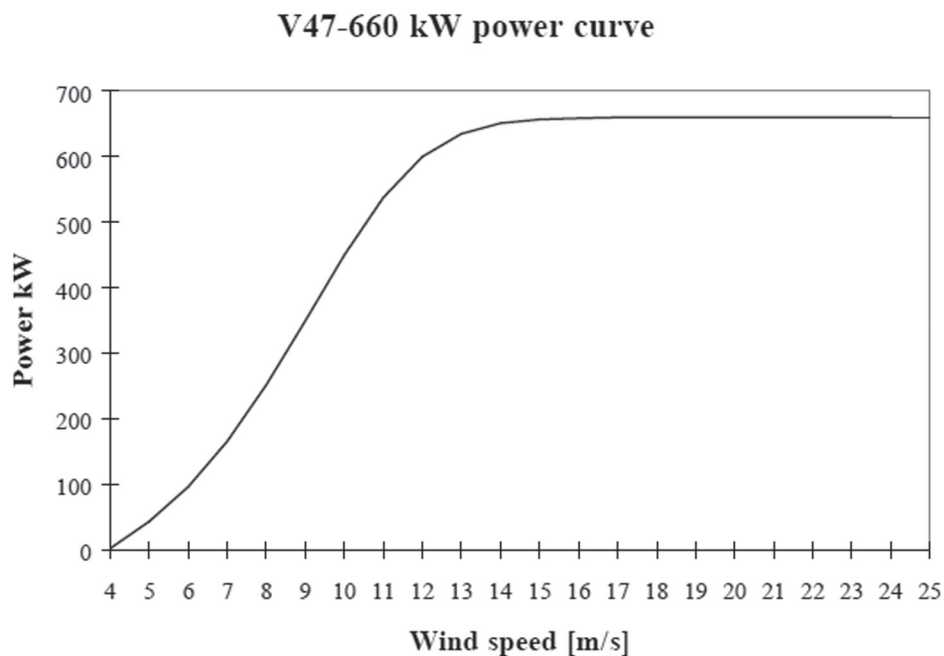
#### d. Curva de Potencia

La curva de potencia define la potencia eléctrica disponible como función de la velocidad del viento. Es nula hasta una velocidad mínima o de arranque alrededor de los 4 m/s y a partir de ella crece rápidamente (aproximadamente como el cubo de la velocidad) creciendo asimismo el régimen de giro del rotor. Al llegar el viento a una velocidad nominal, entre los 10 a 15 m/s, comienzan a actuar los mecanismos de limitación y la potencia de salida y el régimen del rotor se mantienen aproximadamente constantes.

Esta potencia se denomina potencia nominal y se mantiene hasta los 20 o 25 m/s. A partir de aquí, la potencia de salida cae rápidamente o se anula el funcionamiento, pues comienzan a actuar los mecanismos de protección, frenando el rotor para evitar riesgos.

La figura 90 muestra la curva de potencia de un aerogenerador similar a los instalados en la central eólica Tejana.

Figura 90. Curva de potencia de un generador Vestas V47-660 kW.



Fuente: Vestas 660 kW Variable Slip Wind Turbine pg.7

#### e. Coeficiente de potencia

El coeficiente de potencia  $CP(v)$  mide la fracción de la energía extraída del rotor y es función de la velocidad del viento. Este valor tiene un límite teórico conocido como el "límite de Betz" igual a 0,59 aunque en el ámbito práctico este valor ronda 0,44 y se calcula mediante las siguientes ecuaciones (Heier, 2006).

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{v_w} \quad (11)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.001}{\beta^3 + 1} \quad (12)$$

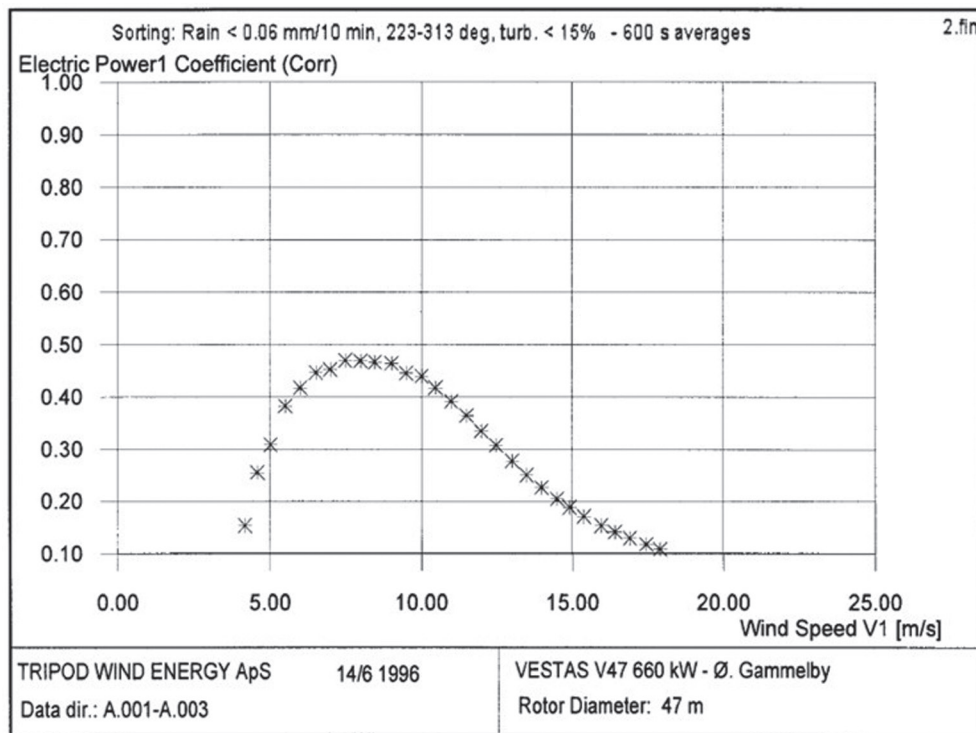
$$C_p(\lambda, \beta) = 0.44 \left( \frac{124.99}{\lambda_i} - 0.4\beta - 6.94 \right) \quad (13)$$

- $\lambda$  = Relación de velocidad de punta
- $R$  = Radio de giro de las hélices
- $\omega_t$  = Velocidad angular de la turbina
- $v_w$  = Velocidad del viento
- $\beta$  = Angulo de ajuste de las hélices

La figura 91 muestra la curva de eficiencia de un aerogenerador similar a los instalados en la central eólica Tejona en función de la velocidad del viento, como se puede observar, la eficiencia más alta se da a velocidades del viento alrededor de 9 m/s.

A bajas velocidades del viento la eficiencia no es tan alta, ya que no hay mucha energía que recoger. A altas velocidades del viento, la turbina debe disipar cualquier exceso de energía por encima de aquella para la que ha sido diseñado el generador (Windpower, 2000, p.39).

Figura 91. Curva de eficiencia de un generador Vestas V47-660 KW.



Fuente. Vestas 660 kW Variable Slip Wind Turbine pg. 20

Para definir el modelo matemático de los aerogeneradores utilizados en la central de Tejona que permitan obtener las curvas de potencia, así como las curvas de eficiencia; fue necesario partir de las características físicas de los aerogeneradores y de las condiciones ambientales donde se ubica la central generadora. Esta información es necesaria para realizar los respectivos cálculos por medio de las ecuaciones (10), (11), (12) y (13). El cuadro 22 muestra los datos de las características físicas de los aerogeneradores de la central generadora Tejona.

Por otro lado fue necesario obtener un modelo matemático para simular el comportamiento del ángulo de ajuste de las aspas ( $\beta$ ) en función de la velocidad del viento. Para lograr obtener dicho modelo se partió de los valores reales de los ángulos de ajuste ( $\beta$ ) registrados en la base de datos del sistema SCADA de la central generadora para diferentes valores de velocidad del viento. Con esta información se procedió a obtener ecuaciones por el método de regresión polinomial que modelaran el comportamiento del ángulo ( $\beta$ ) en función de la velocidad del viento.

De esta forma se definió un modelo para velocidades de 4 a 15 m/s según la ecuación (14) y otro modelo para velocidades de viento mayores de 15 m/s hasta 25 m/s según la ecuación (15)

$$\beta_{4-15}(v) = -176.8106 + 155.6448v - 56.1640v^2 + 10.9464v^3 - 1.2497v^4 + 0.0835v^5 - 0.0030v^6 + 0.000046v^7 \quad (14)$$

$$\beta_{15-25}(v) = 233.8512 - 41.2596v + 2.7209v^2 - 0.0789v^3 + 0.00085v^4 \quad (15)$$

*Cuadro 22. Datos características físicas de los aerogeneradores de Tejona*

Características Físicas y Ambientales Aerogeneradores Tejona	
Marca	Vestas
Modelo	V47-660 KW
Diámetro rotor (m)	42
Área de barrido (m2)	1385.4
Número de aspas	3
Relación multiplicación caja engranajes	57
Tipo generador	Inducción
Velocidad nominal generador (rpm)	1800
Potencia nominal generador (KW)	660
Rango velocidad del viento (m/s)	abr-25
Velocidad de viento de arranque (m/s)	4
Velocidad de viento de paro (m/s)	25
Densidad del aire (Kg/m3)	1.0763

Utilizando la información de la del cuadro 22 y aplicando las ecuaciones (10), (11), (12), (13), (14) y (15), se modeló el funcionamiento de los aerogeneradores. La información de la velocidad del viento para cada unidad generadora se extrajo de la base de datos del sistema SCADA instalado en la sala de control de la central generadora Tejona. Cada una de las fórmulas matemáticas descritas, fue programada en una hoja electrónica con el fin de obtener por cada valor de velocidad del viento, la potencia simulada ( $P_{sim}$ ), el coeficiente de potencia simulado ( $Cp_{sim}$ ) de cada aerogenerador, así como los valores de potencia real ( $P_{real}$ ) y coeficiente de potencia real ( $Cp_{real}$ ) correspondientes a dichas velocidades de viento con el fin de comparar valores simulados con los reales.



La potencia real se obtiene de la base de datos el SCADA y el coeficiente de potencia real, se calcula mediante la ecuación (16):

$$C_{preal} = \frac{2 P_{real}}{\rho_a A V^3} \quad (16)$$

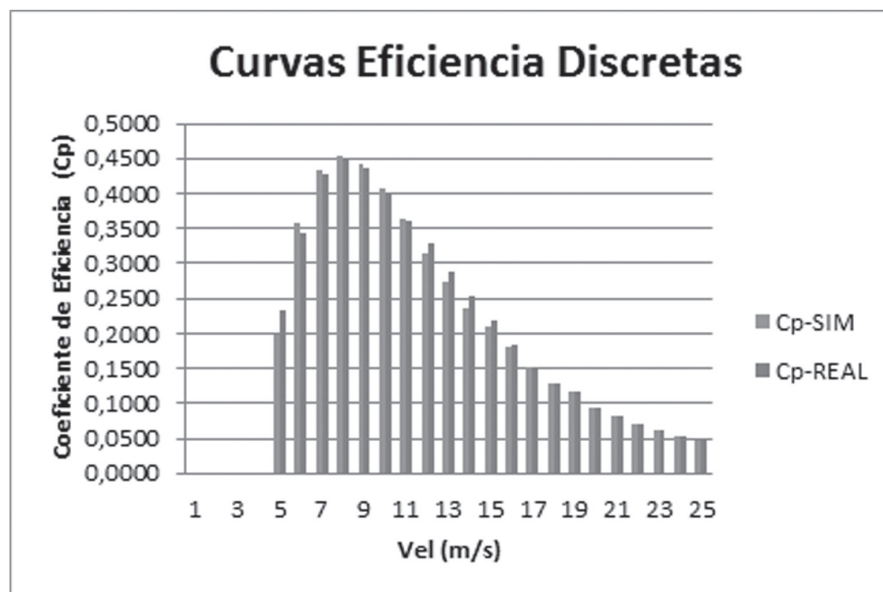
#### f. Medición de eficiencia en línea

Llamamos medición de eficiencia en línea a la capacidad de obtener el valor de la eficiencia o rendimiento con la que un aerogenerador está produciendo en un instante determinado una potencia eléctrica específica. En las unidades aerogeneradoras el valor de la eficiencia corresponde a los valores del coeficiente de potencia  $C_p$ , el cual se puede obtener a partir de la velocidad del viento que hace girar el rotor así como la potencia que está generando la unidad en un instante determinado, según la ecuación (16). Mientras la unidad generadora se encuentre operando, la velocidad del viento y potencia generada se encuentran disponibles en el sistema SCADA, por lo que constantemente se puede obtener el valor del coeficiente de potencia real ( $C_{preal}$ ) con que está operando la unidad.

Por otro lado simultáneamente con la medición de cada valor del coeficiente de potencia real, se puede obtener para las mismas velocidades de viento, el valor del coeficiente de potencia simulado ( $C_{psim}$ ) calculado con las ecuaciones (11), (12) y (13).

La medición de eficiencia en línea realiza una comparación en tiempo real del coeficiente de eficiencia medido ( $C_{p-med}$ ) con el simulado ( $C_{p-sim}$ ) en el rango de operación de la velocidad del viento. Esta comparación de la eficiencia permite visualizar el estado de las unidades generadoras, al detectar tendencias de pérdida de eficiencia se debe analizar las causas que las están provocando, con el fin de tomar decisiones para definir el adecuado mantenimiento de los aerogeneradores que permita recuperar la eficiencia perdida. La figura 92 muestra la gráfica donde se comparan los valores de los coeficientes de potencia reales y simulados por cada valor de velocidad del viento.

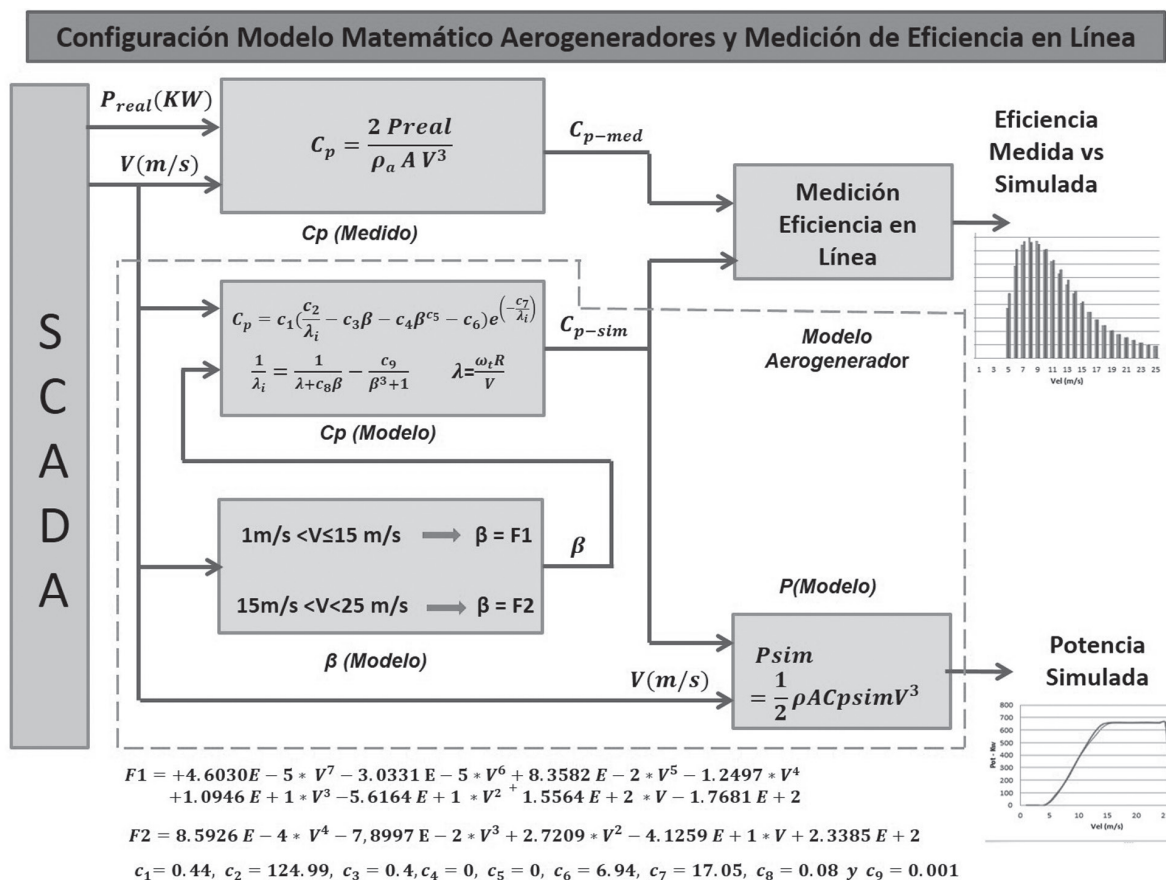
Figura 92. Valores de  $C_{preal}$   $C_{psim}$  vs velocidad viento unidades Tejona



Fuente: Elaboración propia, Instituto Costarricense de Electricidad, 2014

La figura 93 muestra el diagrama de bloques del proceso para obtener la potencia simulada y la medición de eficiencia en línea por medio de los modelos matemáticos propuestos anteriormente.

Figura 93. Diagrama bloques modelo matemático aerogeneradores



Fuente: Elaboración propia, Instituto Costarricense de Electricidad, 2014

### g. Pre-despacho de energía

En un sistema eléctrico el pre-despacho significa encontrar que generación cubrirá la demanda de energía, por lo tanto el pre-despacho es el proceso de decidir cuáles son las unidades que deberán estar disponibles para generar. La selección de dichas unidades considera los requerimientos de programas de mantenimiento de las unidades, los costos de arranque y parada, la minimización de los requerimientos de combustible para el caso de las plantas térmicas y la disponibilidad estacionaria de fuentes intermitentes como la hidráulica y la eólica.

En el caso de las centrales de generación eólicas, una de las grandes dificultades que se tiene para establecer pre-despachos de energía es precisamente la variabilidad de los vientos durante el día. Es por eso que una adecuada planificación de la generación con centrales de generación eólicas, dependerá de disponer de pronósticos de viento adecuados, con una anticipación mínima de 24 horas. Cuanto más exacto sea el pronóstico mejor se podrá integrar la potencia eólica a todo el sistema eléctrico. En el caso de la central eólica Tejona, se cuenta con pronósticos de viento del sitio, con intervalos de 3 horas a una altura de 40 m. y con una proyección de 7 días, el cual se actualiza diariamente. Esta información es suministrada por la Unidad de Pronóstico, Procesamiento y Análisis Hidrológico del Instituto Costarricense de Electricidad. El cuadro 23 muestra un detalle de dicho pronóstico.

Cuadro 23. Pronóstico de Viento para el Centro de Producción Tejona 10-jul-14

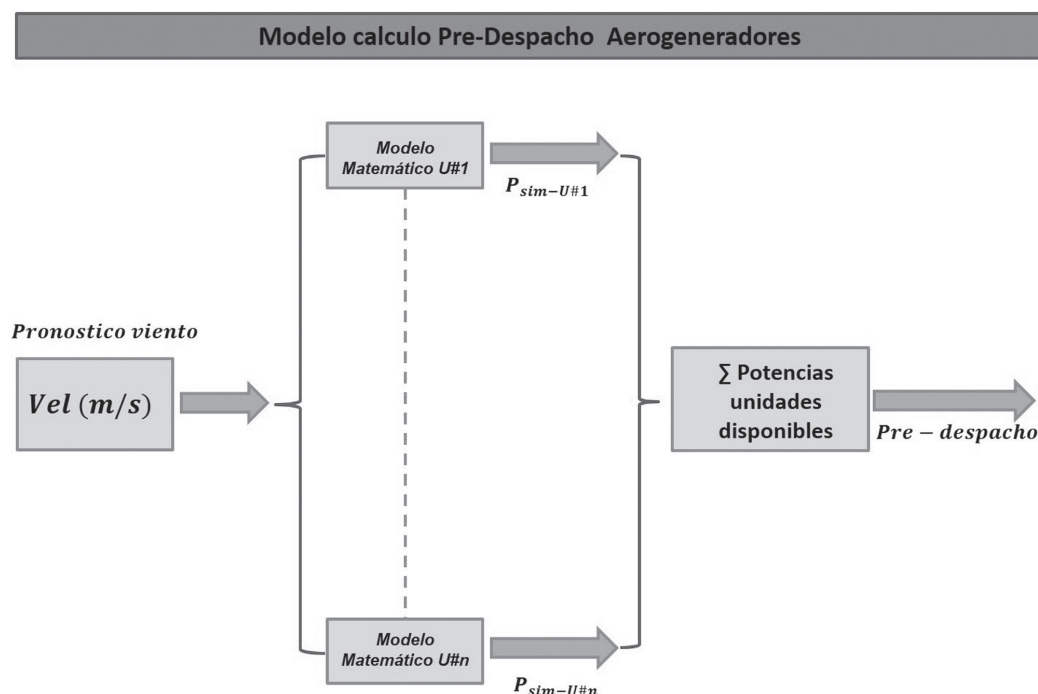
Pronóstico de la Velocidad del Viento cada 3 horas a una altura de 40 m							
Día	Hora	Vel -1DE	Velocidad	Vel +1DE	Dirección	Dirección	Modelo
			(m/s)		(°)		GFS
09-jul	1	17.0	20.3	23.6	73.9	ENE	7.9
	4	17.8	21.1	24.4	72.4	ENE	8.2
	7	21.1	24.4	27.7	77.0	ENE	9.5
	10	19.7	23.0	26.3	72.3	ENE	9.0
	13	16.8	20.1	23.4	67.4	ENE	7.8
	16	17.5	20.8	24.1	64.4	ENE	8.1
	19	18.6	21.9	25.2	59.9	ENE	8.5
	22	20.4	23.7	27.0	62.0	ENE	9.2
10-jul	1	20.2	23.5	26.8	66.9	ENE	9.1
	4	17.3	20.6	23.9	68.8	ENE	8.0
	7	16.9	20.2	23.5	68.7	ENE	7.9
	10	16.1	19.4	22.7	65.7	ENE	7.6
	13	14.6	17.9	21.2	67.1	ENE	7.0
	16	13.9	17.2	20.5	64.8	ENE	6.7
	19	14.3	17.6	20.9	66.4	ENE	6.9
	22	15.9	19.2	22.5	63.2	ENE	7.5
11-jul	1	14.9	18.2	21.5	64.2	ENE	7.1
	4	14.3	17.6	20.9	66.1	ENE	6.8
	7	13.6	16.9	20.2	65.2	ENE	6.6
	10	14.0	17.3	20.6	60.8	ENE	6.7
	13	13.2	16.5	19.8	54.9	NE	6.4
	16	13.7	17.0	20.3	47.4	NE	6.6
	19	15.2	18.5	21.8	55.4	NE	7.2
	22	14.2	17.5	20.8	67.6	ENE	6.8
12-jul	1	12.4	15.7	19.0	73.3	ENE	6.1
	4	9.8	13.1	16.4	71.8	ENE	5.1
	7	10.8	14.1	17.4	82.1	E	5.5
	10	5.8	12.4	19.0	77.0	ENE	4.8
	13	4.7	11.3	17.9	65.9	ENE	4.4
	16	7.2	13.8	20.4	49.2	NE	5.4
	19	9.5	16.1	22.7	49.8	NE	6.3
	22	10.8	17.4	24.0	60.2	ENE	6.8
13-jul	1	7.9	14.5	21.1	63.8	ENE	5.6
	4	5.4	12.0	18.6	63.2	ENE	4.7
	7	4.1	10.7	17.3	68.8	ENE	4.2
	10	2.0	8.6	15.2	71.2	ENE	3.3
	13	0.0	6.0	12.6	77.2	ENE	2.3
	16	0.2	6.8	13.4	58.9	ENE	2.6
	19	3.1	9.7	16.3	61.6	ENE	3.8
	22	3.3	9.9	16.5	67.7	ENE	3.9
14-jul	1	2.4	9.0	15.6	58.0	ENE	3.5
	4	1.6	8.2	14.8	48.0	NE	3.2

	7	2.3	8.9	15.5	56.8	ENE	3.5
	10	2.6	9.2	15.8	55.5	NE	3.6
	13	1.8	8.4	15.0	53.6	NE	3.3
	16	3.3	9.9	16.5	56.3	ENE	3.9
	19	6.0	12.6	19.2	60.4	ENE	4.9
	22	5.8	12.4	19.0	62.6	ENE	4.8
15-jul	1	6.1	12.7	19.3	60.6	ENE	4.9
	4	4.6	11.2	17.8	65.7	ENE	4.3
	7	4.5	11.1	17.7	65.0	ENE	4.3
	10	4.7	11.3	17.9	59.6	ENE	4.4
	13	3.0	9.6	16.2	60.2	ENE	3.7
	16	3.0	9.6	16.2	66.8	ENE	3.7
	19	5.1	11.7	18.3	64.3	ENE	4.5
	22	6.4	13.0	19.6	55.4	NE	5.1

Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad

Con el modelo matemático propuesto para simular la potencia de los aerogeneradores, el pronóstico del viento de central generadora Tejona y la información de la disponibilidad de las unidades generadoras es posible definir una metodología que permita realizar pre-despachos de energía de dicha Central. La figura 94 muestra un esquema de esta metodología, el cual consiste en evaluar en el modelo matemático propuesto para el cálculo de potencia generada en cada aerogenerador disponible, los valores de velocidad de viento que nos brinda el pronóstico. La sumatoria de las potencias esperadas obtenidas en la simulación de todas las unidades que estén en capacidad de operar, sería el pre-despacho de energía de la central generadora.

Figura 94. Metodología para cálculo pre-despachos de energía



Fuente: Elaboración propia, Instituto Costarricense de Electricidad, 2014

### III. Resultados

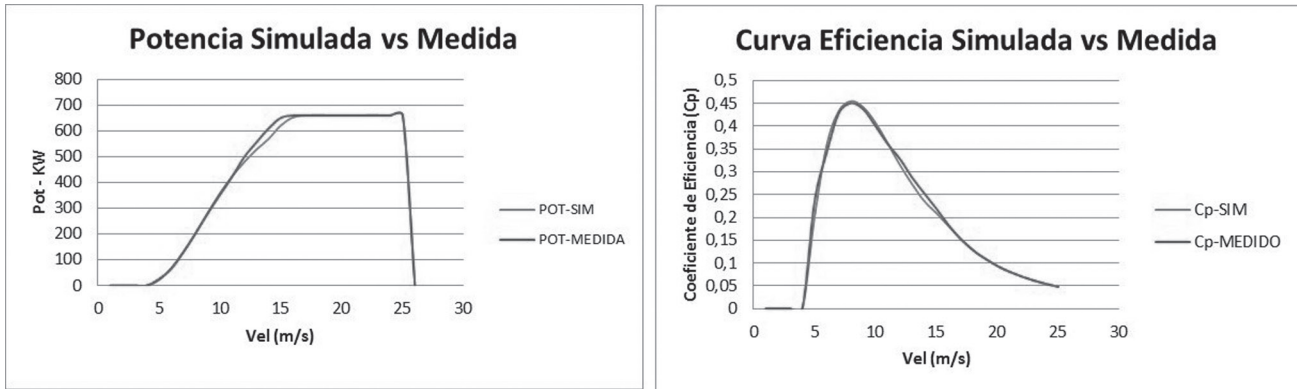
El cuadro 24, muestra los valores de la potencia real ( $P_{real}$ ), potencia simulada ( $P_{sim}$ ), coeficiente de potencia real ( $Cp_{real}$ ) y coeficiente de potencia simulado ( $Cp_{sim}$ ), por cada valor de velocidad del viento en el rango de 0 a 25 m/s en las unidades generadoras de la central de generación Tejona. En la figura 95 se muestran las gráficas para las potencias y coeficientes de potencia reales y simulados.

*Cuadro 24. Cálculos obtenidos en la simulación de potencia y coeficientes de potencia de aerogeneradores de Tejona.*

Vel	Vel ajustada	$\lambda$	$1/\lambda$	$\lambda$	$\beta$ = ángulo pich	$Cp_{sim}$	$P_{sim}$	$Cp_{real}$	$P_{real}$
1	1.0526	65.9734	0.0141	70.9723	-0.4120	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	2.1053	32.9867	0.0299	33.4191	1.3388	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	3.1579	21.9911	0.0450	22.2097	2.2118	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	4.2105	16.4934	0.0599	16.7060	2.4306	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	5.2632	13.1947	0.0748	13.3724	1.9596	0.1995	21.9067	0.2334	25.6250
6	6.3158	10.9956	0.0898	11.1383	1.3042	0.3580	67.9057	0.3421	64.9000
7	7.3684	9.4248	0.1047	9.5481	0.6828	0.4336	130.6274	0.4290	129.2300
8	8.4211	8.2467	0.1201	8.3270	0.1466	0.4549	204.5570	0.4506	202.6000
9	9.4737	7.3304	0.1359	7.3591	-0.3406	0.4416	282.7313	0.4374	280.0300
10	10.5263	6.5973	0.1514	6.6055	-0.6683	0.4079	358.2552	0.4009	352.1000
11	11.5789	5.9976	0.1668	5.9950	-0.6714	0.3630	424.3251	0.3616	422.6500
12	12.6316	5.4978	0.1817	5.5035	-0.3175	0.3157	479.1808	0.3287	498.8100
13	13.6842	5.0749	0.1953	5.1201	0.2439	0.2736	527.9537	0.2881	555.8000
14	14.7368	4.7124	0.2082	4.8040	1.0010	0.2363	569.3771	0.2531	610.0000
15	15.7895	4.3982	0.2156	4.6391	3.0012	0.2097	621.4375	0.2194	650.4000
16	16.8421	4.1233	0.2291	4.3644	3.0051	0.1814	652.3755	0.1834	659.6500
17	17.8947	3.8808	0.2452	4.0779	2.4507	0.1528	659.4866	0.1529	659.9100
18	18.9474	3.6652	0.2599	3.8473	2.2622	0.1290	660.6002	0.1288	659.9000
18.6	19.5789	3.5470	0.2681	3.7302	2.2767	0.1168	660.2886	0.1167	659.8000
20	21.0526	3.2987	0.2854	3.5034	2.5510	0.0939	659.6844	0.0939	660.0000
21	22.1053	3.1416	0.2966	3.3712	2.8640	0.0811	659.9402	0.0811	660.0000
22	23.1579	2.9988	0.3071	3.2563	3.2144	0.0706	660.3154	0.0706	660.0000
23	24.2105	2.8684	0.3170	3.1543	3.5713	0.0618	660.2583	0.0618	660.0000
24	25.2632	2.7489	0.3265	3.0630	3.9250	0.0543	659.7986	0.0544	660.0000
25	26.3158	2.6389	0.3354	2.9819	4.2859	0.0481	660.1308	0.0481	660.0000
26	27.3684	2.5374	0.3434	2.9124	4.6855	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Fuente: Elaboración propia, Instituto Costarricense de Electricidad, 2014

Figura 95. Gráficas de potencia y coeficientes de potencias real y simulada

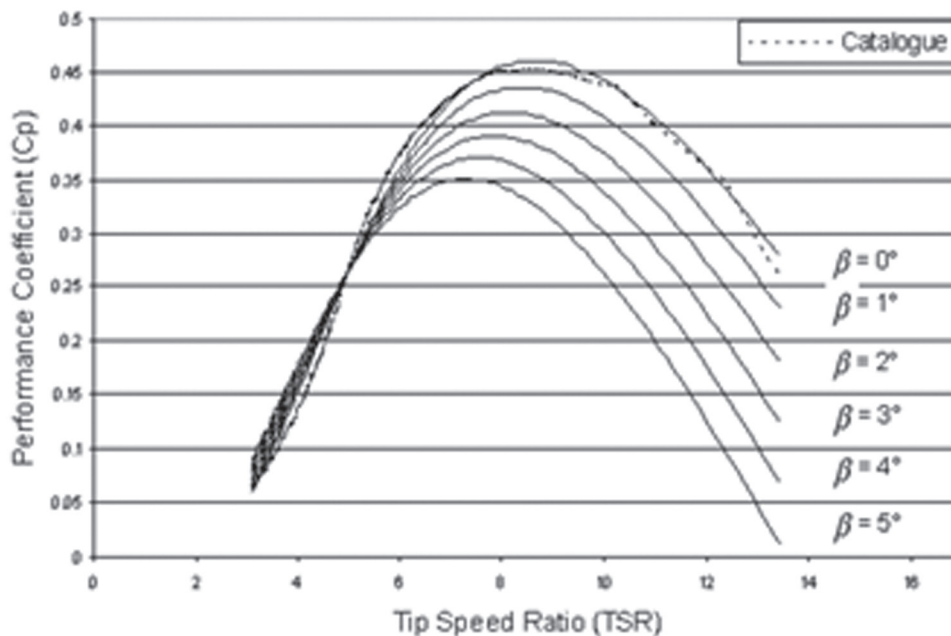


Fuente: Elaboración propia, Instituto Costarricense de Electricidad-2014

## IV. Discusión

En el artículo “*Comparison of Fixed Speed Wind Turbines Models: A Case Study*” publicado en el año 2012, por ingenieros de las universidades de Chile y Calgary de Canadá, se realiza una caracterización del comportamiento del coeficiente de potencia  $C_p$  respecto a diferentes valores de la relación de velocidad de punta  $\lambda$ . La figura 96, muestra una familia de curvas de esta caracterización para diferentes valores de ángulo de paso de las hélices ( $\beta$ ) también llamado “pitch angle” (Bustos, 2012).

Figura 96. Curvas de valores de  $C_p$  de turbinas eólicas respecto a variaciones de  $\lambda$  y  $\beta$



Fuente: Comparison of Fixed Speed Wind Turbines Models: A Case Study. IECON.

Con el fin de validar el modelo matemático obtenido para el coeficiente de potencia  $C_p$  según la ecuación (13), se procedió a obtener una familia de curvas similares a las de la figura 96 para las unidades generadoras de la central Tejona. El cuadro 25 muestra los valores de  $C_p$  obtenidos que permitieron realizar las curvas mostradas en la figura 97.



Como se puede observar de las figuras 96 y 97, las gráficas obtenidas por los ingenieros de las universidades de Chile y Canadá son muy similares a las obtenidas para las turbinas de la central Tejona. Estos resultados nos permiten validar el modelo matemático obtenido para el coeficiente de potencia  $C_p$ .

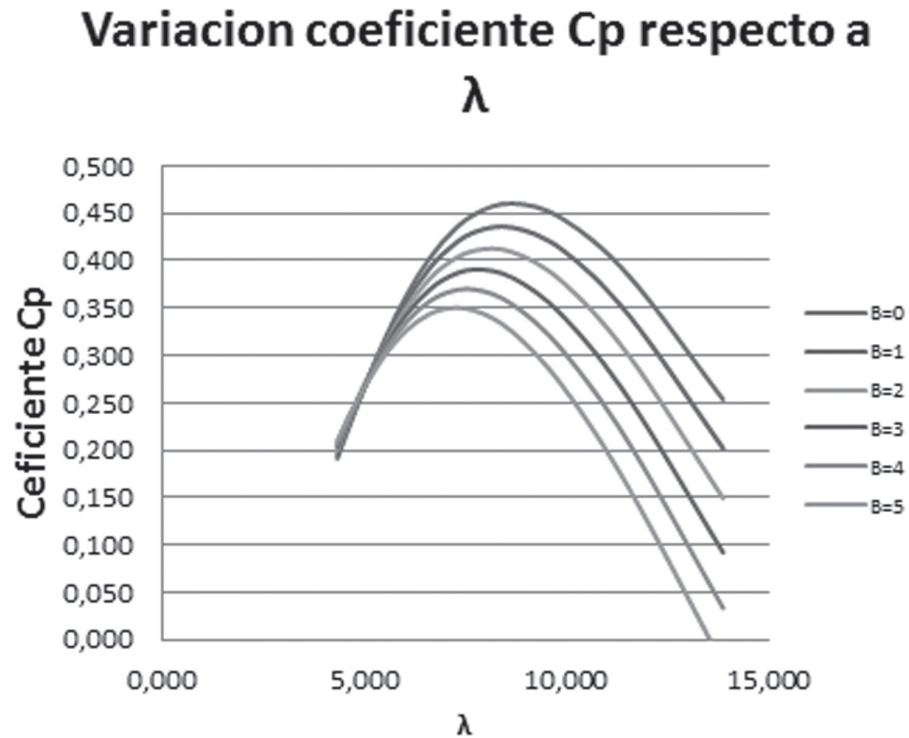
La figura 98 (a) muestra la curva de potencia que brinda el fabricante VESTAS para un aerogenerador Modelo V47-660, la figura 98 (b), muestra la curva de potencia obtenida con el modelo matemático propuesto. Como se puede apreciar la potencia nominal alcanzada es de 660 Kw, existen algunas diferencias en las potencias correspondientes a velocidades de 4 a 15 m/s, esto se debe a que la curva de potencia del fabricante es para una unidad con diámetro de 47 metros y las unidades de Tejona fueron ajustadas a un diámetro de 42 metros. Por otro lado la curva de potencia del fabricante fue obtenida a nivel del mar o sea utilizaron una densidad del aire  $\rho_a = 1.225 \text{ Kg/m}^3$ , mientras que el modelo matemático usa una densidad del aire  $\rho_a = 1.0763 \text{ Kg/m}^3$ ; el cual es el valor obtenido en las pruebas de campo donde se ubica la central generadora.

*Cuadro 25. Valores de  $C_p(\lambda, \beta)$  para los aerogeneradores de la central Tejona*

Vviento (m/s)	$\lambda$	$\beta = \text{Ángulo pich}$					
		0	1	2	3	4	5
4	17.360	0.023	-0.039	-0.103	-0.174	-0.247	-0.321
5	13.880	0.254	0.202	0.150	0.092	0.034	-0.026
6	11.574	0.383	0.341	0.299	0.253	0.206	0.159
7	9.921	0.444	0.411	0.377	0.342	0.305	0.267
8	8.681	0.460	0.435	0.409	0.382	0.354	0.325
9	7.716	0.449	0.430	0.411	0.391	0.370	0.348
10	6.945	0.420	0.407	0.394	0.380	0.365	0.349
11	6.313	0.383	0.375	0.366	0.357	0.347	0.336
12	5.787	0.342	0.337	0.333	0.328	0.322	0.315
13	5.342	0.301	0.299	0.298	0.296	0.293	0.290
14	4.960	0.261	0.262	0.263	0.264	0.264	0.263
15	4.630	0.224	0.227	0.230	0.233	0.235	0.236
16	4.340	0.191	0.196	0.200	0.204	0.207	0.210
17	4.085	0.162	0.167	0.172	0.177	0.182	0.186
18	3.858	0.137	0.142	0.148	0.154	0.159	0.164
19	3.655	0.114	0.120	0.126	0.132	0.138	0.144
20	3.472	0.095	0.102	0.108	0.114	0.120	0.126

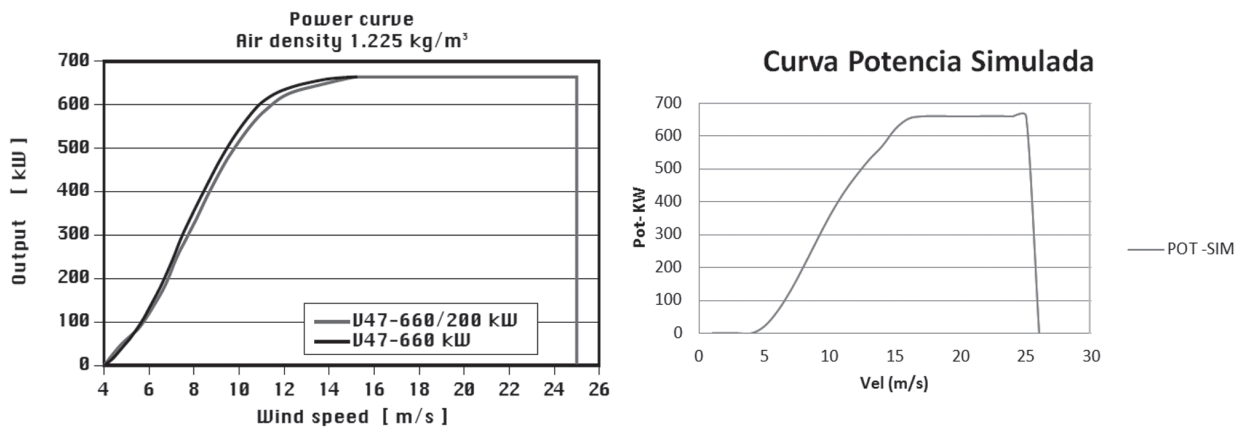
Fuente: Elaboración propia, Instituto Costarricense de Electricidad, 2014

Figura 97. Valores de  $C_p$  de turbinas de la central Tejona respecto a variaciones de  $\lambda$  y  $\beta$



Fuente: Elaboración propia, Instituto Costarricense de Electricidad, 2014

Figura 98. Curvas de potencia del fabricante (a) y simulada (b) para un aerogenerador VESTAS.



Fuente: Elaboración propia, Instituto Costarricense de Electricidad, 2014

## V. Conclusiones

Hay un interés a nivel mundial por incrementar la generación de electricidad con fuentes de energía no convencionales amigables con el planeta de bajo impacto ambiental.

En Costa Rica existen zonas muy propicias especialmente en la provincia de Guanacaste para el desarrollo de proyectos de generación eólica, el cual permitirán reducir considerablemente el impacto ambiental ocasionado por las plantas de generación térmica operantes en el país.

El modelo matemático obtenido para simular la potencia y el coeficiente de potencia para la central eólica Tejona permite evaluar la condición operativa de cada unidad generadora.

Con la información disponible en la base de datos SCADA en la central de generación Tejona es posible implementar a muy bajo costo un sistema de medición de eficiencia en línea de cada una de las unidades del parque eólico.

Con un pronóstico de viento confiable y con el modelo matemático propuesto para obtener la potencia de los aerogeneradores, se puede definir una metodología para el cálculo de pre-despachos de energía.

Es necesario realizar pruebas metrológicas de los anemómetros de los aerogeneradores con el fin de garantizar lecturas de velocidades del viento más precisas para el modelo matemático.

El modelo matemático propuesto para simular el coeficiente de potencia, es muy confiable para implementar un sistema de eficiencia en línea de cada uno de las unidades aerogeneradoras que integran la central eólica Tejona.

La variabilidad de los vientos es un aspecto que tiene un gran impacto para definir pre-despachos de energía.

Para lograr un adecuado y confiable pre-despacho de energía en una central de generación eólica, es indispensable contar con un pronóstico de viento confiable, un modelo matemático que simule la potencia generada a partir del pronóstico del viento y el estado de disponibilidad de cada unidad que compone la central aerogeneradora.

## Referencias

Bianchi, F.D; De Battista, H. y Mantz, R.J. (2007). Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design. Springer.

Bustos, G; Vargas, L; Milla, F; Sáez, D; Zareipour, H y Núñez, A. (2012). Comparison of Fixed Speed Wind Turbines Models: A Case Study. IECON.

Heier, S. (2006). Grid Integration of Wind Energy Conversion System. Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd: Chichester, UK.

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y Agencia Internacional para el Desarrollo de los Estados Unidos (USAID). (1992). Primera fase del estudio de factibilidad de una planta de energía eólica de 20 MW en Costa Rica. San José, Costa Rica.

Laporte, S. (1979). Energía eólica, Fuentes de energía no convencionales. ICE. Dirección de Planificación Eléctrica. Oficina de Estudios Especiales. pp. 15-25.

Montero, J.C. (2005). Proyectos de energía eólica en Costa Rica". Comunicación personal. ICE.

Sánchez, T. Evaluación y caracterización de un aerogenerador. Recuperado de <http://www.itdg.org.pe/publicaciones/pdf/aero.pdf>.

Windpower. (2000). Coeficiente de potencia. Recuperado de <http://www.windpower.org/es/tour/wres/cp.htm>.



# Determinación de potenciales de energía solar para generación eléctrica en Costa Rica

*M.Sc. Rolando Portilla Pastor<sup>27</sup>*

*Lic. Carlos Álvarez Morales<sup>28</sup>*

*M.Sc. Wilfredo Segura López<sup>29</sup>*

## Resumen

Se presume la existencia de un potencial solar elevado para generación eléctrica en Costa Rica. Este estudio plantea como objetivo, determinar en detalle los potenciales electro-solares teóricos y técnicos de Costa Rica. La metodología contempló el uso de los sistemas de información geográfica (SIG) para determinar las zonas de restricciones, que impiden el desarrollo de proyectos solares. Para el potencial técnico, se realizó el cálculo de la radiación global sobre el plano inclinado y de los ángulos  $\beta$  óptimos, que sirven de insumo para el cálculo de la potencia y la energía.

El estudio determinó además, que los niveles de radiación directa en nuestro país están por debajo del mínimo aceptable de 1800 kWh/m<sup>2</sup>\*año y por lo tanto no son atractivos para proyectos solares termoeléctricos.

Los resultados indican que, para los sistemas fotovoltaicos existe un potencial teórico de 43 880 504 GWh/año, a partir del cual, suponiendo un 100% de eficiencia y un factor de planta de 0,19, es posible estimar una potencia teórica de 26 346 000 MW. Por su parte, para el potencial técnico fotovoltaico, los resultados arrojan un valor de 656 195 GWh/año en términos de energía y de 576 747 MW en cuanto a potencia.

Se concluye que el potencial técnico fotovoltaico de Costa Rica es sumamente elevado y que la energía solar constituye en estos momentos, el recurso renovable más abundante para generación eléctrica con que cuenta nuestro país. La selección de sitios muestra zonas óptimas en las regiones pacífico norte, central y sur.

**Palabras claves:** radiación solar, potencial, restricciones, fotovoltaico, factor de planta.

## Determination of potentials of solar energy for electric generation in Costa Rica

### Abstract

It is supposed the existence of a high solar potential in Costa Rica. The main objective of this research is to determine the theoretical and technical national potential for solar electricity generation. The methodology involves the use of geographical information systems (GIS) for the determination of all physical and land use restrictions that avoid the development of solar generation projects. For the technical potential, the determination of the tilted global solar radiation and the optimum  $\beta$  angles was done, as a base for the calculation of energy (GWh/year) and power (MW).

27 Ingeniero Civil. Proceso de Planeamiento Ambiental, CENPE, ICE. rportilla@ice.go.cr,

28 Geógrafo. Proceso de Planeamiento Ambiental, CENPE, ICE. calvarezmo@ice.go.cr

29 Ing. Forestal. Proceso de Planeamiento Ambiental, CENPE, ICE. wsegural@ice.go.cr

The research also determines that direct solar radiation level in our country, is far below the minimum acceptable level of 1800 kWh/m<sup>2</sup>\*year and hence, is not attracted for solar thermoelectric developments.

The final results show that for PV systems, there is a theoretical potential of 43 880 504GWh/year. From this value, supposing 100% efficiency and a plant factor of 0,19, it is possible to estimate a theoretical power of 26 346 000 MW. Also, for the technical PV potential, the final results show values of 656 195GWh/year in terms of energy and 576 747 MW in terms of power.

It can be concluded that PV technical potential for electricity generation is extremely high in Costa Rica. According to obtained results, solar energy is at present, the most abundant renewable resource for electricity generation in our country.

Finally, the results of the prioritization show the main zones of our country, that under certain criteria, have the best conditions for the future development of solar energy projects. Most of them are located on the north zone and north and central pacific zones.

**Key words:** solar radiation, potential, restrictions, photovoltaic, capacity factor.

## I. Introducción

El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) han establecido como política y como modelo de desarrollo la utilización preferente de fuentes renovables de generación, en aras de evitar la dependencia externa a los hidrocarburos y efectos ambientales nocivos por emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, las posibilidades del país para satisfacer una demanda eléctrica creciente con las fuentes y proyectos tradicionales, es cada día más limitada, ya sea por restricciones legales o sociales existentes, o por limitaciones propias de los potenciales de otras fuentes.

La energía solar constituye una fuente de gran potencial, tanto mundial como nacional. Según Wright (2000), la superficie de Costa Rica recibe  $265 \times 10^6$  TJ/año de radiación solar (73 790 444GWh/año). Esta energía constituye un potencial bruto altamente significativo, con el que en teoría se podría satisfacer casi 7 000 veces la demanda eléctrica nacional actual, estimada en 10 789 GWh/año (ICE, 2014).

Sin embargo, estos valores no dejan de ser tan solo un potencial general, que debe necesariamente detallarse, para determinar las posibilidades reales con fines de generación eléctrica. Se pretende en este estudio la estimación del potencial teórico y el potencial técnico solar, dirigido a centrales solares de gran escala y la definición de los mejores sitios de nuestro país para aprovechamientos electro-solares.

## II. Aproximación conceptual

Es necesario aclarar algunos conceptos relacionados con el uso y cuantificación de los potenciales de energía solar que se utilizaron frecuentemente en este artículo. Estos conceptos se detallan a continuación:

- **Potencial bruto:** Este concepto hace referencia a la energía total incidente sobre una zona geográfica. Es el producto de la radiación global horizontal unitaria (KWh/m<sup>2</sup>) y el área total de la región.



- **Potencial teórico aprovechable:** Se refiere a la energía que se podría generar en una zona eliminando las restricciones físicas y de uso del suelo, que impidan el desarrollo de proyectos solares. Las restricciones de uso del suelo son: centros urbanos, áreas protegidas bajo conservación absoluta, humedales, zonas de protección de ríos, lagos y pozos, zonas de inundación, infraestructura vial y zona marítimo terrestre. Las restricciones físicas son pendiente y dirección de pendiente. Se da en unidades de energía (GWh/año) o de potencia (MW).
- **Potencial técnico aprovechable:** Es la energía que se podría producir, a partir del potencial teórico aprovechable, considerando diferentes tecnologías solares, en este caso: fotovoltaico y termoeléctrico en centrales a gran escala. Comprende la consideración de los factores de eficiencia y otros parámetros técnicos de cada tecnología, como los elementos fundamentales para su determinación. Se expresa en unidades de energía (GWh/año) o de potencia (KW o MW)
- **Sistema solar termoeléctrico:** Sistema que utiliza la concentración de la radiación solar directa por medio de diversas tecnologías para producir electricidad a partir del calor generado. Este calor se utiliza para calentar y vaporizar un fluido (agua o hidrocarburos) que produce el movimiento de turbinas que generan electricidad.
- **Sistema solar fotovoltaico:** Es el sistema que utiliza celdas de diversos materiales que convierten la radiación solar directa o difusa en electricidad.

### III. Metodología

El estudio comprendió las siguientes etapas:

#### *3.1 Confección de mapas de radiación solar a nivel nacional.*

La investigación se basó en mapas de radiación solar que fueron elaborados por el Centro de Servicio de Estudios Básicos de la UEN Pysa, a solicitud del Centro Nacional de Planificación Eléctrica (ICE, 2013). Esto comprendió revisar consistencia, completar datos, interpolar información, con el fin de poder contar con mapas mensuales y anuales más confiables para este estudio.

#### *3.2 Zonificación del mapa de radiación solar.*

Se dividió al país en seis regiones climáticas: Pacífico Norte, Central, y Sur, Zona Norte, Región Central y Caribe. Se obtuvieron promedios ponderados de radiación para cada región.

#### *a. Potencial teórico aprovechable*

##### *3.3.1 Restricciones.*

Las restricciones consideradas fueron: Principales centros urbanos, áreas silvestres protegidas bajo conservación absoluta (Parques Nacionales y Reservas Biológicas), infraestructura vial, zona de protección de la red hidrográfica y pozos, lagunas y embalses, zonas de bosque, humedales, zonas de inundación de ríos, proyectos de generación y transmisión eléctrica, zona marítimo terrestre, pendientes (se excluyeron pendientes superiores al 50% y la orientación de pendientes (que no den al sur, sur-este o sur-oeste). Se confeccionaron mapas para cada una de estas restricciones y finalmente, por superposición con el software ARCGIS 10.1 se obtuvieron mapas integrados.

### 3.3.2 Cálculo del Potencial teórico aprovechable

El cálculo del potencial teórico se efectuó con la siguiente fórmula:

$$PTA = R_{GH} \cdot Aa \quad (1)$$

Donde:

PTA: Potencial teórico aprovechable para una región (KWh/año).

$R_{GH}$ : Radiación solar global horizontal promedio (KWh/m<sup>2</sup>\*mes) sobre una región

Aa: Área aprovechable de la región, eliminando todas las restricciones que imposibiliten proyectos solares para generación eléctrica (m<sup>2</sup>).

### 3.4 Potencial técnico aprovechable

#### 3.4.1 Potencial técnico fotovoltaico

##### 3.4.1.1 Restricciones

Alas restricciones para el potencial teórico, se agregaron las pendientes superiores a 20%, considerando que dificultarían mucho la instalación de paneles solares. Además se excluyeron las zonas identificadas como forestales (FONAFIFO, 2010), considerando que sería muy complejo, legal y socialmente, sustituir zonas de bosque por desarrollos fotovoltaicos. El área efectiva obtenida para estos desarrollos se definió como Ae.

##### 3.4.1.2 Cálculo de la radiación solar sobre plano inclinado

- Descomposición de la radiación solar global horizontal

La conversión de radiación global horizontal a radiación global sobre un plano inclinado requiere la previa separación de la radiación horizontal en sus tres componentes: directa, difusa y reflejada. En este estudio, esta descomposición se realizó determinando la "fracción difusa" ( $G_D/G_H$ ), es decir, el porcentaje de la radiación global horizontal  $G_H$  que es radiación difusa. Luego por diferencia (Radiación global – radiación difusa), se calculó la radiación directa horizontal. Para calcular la fracción difusa, se utilizó la ecuación del modelo isotrópico de Liu y Jordan (Liu y Jordan, 1960) que estima la fracción difusa ( $G_D/G_H$ ), en función de la razón entre la radiación global y la radiación solar extraterrestre ( $G_H/G_{H0}$ ).

- Radiación solar sobre plano inclinado

Para calcular la radiación en el plano inclinado, se utilizaron las siguientes ecuaciones:

- a. Radiación directa sobre plano inclinado = Radiación directa horizontal \* Rb

Factor Rb: Factor para convertir radiación directa global horizontal en radiación directa sobre plano inclinado. Los valores Rb se tomaron del texto de Haberlin (2012, pág. 33).

- b. Radiación difusa plano inclinado = Radiación directa plano horizontal \*  $(1 + \cos\beta)/2$ , donde  $\beta$  es el ángulo de inclinación del panel fotovoltaico,
- c. Radiación reflejada plano inclinado = (Reflectancia) \* Radiación Global horiz. \*  $(1 - \cos\beta)/2$  =  $[\rho \cdot R_{GH} \cdot (1 - \cos\beta)/2]$

Donde  $\rho$  es la reflectancia o albedo del terreno, en este estudio supuesta como 0.2,  $R_{GH}$  es la radiación global sobre plano horizontal y  $\beta$  la inclinación del panel.

### 3.4.1.3 Cálculo del ángulo $\beta$ óptimo

El cálculo de la generación fotovoltaica requiere la determinación previa del ángulo de inclinación óptimo de los paneles, para las diferentes regiones. Para lograr este objetivo, luego de separada la radiación global en directa y difusa para cada región, se calcularon valores de la radiación directa, difusa y reflejada para diferentes valores del ángulo  $\beta$ , acumulando tanto mensual como anualmente. Comparando todos los valores anuales obtenidos para cada ángulo y para cada región, fue posible determinar el ángulo  $\beta$  que produce la mayor radiación sobre plano inclinado y que corresponde por lo tanto al ángulo de inclinación óptimo para cada región.

### 3.4.1.4 Cálculo del potencial técnico aprovechable solar fotovoltaico

Para el cálculo de la generación solar fotovoltaica (potencial técnico), se utilizó la siguiente ecuación, tomada de NEWJEC Inc (2011):

$$\text{EPM} = \text{PAS} \times (R_{s-\beta} / G_s) \times k \quad (2)$$

Donde:

- a. EPM: Energía eléctrica generada promedio mensual (kWh/mes)
- b. PAS: Potencia del arreglo solar (kW)

$\text{PAS} = P_p \times N_p$ ,  $P_p$ : potencia nominal del panel,  $N_p$ : número de paneles del arreglo.

El número de paneles ( $N_p$ ), se calculó multiplicando el área efectiva  $A_e$  por el factor de aprovechamiento  $F_{ap}$ , obtenido de promedios para proyectos fotovoltaicos a nivel mundial, y dividiendo este resultado entre el área de cada panel ( $A_{pan}$ ).

$$N_p = [(A_e * F_{ap}) / \cos \beta] / A_{pan}$$

$F_{ap}$ : Factor de aprovechamiento del terreno. Representa el porcentaje de la finca (medido horizontalmente) que será destinado a colocación de paneles fotovoltaicos. A nivel mundial varía entre 15 y 50%. Para este estudio se utilizó un valor de 30%.

- c.  $R_{s-\beta}$ : Radiación promedio mensual en plano del panel solar para una inclinación  $\beta$ .
- d.  $G_s$ : Radiación solar (intensidad) bajo condiciones estándar = 1 kW/m<sup>2</sup>
- e.  $k$ : Coeficiente de diseño (varía entre 0,6 y 0,7). Acumula coeficientes de temperatura, deterioro, conversión CD a CA, radiación, etc.

### 3.4.2 Potencial técnico solar termoeléctrico

Se realizó una estimación general de los niveles de radiación solar directa promedio que presenta nuestro país en diferentes regiones, con base en información meteorológica. Estos niveles de radiación directa se compararon con el umbral mínimo para desarrollos con sistemas solares termo-eléctricos, que según la literatura consultada es del orden de 1700 kWh/m<sup>2</sup>\*año (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2009)

### 3.4.3 Priorización y selección de zonas

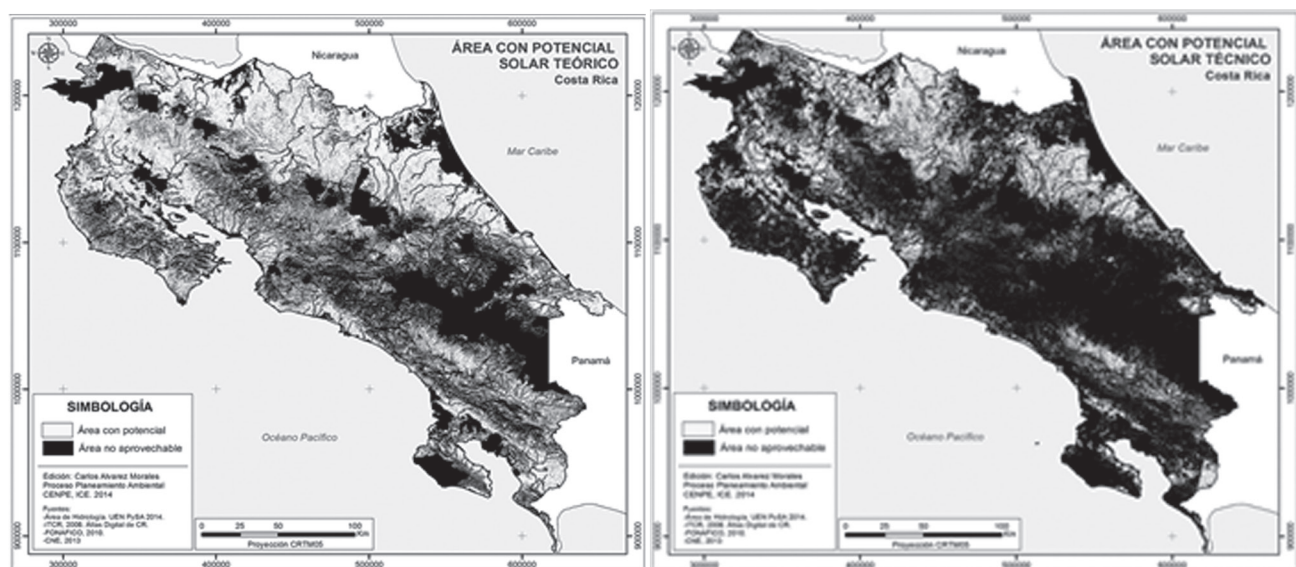
Se contempla como parte de la investigación, realizar una priorización con base en criterios como potencial extraíble o radiación solar, distancia a la red eléctrica, distancia a la red de caminos, pendiente del terreno.

## IV. Resultados

### 4.1 Mapas de restricciones

La siguiente figura (99) muestra los mapas finales de restricciones elaborados, luego de la superposición de todas las capas SIG.

Figura 99. Mapas de restricciones para los potenciales.



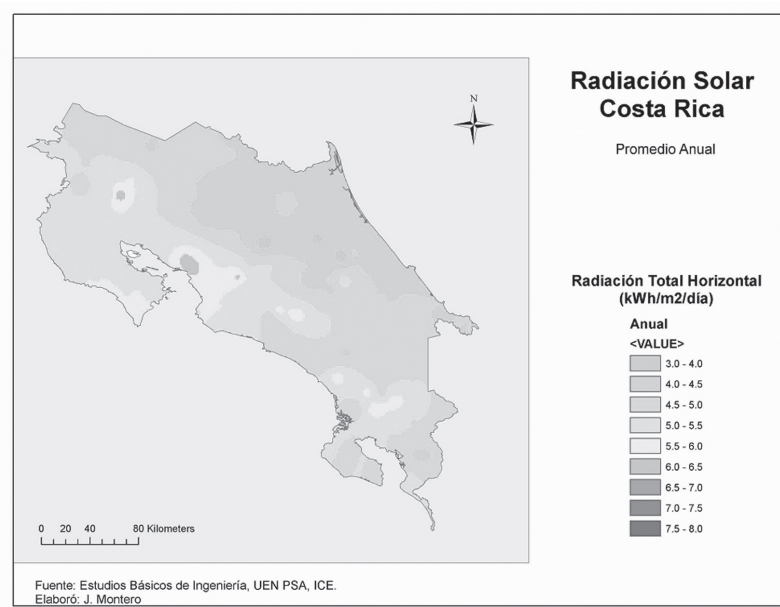
Fuente: Elaboración propia, 2014.

Para el potencial técnico, el área total aprovechable para aprovechamientos solares fotovoltaicos, resulta ser de 12 233 km<sup>2</sup>, un 23,5% del territorio nacional. Las áreas de mayor aprovechamiento en cuanto al potencial técnico se encuentran principalmente ubicadas en la cuenca hidrográfica del río Tempisque, cuenca hidrográfica del San Carlos, parte de la cuenca hidrográfica del Río Grande de Térraba y la sección central de la Vertiente Caribe.

### 4.3 Mapas de radiación solar

La figura 100 presenta el mapa de radiación promedio anual para todo el país, elaborado por el C.S Estudios Básicos de Ingeniería de la UEN Pysa. Asimismo, se elaboraron mapas promedio mensuales del recurso.

Figura 100. Radiación global horizontal promedio anual.



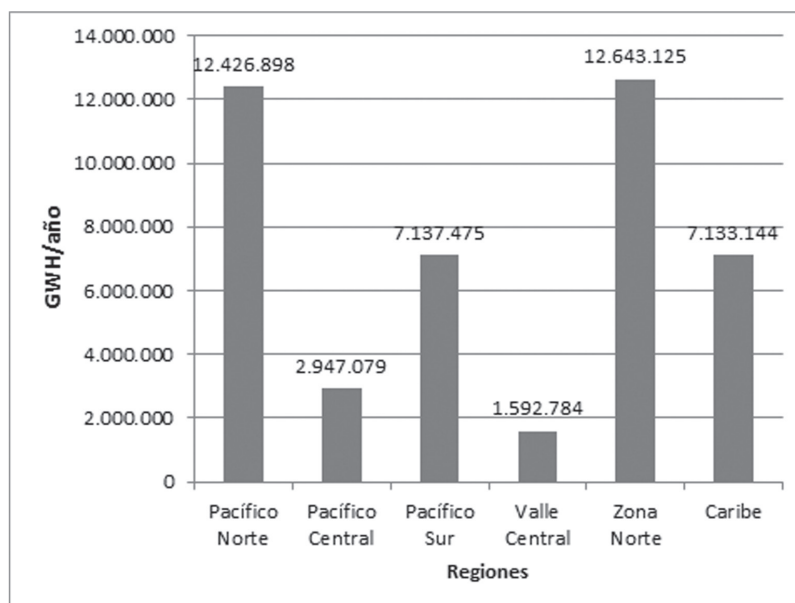
Fuente: Estudios Básicos de Ingeniería – UEN Pysa, 2013.

Como se señaló, el país fue dividido en seis regiones climáticas: Pacífico Norte, Pacífico Central, Pacífico Sur, Región Central (Valle Central), Región Norte y Región Caribe, obteniéndose promedios ponderados de radiación para estas seis regiones.

#### 4.3 Potencial Teórico.

La figura 101 muestra la variación regional del potencial solar teórico de Costa Rica, obtenida aplicando la ecuación (1).

Figura 101. Potencial teórico solar de Costa Rica por regiones.



Fuente: Elaboración propia

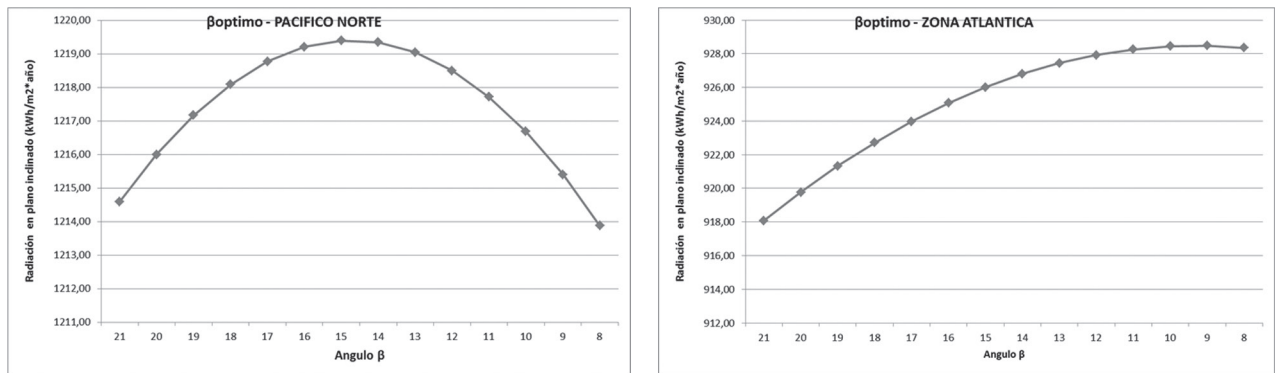
Como puede observarse de la figura 101, el mayor potencial teórico se tiene en la Zona Norte de Costa Rica, con 12 643 125 GWh/año. Sumando todos los valores, se obtiene el potencial teórico solar, que representa una energía anual de 43 880 504GWh/año. Con este valor, es posible estimar una potencia teórica aprovechable. Suponiendo que el cien por ciento de esta radiación se convierta en electricidad y con un factor de planta de 0,19, resulta una potencia teórica de 26 346 GW, o sea, 26 346 000 MW.

#### 4.4 Potencial técnico fotovoltaico

##### 4.4.1 Angulo $\beta$ optimo

La figura 102 muestra los resultados obtenidos para los ángulos de inclinación óptimos de los paneles fotovoltaicos para las regiones Pacífico Central y Zona Caribe, los cuales fueron usados para el cálculo de la generación solar fotovoltaica.

Figura 102. Ángulos óptimos para regiones Pacífico Norte y Caribe.



Fuente: Elaboración propia.

Como puede verse, el ángulo  $\beta$  óptimo para la zona Pacífico Norte, donde la radiación directa es mayor, resulta ser 15°, mientras que para la Zona Caribe, donde hay mayores niveles de radiación difusa, el ángulo  $\beta$  óptimo disminuye a 9°.

##### 4.4.2 Potencial técnico total acumulado

Acumulando los valores anuales obtenidos, es posible estimar el potencial total, tanto en potencia como en energía del país. El cuadro 26 resume los valores obtenidos:



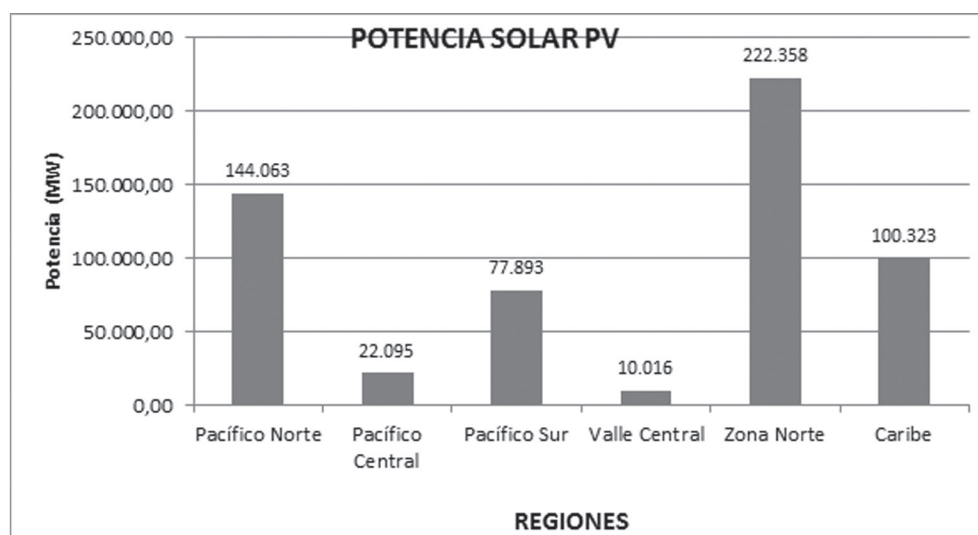
*Cuadro 26. Potenciales técnicos fotovoltaicos para diferentes regiones climáticas de Costa Rica.*

Región	Potencial técnico PV	
	Potencia (MW)	Energía anual (GWh/año)
Pacífico Norte	144 062	182 022
Pacífico Central	22 094	27 863
Pacífico Sur	77 892	91 653
Valle Central	10 016	12 163
Zona Norte	222 359	239 675
Caribe	100 324	102 819
Totales	576 747 MW	656 195GWh/año

Fuente: Elaboración propia.

Según puede verse en el cuadro 26, el potencial técnico fotovoltaico de Costa Rica al año 2014, presenta dos valores, 576 747 MW en potencia y 656 195GWh/año en términos de energía. La figura 103 muestra la variación espacial de la potencia.

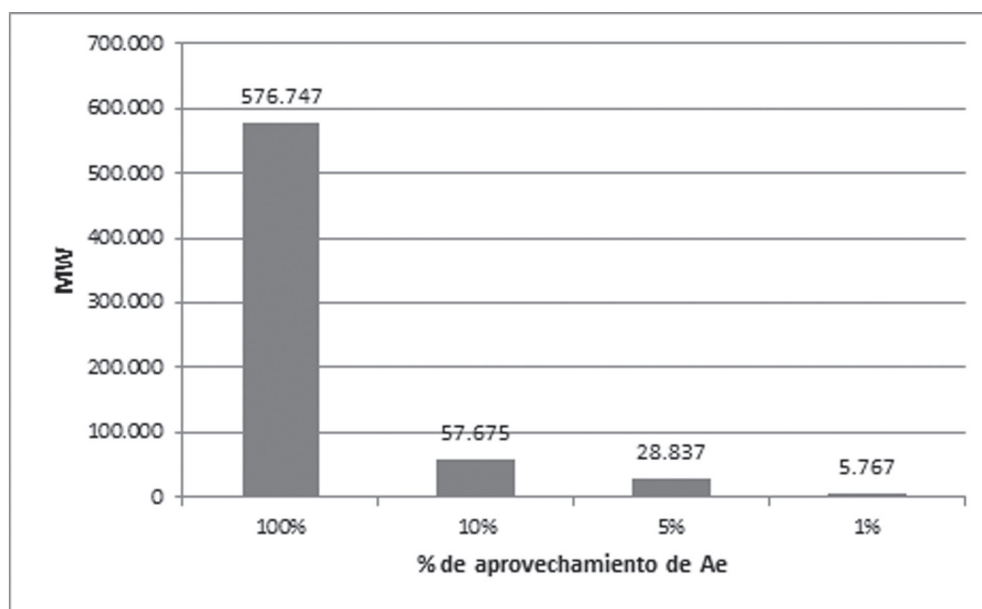
*Figura 103. Variación regional del potencial técnico.*



Fuente: Elaboración propia.

Este escenario supone que el 100% del área aprovechable Ae de Costa Rica es utilizada con proyectos PV, lo cual resultaría muy difícil de alcanzar, prácticamente imposible. Con el ánimo de presentar escenarios de aprovechamiento más conservadores y realistas, y entrando un poco en el plano de la especulación en cuanto al desarrollo y ordenamiento territorial costarricense, es necesario entonces suponer situaciones futuras en donde solamente una porción de ese territorio aprovechable se utiliza en proyectos de generación solar fotovoltaico. Es así como se presenta en la figura 104, el potencial técnico fotovoltaico para diferentes porcentajes de aprovechamiento del área Ae.

Figura 104. Potencia aprovechable para distintos porcentajes de aprovechamiento del Área Ae.



Fuente: Elaboración propia, 2014.

Como puede observarse, incluso suponiendo que apenas un 1% del área aprovechable en el país (área sin restricciones) pudiese utilizarse para generación fotovoltaica, se tendría un potencial técnico de 5 767 MW, más del doble de la capacidad instalada total actual.

A partir de la energía total disponible, 656 195 GWh/año, es posible estimar la población que podría abastecerse con esta cantidad de energía, para diferentes niveles de consumo per cápita supuestos. El cuadro 27 presenta los resultados obtenidos.

Cuadro 27. Población abastecida para distintos niveles de consumo

Consumo per cápita (kWh/persona*año)	Población abastecida (habitantes)
2 200	298 millones
4 000	164 millones
8 000	82 millones

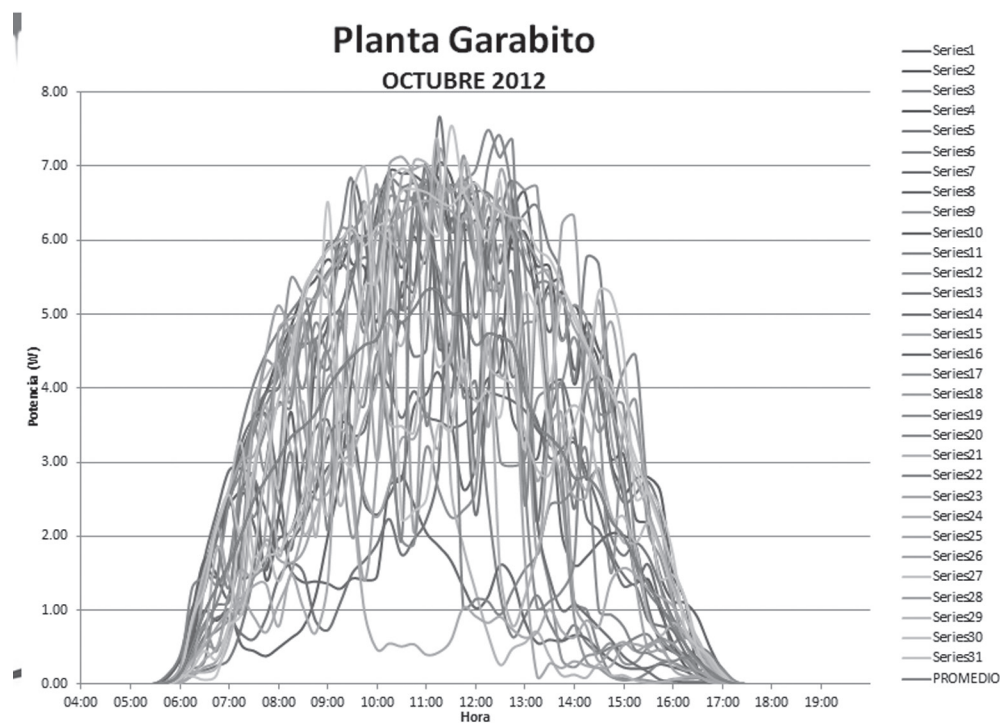
Como puede apreciarse del cuadro 27, para el nivel de consumo actual, 2 200 kWh/persona\*año, obtenido a partir de ICE (2014a), es posible, con la energía solar fotovoltaica disponible, abastecer a una población de 298 millones de personas. Esto da una clara idea del enorme potencial del que disponemos al aprovechar la energía solar. Pensando en la posibilidad de que se produzca un aumento en la demanda unitaria de electricidad en los próximos años, y que la misma llegara a 4000 kWh/persona\*año, nuestro potencial energético solar sería capaz de abastecer a 164 millones de habitantes. Finalmente, suponiendo niveles de consumo similares a los que presentan actualmente los países desarrollados (8 000 kWh/pers\*año), aun así, la energía solar fotovoltaica disponible sería capaz de abastecer a 82 millones de habitantes, 18 veces la población actual de Costa Rica.

#### 4.5 Variabilidad del recurso solar

A pesar de la existencia de un recurso solar sumamente abundante, debe considerarse la intermitencia de esta fuente. La abundancia de un recurso no implica necesariamente disponibilidad para su aprovechamiento. Los proyectos solares fotovoltaicos presentan factores de planta del orden de 0,20, lo que refleja el bajo nivel de aprovechamiento que se logra, debido a que no hay radiación solar durante la noche y además se presentan períodos nublados durante el día que reducen la producción fotovoltaica.

A manera de ejemplo, la siguiente figura (105) presenta la variación de la potencia a lo largo de cada día, para el mes de octubre, en la planta solar Garabito del ICE.

*Figura 105. Variación diaria de la potencia para el mes de octubre. Planta Garabito.*



Fuente: CENPE.ICE, 2013.

Como puede apreciarse, la variación de la potencia solar a lo largo del día es sumamente grande, pasándose de una potencia alta a más baja, lo que trae consecuencias importantes para el sistema. Esta condición, aunque lógicamente en menor grado, se presenta también en la temporada seca.

Esa pérdida repentina de potencia debe ser compensada por el sistema eléctrico de alguna manera. En la actualidad, la forma de suplir esta variabilidad en fuentes como las eólicas o solares es por medio de generación térmica. Otra forma sería con sobre-instalación de otras fuentes renovables que permitan suplir este tipo de reducciones, lo cual sin duda tendría también repercusiones en costo y en tarifas.

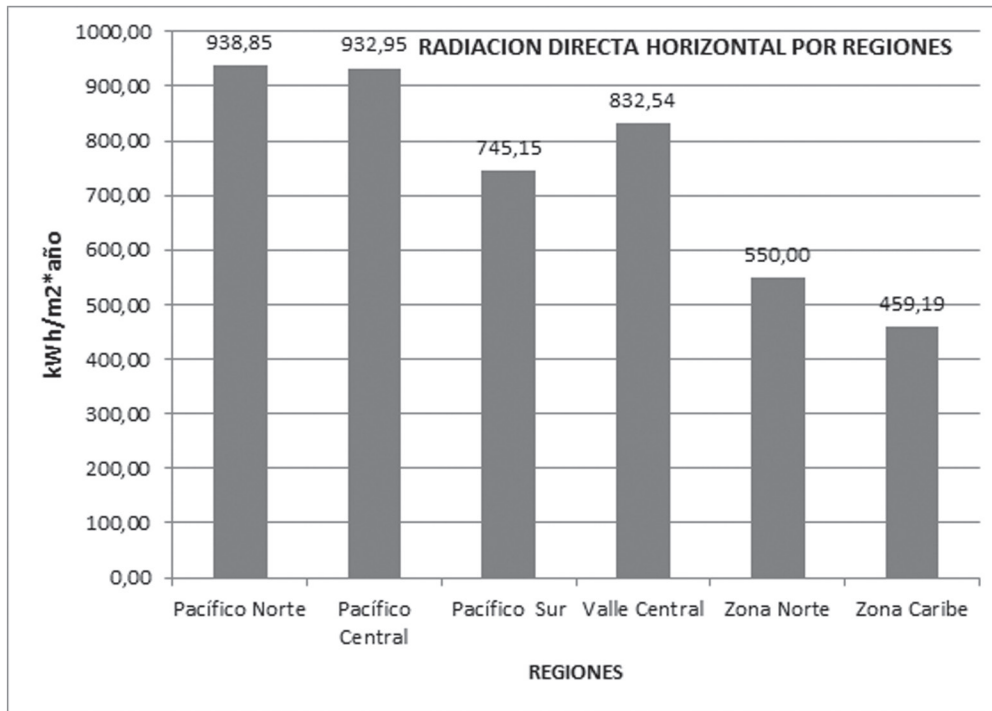
En resumen, hay que tener muy claro que contar como en nuestro caso con un recurso energético solar muy abundante, no nos garantiza que podamos utilizar de inmediato esta fuente de modo masi-

vo, ni dejar, al menos en el corto plazo, de desarrollar otro tipo de fuentes, como las hidroeléctricas, eólicas e incluso térmicas. Es de esperar eso sí, una penetración cada vez mayor de la fuente solar en nuestro sistema eléctrico, en la medida en que los costos y las mejoras tecnológicas lo permitan.

#### 4.6 Potencial técnico termo-eléctrico

Los valores de radiación directa promedio anual horizontal obtenidos en este estudio para las distintas regiones climáticas de nuestro país, pueden verse en la figura 106.

Figura 106. Radiación directa anual para cada región climática de Costa Rica.

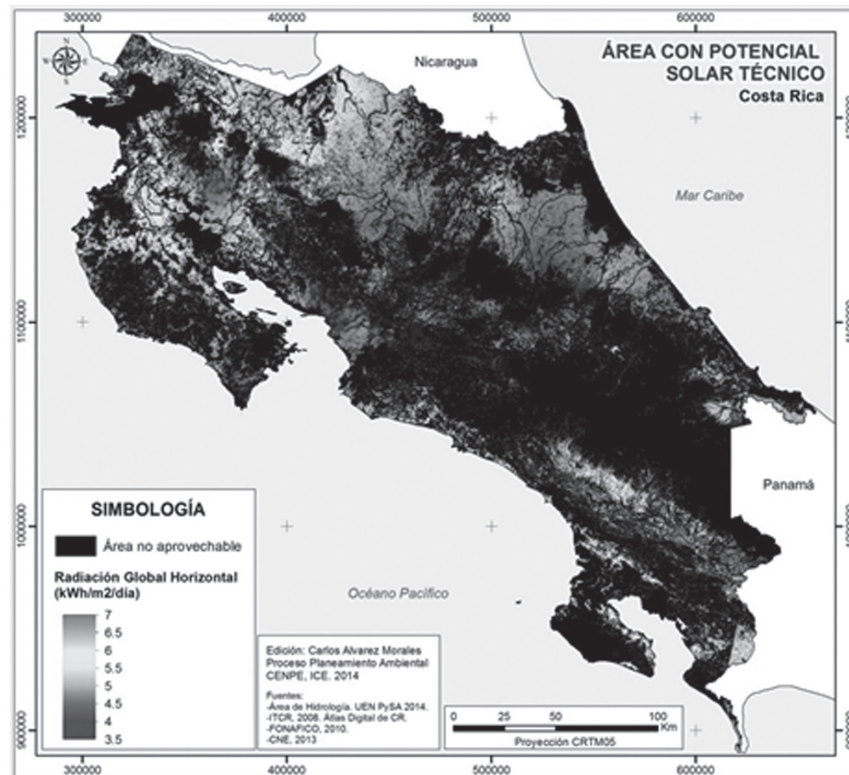


Como puede apreciarse, el nivel máximo de radiación directa anual obtenido fue de 938 kWh/m<sup>2</sup>\*año, para el Pacífico Norte, muy inferior al umbral mínimo de 1700 kWh/m<sup>2</sup>\*año requerido. Se consideró entonces que no es posible, con la información existente, desarrollar sistemas solares termoelectrónicos en Costa Rica y por lo consiguiente no se continuó con la determinación de los potenciales para los mismos.

#### 4.7 Priorización y selección de zonas

La figura 107 muestra la superposición entre el mapa de radiación solar anual y el de restricciones para el potencial técnico. Se pueden ver en color rojo las áreas con mayores niveles de radiación y que a su vez comprenden áreas sin restricciones. Puede decirse, en términos de estas dos variables, que esas son las mejores zonas para el desarrollo de energía solar fotovoltaica. El trabajo de priorización completo queda pendiente, y está planteado para una segunda etapa del estudio de potenciales.

Figura 107. Mejores zonas de Costa Rica para el desarrollo de proyectos Solares fotovoltaicos.



Fuente: Elaboración propia, 2014.

## V. Discusión

Hasta la fecha, existen varios estudios sobre radiación solar en Costa Rica. Sin embargo, ninguno de ellos profundiza en el tema de determinación de potenciales para generación eléctrica. En Wright, (2000), se presenta un buen detalle de los niveles de radiación para distintas regiones de nuestro país, sin embargo él análisis es muy escueto en el tema de determinación de potenciales eléctricos. El presente estudio por lo tanto, representa una investigación pionera en este campo, que se enfoca específicamente en la determinación de la potencia y la energía aprovechables en Costa Rica para desarrollos fotovoltaicos. Constituye una base investigativa que aporta en el conocimiento de las posibilidades actuales y futuras para la satisfacción de la demanda eléctrica nacional. Una base de conocimiento que puede y debe ser mejorada conforme cambien las condiciones de uso del suelo, el conocimiento de la radiación y los cambios en los parámetros tecnológicos.

Los resultados obtenidos reflejan un amplio potencial electro-energético con proyectos fotovoltaicos de gran escala en Costa Rica.

## VI. Conclusiones

Según este estudio un 23,5% del territorio nacional presenta potencial técnico fotovoltaico, con una energía aprovechable de 656 195GWh/año y una potencia de 576 747 MW. De acuerdo a esto, no hay duda de que el recurso electro-energético más abundante en nuestro país es la energía solar, muy por encima de los potenciales de otras fuentes renovables, como la energía hidroeléctrica, eólica, biomasa o marina.

Aunque este potencial resulta muy significativo, el resultado final debe ser manejado con reserva, por las características de intermitencia de la fuente solar y su bajo factor de planta. Hay que tener claro, en el aprovechamiento de recursos renovables, que abundancia no implica necesariamente disponibilidad. Factores de planta del orden de 0,20 dejan claro que aunque tengamos abundancia del recurso, su poca disponibilidad dificulta que sean consideradas como fuentes prioritarias dentro de un sistema eléctrico.

El tema del respaldo energético y el almacenamiento se convierten en un elemento fundamental para el desarrollo futuro de la energía solar para generación eléctrica. Se requiere de soporte, para los momentos cuando la fuente solar no opera o se reduce.

La determinación de potenciales solares para generación eléctrica no debe ser vista como una actividad concluida, sino como un proceso continuo. Esta investigación es un inicio, con limitaciones y simplificaciones que podrán ser mejoradas con el tiempo. Todo el espacio queda abierto a futuro, para el mejoramiento continuo en la determinación de los potenciales nacionales con energía solar de Costa Rica.

La energía solar, con las reservas y limitaciones que han sido detalladas en este estudio, se nos presenta con un amplio panorama a futuro, y que de continuar su evolución positiva, tecnológicamente y en costo, podría llegar a convertirse, a mediano plazo, en una fuente masiva para la satisfacción de la demanda eléctrica nacional y mundial.

## Referencias

FONAFIFO ( 2010). Mapas de cobertura forestal de Costa Rica. San José. Costa Rica.

Haberling, H. (2012). Photovoltaics System Design and Practice. United Kingdom. John Wiley and Sons Ltd.

ICE.2014.a Análisis comparativo de las variables relacionadas con el consumo de energía eléctrica en Costa Rica: 2012 – 2013. Proceso Tarifas de Electricidad. Dirección de planificación financiera- Gerencia de finanzas. San José. Costa Rica.

ICE. (2014). Plan de Expansión de la Generación 2014 – 2035. Centro Nacional de Planificación Eléctrica (CENPE). San José. Costa Rica.

ICE. (2013). Mapas de radiación solar para Costa Rica. C.S Estudios Básicos de Ingeniería. UEN Proyectos y Servicios Asociados (PySA). San José. Costa Rica.

Liu Y.H. y Jordan R. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. Solar Energy 4, 1-19.

NEWJEC Inc. (2011). Updated Basic Design Report. Proyecto Solar Miravalles. Osaka. Japan.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE. (2009). Determinación de áreas con potencial para la instalación de plantas de energía termoelectrica solar. Caso de estudio: III Región de Atacama. Facultad de Historia, Geografía y Ciencias Políticas. Instituto de Geografía. Santiago de Chile.

Wright, J. (2000). Estudio del Potencial Solar en Costa Rica. ICE. San José. C. Rica.



# Planta de generación eléctrica de 4 MW<sub>e</sub> utilizando biomasa como combustible, en la Zona Norte del país.

Ana Catalina Villalobos González<sup>30</sup>  
Gloriana Alvarado Ramírez

## Resumen

En la actualidad, uno de los mayores problemas que enfrenta la industria nacional, es la constante generación de residuos provenientes de sus procesos productivos. En muchas ocasiones estos materiales no poseen un uso definido, siendo generalmente almacenados a la intemperie, estos van generando líquidos que se filtran hacia el suelo y/o gases como el metano, que luego se incorporan a la atmósfera.

Esta situación origina un grave problema ambiental, lo que requiere de una búsqueda y propuesta de una solución técnico-ambiental, donde el objetivo principal es efectuar un estudio de pre factibilidad para una planta de generación eléctrica de 4 MW<sub>e</sub>, aprovechando residuos de aserradero en la zona norte del país.

Otros objetivos que se buscan, es eliminar los materiales generadores de contaminación, mediante su aprovechamiento energético; promover el uso de la biomasa como fuente alternativa en la generación eléctrica, y desarrollar capacidades a nivel institucional, para el planeamiento y construcción de plantas de generación de bioelectricidad.

La metodología utilizada contempló la evaluación del recurso a aprovechar mediante su caracterización química, física y energética, así como, el análisis del potencial másico y energética disponible para el residuo en cuestión. Posteriormente se seleccionó el proceso de conversión termoquímica o ruta tecnológica, para luego plantear los balances de materia y energía, para esto se utilizó el software Engineering Equation Solver (EES). Cada uno de estos datos orientó la construcción del modelo conceptual para la planta de generación, evaluando las diferentes opciones desde los puntos de vista técnico y económico.

Entre los resultados y conclusiones obtenidos, el principal de ellos radicó en la definición de la viabilidad del proyecto, encontrando que la planta de generación de 4 MW<sub>e</sub> con la utilización de residuos de aserradero en la Zona Norte del país, es viable desde el punto de vista técnico, sin embargo, con las tarifas vigentes al momento de la realización del estudio la planta no es viable económicamente. Palabras clave: biomasa, combustión, estudio de pre factibilidad, configuración energética.

## 4 MW<sub>e</sub> Power Plant from Biomass as Fuel in the Northern Zone of the Country

### Proposal Summary

Currently, one of the biggest problems industry sector faces is the constant generated waste derived from its production processes. In many cases these waste materials do not have a final use, so they

<sup>30</sup> Instituto Costarricense de Electricidad, Sabana Norte, correos electrónicos avillalobosG@ice.go.cr y galvarado@ice.go.cr

are usually stored outdoors, thereby generating liquids that seep into the soil and/or gases, such as methane, which are incorporated into the atmosphere.

This situation creates a serious environmental problem, so finding and proposing a technical and ecologic solution becomes the main reason of this work. Thus, the overall objective is to carry out a pre-feasibility study for a 4 MW<sub>e</sub> power plant, taking advantage of sawmills' biomass wastes in the northern part of the country.

Other objectives sought, are: i) eliminate residual materials and their pollution impact; ii) promote biomass as an alternative fuel in electricity generation and iii) gain expertise at an institutional level by planning and building bioelectricity generation plants.

The methodology is based on the assessment of the resource by its chemical, physical and energetic characterization, as well as the analysis of the wastes' mass and energy potential availability. The thermochemical conversion process or technological route was selected, and then the Engineering Equation Solver (EES) software was used to reach the material and energy balances. Each of these data guided the construction of the conceptual model for the power plant, after evaluating the different technical and economic perspectives.

Among the obtained results and conclusions, the main of them was the definition of the project's viability, the 4 MW<sub>e</sub> power plant, using sawmills' biomass wastes, was found technical feasible. However; with the prevailing electric rates at the time of the study, the plant was not economically viable.

**Keywords:** biomass, combustion, pre-feasibility study, energy configuration.

## I. Introducción

Actualmente, la electricidad sufre cerca de la quinta parte de las necesidades finales de energía en Costa Rica. En el 2011, el país consumió 164 000 terajulios (TJ), de los cuales el 19% fue cubierto con electricidad, el 55% se suplió mediante los combustibles fósiles, mientras que la biomasa residual proveniente de los procesos agroindustriales (bagazo y cascarilla del café), aportó un 15%. El restante 11% necesario para suplir la demanda final de energía, fue cubierto con leña, la cual corresponde a una fuente no comercial de energía (CENPE, 2014).

Ese 55% no renovable conlleva importantes implicaciones medioambientales y una fuerte dependencia del abastecimiento exterior de combustibles fósiles, razón por la cual, la búsqueda de alternativas que puedan sustituir parte de ese porcentaje es fundamental en nuestros días. Es así como se vuelve la mirada hacia la materia vegetal existente sobre la tierra, que constituye un importante recurso energético, cuya utilización racional puede reemplazar una parte sustancial de los combustibles fósiles que hoy utilizamos.

De modo general, los residuos se pueden clasificar en tres grandes grupos: agrarios, industriales y municipales o urbanos. Los primeros son los residuos generados como consecuencia del sector primario de la actividad humana, y que a su vez se pueden clasificar en agrícolas, forestales y ganaderos. Los segundos proceden de los residuos propios de la actividad industrial y los terceros están compuestos por los residuos que se producen en los núcleos de población debido a procesos de fabricación, transformación, utilización, consumo y limpieza que se dan en las ciudades. La mayor parte de estos residuos son orgánicos, conformando biomasa residual, por tanto suponen un enorme potencial para la producción de energía (Sebastián Nogués, F.; García-Galindo, D.; Rezeau, 2010).

Los materiales residuales provenientes de la actividad industrial en los aserraderos, constituyen una fuente potencial de energía en la mayor parte de las veces es desaprovechada. Los residuos de aserraderos, como astillas, aserrín y polvo de lijado, ocupan un lugar importante en la contabilidad energética de las industrias. Estos residuos requieren de un manejo adecuado y oportuno que evita que se conviertan en un foco de contaminación ambiental, reduciendo paralelamente el gasto excesivo en materia de disposición final de los mismos. Debido a esto, se hace necesario analizar la conveniencia de aprovechar energéticamente estos residuos, que comparándolo con el uso de combustibles fósiles, presenta ventajas claras y competitivas y entre ellas se pueden mencionar las siguientes:

- Bajo contenido en cenizas, escorias y azufre.
- Bajas emisiones de óxidos de azufre.
- No se produce emisiones de metales pesados ni hidrocarburos.
- El aprovechamiento energético de un residuo hace que está materia se convierta en un “recurso”.
- Puede considerarse un combustible neutro frente a las emisiones de CO<sub>2</sub>, pues su producción en la combustión se compensa con la fijación del mismo en el crecimiento vegetal.

Este documento presenta la evaluación a nivel de pre factibilidad para la construcción de una planta de generación eléctrica de 4 MW<sub>e</sub>, aprovechando los residuos producidos en un área determinada de la Zona Norte del país. Para ello, se tomó como referencia la empresa de aserrío, con mayor capacidad de producción del área. Esta empresa fue el punto focal del estudio y a partir de sus características particulares, se definió el tipo de combustible a utilizar, su logística y la adquisición de una mayor cantidad de biomasa en los alrededores a dicha empresa.

El estudio de pre factibilidad no contempló la evaluación del impacto ambiental del proyecto, el cual se recomienda realizarlo en la fase siguiente, que corresponde a la etapa de factibilidad.

## II. Metodología

El éxito de un proyecto depende en gran medida de su planeamiento. Al realizar un estudio de pre factibilidad, se deben tomar en cuenta los criterios convencionales para dar soporte a una rentabilidad económica razonable y por ende al estudio técnico que la generó. La viabilidad técnica debe acompañar siempre a la económica, siendo esto una de las previsiones de éxito para el producto final. Para ello, se deben definir todos aquellos factores técnicos y financieros necesarios para lograr el objetivo propuesto.

El estudio se basó en parámetros económicos-financieros, tal como el precio de venta de la energía generada, el precio de la biomasa, la modalidad de financiamiento, plazo de estudio del proyecto en años, el tipo de interés del crédito, amortizaciones, entre otros. A su vez, tomó en cuenta parámetros de naturaleza mixta (consideran criterios tanto técnicos como económicos), cómo lo son la selección de la tecnología y la correspondiente inversión que ello conlleva, el estilo de explotación de la planta, entre otros. Finalmente se deben mencionar los factores técnicos relacionados con la disponibilidad de biomasa anual, en términos de horas de funcionamiento real de la planta a pleno rendimiento.

### a. Estudio técnico

Este contempló los tópicos descritos a continuación:

- **Estudio de la materia prima:** se basó en la valoración de la disponibilidad de materia prima (biomasa) para la central termoeléctrica, su precio en el mercado, así como sus características químicas, físicas y energéticas.

- **Ubicación de la central termoeléctrica:** se definió el emplazamiento para la planta y se analizó la infraestructura eléctrica existente, así como las facilidades que la distribuidora eléctrica de la zona ofrece para la colocación de la energía en la red.
- **Proceso de conversión:** con base en la caracterización de la biomasa, se seleccionó el proceso de conversión o ruta termoquímica a aplicar en la planta.
- **Modelo conceptual:** se analizaron tres tipos de configuraciones energéticas, bajo las cuales se analizaron veintidós diferentes escenarios, entre las que se encontraron las centrales térmicas y el caso específico de la planta de 4 MW<sub>e</sub>.

Mediante el software Engineering Equation Solver (EES), se efectuaron los balances de masa y energía, requeridos para el cálculo de las variables de proceso y los flujos de masa y energía.

La selección del modelo conceptual se efectuó considerando criterios técnicos de selección predefinidos y en el análisis económico respectivo. Variables fundamentales para la toma de decisiones, fueron el aseguramiento de la biomasa requerida y el porcentaje de la misma que debería adquirirse en la zona.

### *b. Estudio económico*

En este estudio se consideró un modelo económico que contempló el cálculo de la inversión, los flujos de caja, y los indicadores económicos (VAN, TIR). A continuación se detalla se presenta mayor detalle de lo anterior:

- **Consideraciones previas:** definición del tipo de tarifa vigente a la fecha de ejecución del estudio de pre factibilidad, así como su valor monetario.
- **Modelo económico:** determinación de todas aquellas condiciones y supuestos que apoyan el análisis de cada caso.
- **Análisis de la inversión:** para la viabilidad económica del proyecto, se calcularon los índices de rentabilidad e incluyó un comparativo de las mismas:
- **Valor Actual Neto (VAN):** consiste en actualizar a valor presente los flujos de caja futuros que va a generar el proyecto, descontados a un cierto tipo de interés (tasa de descuento), y compararlos con la inversión inicial del proyecto.

Si  $VAN > 0$ : el proyecto es rentable y  
Si  $VAN < 0$ : el proyecto no es rentable.

- **Tasa Interna de Retorno (TIR):** se define como la tasa de descuento o tipo de interés que iguala el VAN a cero.

Si  $TIR >$  tasa de descuento ( $r$ ): el proyecto es aceptable.  
Si  $TIR <$  tasa de descuento ( $r$ ): el proyecto no es aceptable.

## III. Resultados

### *a. Estudio Técnico*

**Tipo de materia prima y su caracterización:** debido a que la especie G- Melina es la de mayor participación en los procesos industriales de la Zona Norte (50% de la madera procesada), se consideró que las características de la biomasa a utilizar provendrían de esta especie maderable.

Esta biomasa se encontró en distintos formatos: astillas, aserrín y polvo por lo que los porcentajes de humedad y poder calórico inferior (PCI), se determinaron en función de su fuente de origen. Es así como se definió una biomasa “tipo equivalente”, para poder efectuar los balances de masa y energía y posteriormente seleccionar la tecnología. Como características principales de esta biomasa, se definió un %H(base húmeda) de 44% y un poder calórico inferior igual de 9400 kJ/kg(Villalobos González & Alvarado Ramírez, 2013).

**Disponibilidad de combustible:** uno de los parámetros de mayor incidencia en la rentabilidad económica del proyecto, es la disponibilidad a largo plazo de la cantidad de biomasa (toneladas/año) requerida por la central termoeléctrica. Diferentes esquemas se podrían plantear para garantizar este suministro, sin embargo, uno de los más utilizados son los acuerdos con empresas de logística de biomasa, o en este caso particular, acuerdos con agricultores o aserraderos de la zona.

La empresa que se tomó como referencia en este estudio posee una producción anual de residuos de 20 000 toneladas aproximadamente y cuenta con un aproximado de 160 000 toneladas de material almacenado en pilas sobre extensos terrenos. (Villalobos González & Alvarado Ramírez, 2013). Por otra parte, FONAFIFO indica que existen 41 aserraderos activos en la zona de estudio, procesando cerca de una cuarta parte de la madera consumida en el país. De esta, alrededor del 80 %, proviene de plantaciones forestales, siendo la G. Melina, la que se presenta en mayor porcentaje, seguida del laurel, la teca y otras especies propias de la región (MINAET & FONAFIFO, 2012).

Estos aserraderos operan en promedio, 51 semanas al año y presentan un rendimiento promedio de producción de la madera en troza del 57%, por tanto, un 43% de la madera se convierte en residuos. La mayoría de las empresas de aserrío, indican una mayor producción en los meses de diciembre a junio, estimándose que se pueden generar entre 70650 toneladas y 86350 toneladas anuales de residuos en la zona, con un promedio de 78500 toneladas de residuos de aserradero por año (MINAET & FONAFIFO, 2012).

**Precio de mercado de la biomasa:** en Costa Rica aún no se establece un mercado formal para la biomasa, lo que genera gran incertidumbre al momento de definir el precio de la misma; ya que este parámetro incide directamente sobre los costos de explotación de una central termoeléctrica. Esto, unido al hecho de que muchas empresas dueñas de la biomasa podrían tomar la decisión de desviar sus ventas a “mercados más atractivos” que los ofrecidos por la planta de generación, representa un alto riesgo para el proyecto.

De acuerdo a un estudio de mercado preliminar efectuado en el 2012 por el ICE, se determinó que el precio de compra para la biomasa podría ser de US \$10,5/tonelada (Villalobos González & Alvarado Ramírez, 2013).

Ubicación de la planta de generación: debido a que este estudio se efectuó bajo el marco de evaluación de diferentes soluciones tecnológicas para el aprovechamiento del residuo generado por una empresa particular, el emplazamiento físico de la planta se ubicó en un área dentro de la propiedad de dicha empresa.

Para la Zona Norte del país, la compañía distribuidora de electricidad es COOPELESCA.

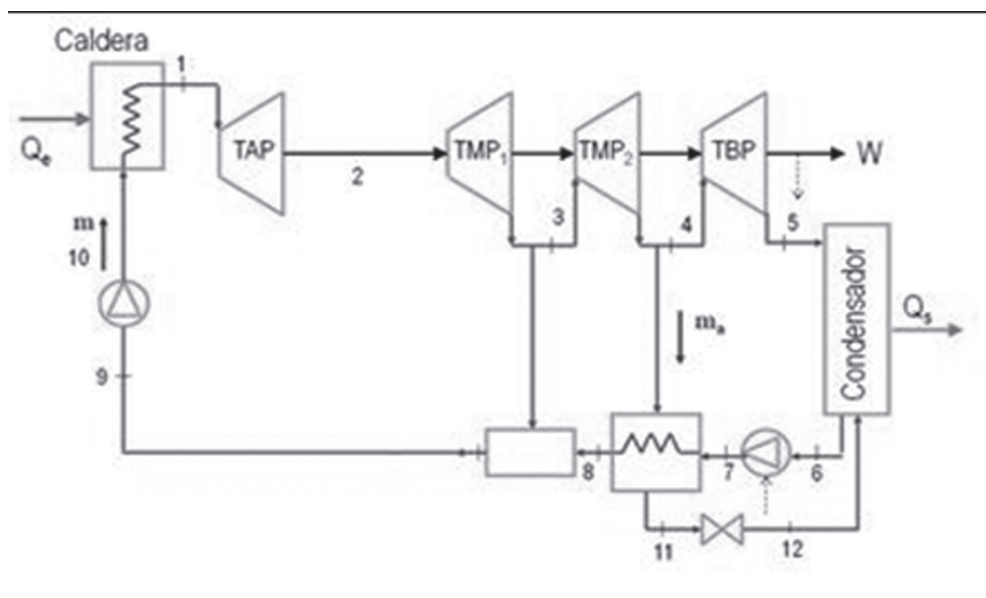
**Proceso de conversión:** Existen diferentes tecnologías que pueden ser aplicadas para el aprovechamiento de la biomasa, sin embargo para este caso específico, la ruta tecnológica seleccionada fue la combustión. Esta tecnología es madura y está disponible a nivel comercial, existiendo soporte técnico comprobado para el usuario.

Uno de los equipos que poseen mayor peso específico en la inversión inicial, es la caldera y sus elementos auxiliares. Esto se debe a que el equipo debe ser capaz de manejar y responder adecuadamente ante la biomasa a utilizar. En otras palabras, toda la influencia de la biomasa como combustible y posteriormente como cenizas, incide directamente sobre la disponibilidad global de la planta, en términos de horas de funcionamiento anual.

### b. Modelo conceptual

Se examinaron diferentes alternativas para la utilización energética de la biomasa. Estas se basaron en ciclos de vapor y en la posible instalación de calentadores cerrados de alta o baja presión. La opción seleccionada fue el ciclo de vapor con desgasificador y un calentador cerrado de baja presión (figura 108). Para lo anterior, se efectuaron los balances de materia y energía, utilizando el software Engineering Equation Solver (EES).

Figura 108. Esquema del ciclo de vapor de la central termoeléctrica con un calentador cerrado de baja presión.



Fuente: Esquema obtenido del Engineering Equation Solver (EES)

- Donde,
- m: Flujo másico de agua de retorno a la caldera
  - $m_a$ : Flujo másico de vapor hacia el calentador
  - $Q_e$ : Calor de entrada
  - $Q_s$ : Calor de salida
  - TAP: Turbina de alta presión
  - TBP: Turbina de baja presión
  - TMP: Turbina de media presión
  - W: Trabajo entregado por el arreglo de turbinas

De acuerdo a este modelo, la planta requerirá un aproximado de 47 785 toneladas de biomasa (cuadro 28)



Cuadro 28. Principales datos de la central termoeléctrica de 4MW<sub>e</sub>

Concepto	Unidades	Central termoeléctrica
Potencia eléctrica	kW	4000
Tiempo funcionamiento	h/año	7 350
Autoconsumos (incluye pérdidas transformador)	%	11
Presión del vapor vivo a la salida de la caldera	bar	80
Temperatura del vapor a la salida de la caldera	°C	480
Rendimiento isoentrópico (TAP y TBP)	%	70
Rendimiento isoentrópico (TMP1 y TMP2)	%	80
Rendimiento caldera	%	90
Nº calentadores de baja	u	1

Donde:

TAP: turbina de alta presión

TBP: turbina de baja presión

TMP1: turbina de media presión 1

TMP2: turbina de media presión 2

Fuente: Elaboración propia

### b. Estudio económico

**Consideraciones previas:** en este caso, se asumió una tarifa equivalente a la otorgada a las plantas de generación eléctrica con bagazo de caña. En el momento del estudio fue de 9,3 c\$/kWh.

**Modelo económico:** La estimación de los costos de inversión fue parte medular del estudio a nivel de pre-factibilidad. En estos se contempló la adquisición e instalación de los equipos, las obras civiles que se requieran en la planta, operación, mantenimiento anual y los costos de la materia prima requerida por la central.

El análisis realizado, incluyó un comparativo de las rentabilidades que se obtienen para la alternativa de central termoeléctrica estudiada. Para los respectivos análisis se tomó en cuenta:

- El comportamiento de la inflación
- Costos de la venta y compra de energía eléctrica
- Factor de planta, para el caso propuesto.
- Pago de impuesto de renta, valorando una depreciación de los equipos a 10 años.
- Posibilidad de financiamiento.

Aunado a lo anterior, se debe contemplar que un incremento en la demanda de biomasa en la zona, podría generar una especulación que conlleve un incremento adicional en el costo de adquisición de dicho insumo. Dado el impacto que este desfase representa para el rendimiento financiero del proyecto, se consideraron los siguientes supuestos:

- La inflación para el precio de “venta” de la electricidad, producto generado por las plantas, es del 3% anual.
- La inflación para el precio de “compra” de la biomasa, materia prima necesaria para el funcionamiento de las plantas, es del 5% anual (cuadro 29).

Cuadro 29. Datos para el modelo económico

Concepto	Unidades	Central termoeléctrica
Poder calórico inferior	kJ/kg	9 400
Residuos de aserradero en MCC	Toneladas/ año	20 000
Residuos de aserradero en la zona	Toneladas/ año	78 500
Potencia a instalar	MWe	4
Energía generada a partir de la biomasa	GJ/año	445 802
Requerimiento de biomasa equivalente	Toneladas/ año	47785
Horas de funcionamiento de la planta	Por año	7 350
Horizonte temporal para el estudio	años	20
Tasa de descuento	%	17,6 (considerando 12% de exigencia a capital propio y 5% de inflación)
Periodo de depreciación para los equipos	años	10
Período de amortización	años	10
Tasa de interés en banca privada (sector industrial) anual	%	8
Inversión inicial	millones USD \$	16,96
Solo se considera una fuente de financiamiento		
No se considera ningún período de gracia		

Fuente: Elaboración propia

## IV. Discusión

De acuerdo al modelo conceptual, la central térmica es viable técnicamente, (ver Tabla 1), sin embargo, el requerimiento de biomasa es bastante alto, por lo que habría que asegurar la adquisición de alrededor de 30 000 t/año para que la central cumpla con su factor de planta y el costo relacionado a esa adquisición.

La instalación evaluada, posee en su configuración un calentador cerrado de baja presión, por lo que éste aumentó el costo de instalación.

La inversión en el año cero sería de 16,97 Millones USD \$, para una inversión específica de 4 243 USD \$/kWe instalado (cuadro 30).

Cuadro 30. Principales parámetros técnicos y económicos para la central termoeléctrica de 4 MWe

Parámetro	Unidades	Central termoeléctrica
Viabilidad técnica		Sí
Potencia eléctrica (We)	(kW)	4 000
Costo total central térmica	(Millones USD \$)	16,97
Inversión específica	(\$/kWe)	4 243

Fuente: Elaboración propia

El cuadro 31 se muestra los indicadores financieros para esta propuesta, mismos que fueron valorados en cuatro escenarios: financiamiento propio y externo, evaluado a moneda corriente y constante.

*Cuadro 31. Parámetros financieros para la central termoeléctrica*

Indicador financiero	100% Capital propio		70% con financiamiento externo	
	Moneda corriente	Moneda constante	Moneda corriente	Moneda constante
VAN (\$)	-5 402 887	-2 974 937	-934 459	-426 688
TIR (%)	11,0	8,90	15,1	11,1

Fuente: Elaboración propia

Para el escenario a moneda constante, los proyectos no son rentables, ni siquiera siendo financiados. Se observa que el valor del VAN es negativo y el de la TIR no supera la tasa de descuento del 17,6 %. Al analizar el proyecto, tomando en cuenta la inflación, los valores del VAN aún son más negativos y valores de las TIR mucho más alejados a la tasa de descuento.

Se obtuvo el valor de la tarifa eléctrica de equilibrio: tarifa a la cual el proyecto comienza a ser rentable (el VAN se iguala a cero). Esta tiene un valor de 9,95 c\$/kWh, para el caso de utilizar un apalancamiento de 70% de financiamiento externo, analizando el caso con moneda corriente.

## V. Conclusiones y recomendaciones

La central térmica es viable técnicamente, sin embargo, se debe de verificar la disponibilidad de biomasa en la zona, de tal forma que se asegure el abastecimiento.

El precio de la biomasa es un factor que afecta negativamente los resultados económicos, por lo que se recomienda afinar el dato, mediante un estudio de mercado de biomasa más amplio, en la zona de interés.

Los costos obtenidos para esta central termoeléctrica, son altos, por lo que para ocasiones futuras o en su caso para un re análisis de esta alternativa; se recomendó la búsqueda de opciones de financiamiento.

Para el escenario a moneda constante, el proyecto no es rentable, ni siquiera siendo financiados. Se observa que el valor del VAN es negativo y el de la TIR no supera la tasa de descuento correspondiente.

Al analizar el proyecto, tomando en cuenta la inflación, los indicadores reflejan que no son rentables. Los valores del VAN son más negativos y los valores de las TIR no cumplen con la tasa de descuento correspondiente.

El valor de la tarifa eléctrica de equilibrio a la cual el proyecto comienza a ser rentable corresponde a 9,95 c\$/kWh.

No se recomienda que el caso de central térmica, avance hacia la fase de factibilidad, hasta no disponer de una tarifa eléctrica que haga viable económicamente la instalación del proyecto.

## VI. Nomenclatura

CO <sub>2</sub> :	dióxido de carbono
c\$/kWh:	centavos de dólar por kilovatio - hora
%H:	porcentaje de humedad de la biomasa
kJ/kg:	kilojulio por kilogramo
m:	Flujo másico de agua de retorno a la caldera
ma:	Flujo másico de vapor hacia el calentador
Q <sub>e</sub> :	Calor de entrada
Q <sub>s</sub> :	Calor de salida
MWe:	megavatios eléctricos
PCI:	poder calórico inferior, kJ/kg
r:	tasa de descuento
TBP:	turbina de baja presión
TAP:	turbina de alta presión
TIR:	tasa interna de retorno
TJ:	terajulios
TMP:	Turbina de media presión
VAN:	valor actual neto
W:	Trabajo entregado por el arreglo de turbinas
\$/kW <sub>e</sub> :	dólares por kilovatio eléctrico

## Referencias

CENPE. (2014). Plan de Expansión de la Generación Eléctrica, Periodo 2014-2015. San José, Costa Rica.  
MINAET & FONAFIFO. (2012). Diagnóstico de las existencias de los residuos forestales en la Región Huetar Norte de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Sebastián Nogués, F.; García-Galindo, D.; Rezeau, A. (2010). Energía de la biomasa (volumen I). Zaragoza, España: Pressas Universitarias de Zaragoza.

Villalobos González, A. C., & Alvarado Ramírez, G. (2013). Estudio de pre factibilidad para una planta de cogeneración en la Empresa Maderas Cultivadas de Costa Rica S.

Sebastián Nogués, F; García-Galindo, D y Rezeau, A. (2010). Energía de la biomasa (Volumen II). Zaragoza: Pressas Universitarias de Zaragoza, p. 7-26.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). Biomasa: Producción eléctrica y cogeneración. Madrid: IDAE, BESEL S.A. 2007, p. 13-15, 25-40.

P. Quaak, H. Knoef, y H. Stassen. Energy from Biomass. A Review of Combustion and Gasification Technologies. (1999). World Bank Technical Paper No. 422, Energy Series. Washington, D.C: The World Bank, p. 2-5, 7-12, 20-25, 45-49, 63-66, 71-74.

Van Loo, S y Koppejan, J. (2008). The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing. 2008. Earthscan: London, UK., p. 7-13, 135-147, 177-189.

# Energías Renovables en Argentina: Oportunidades y desafíos

Gonzalo Saráchaga<sup>31</sup>

## Resumen

En el presente trabajo analizaremos que incidencia tienen las energías renovables en la matriz energética actual de Argentina, las oportunidades y ventajas comparativas que ofrece su desarrollo en las distintas regiones del país, y que desafíos y metas deben cumplirse a fin de lograr su eficaz implementación. Argentina ha sufrido en los recientes años un déficit energético, que derivo en la necesidad de importar ingentes cantidades de combustibles de origen fósil, comprometiendo no solo significativas sumas de dinero sino también viendo mermada, en buena medida, sus posibilidades de crecimiento. Ante este panorama, teniendo presente que la geografía del país permite el adecuado desarrollo de diferentes tipos de energías renovables (entre otras, la eólica, solar, hidráulica, biomasa, biodiesel, etc.), esta temática resulta de insoslayable importancia e impostergable tratamiento. En este sentido, se analizara cual es el marco normativo actual que regula la actividad y que proyectos de reforma existen en tratamiento. Asimismo, se investigara en qué medida el reemplazo progresivo de las formas de generación de energía de origen fósil o no renovable por energías limpias o renovables, inciden en la preservación del medio ambiente, a fin de velar por el cumplimiento del derecho a un ambiente sano, equilibrado, apto para el desarrollo de las generaciones presentes y las futuras, receptado en el art. 41 de la Constitución Nacional. Objetivos: Alcanzar resultados de índole practica que contribuyan al estudio de la problemática. Metodología: El método que utilizaremos es el inductivo en combinación con el analítico.

**Palabras clave:** Energía – Argentina - desarrollo sostenible - recursos naturales – medio ambiente-

Renewable Energy in Argentina: Opportunities and Challenges

## Abstract

In this essay we will analyze what impact have the renewable energy in current Argentinian energy matrix, opportunities and comparative advantages of its development in different regions of the country , and challenges and goals must be met in order to ensure its effective implementation . Argentina has suffered in recent years an energy deficit, because of that, it needed to import large quantities of fossil fuels, spending large quantities of money and also reducing its growing expectation. Considering that the country's geography allows the development of different types of renewable energy (including, wind, solar, biomass, biodiesel, etc.), This topic is of undeniable importance and urgent treatment. We will analyze the current regulatory framework governing the activity and the law reform projects. Otherwise, we will discuss in what way the progressive replacement of fossil fuels by renewable energy will improve the environment, in order to enforce the right to a healthy

---

31 Lawyer, Faculty of Legal and Social Sciences (FCJyS) La Plata University (UNLP); Magister in Procedural Law, UNLP (in course); Specialist in Environmental Law, UNLP (thesis in course); Professor of the seminar "*Panorama jurídico Ambiental Nacional y Provincial*" (FCJyS; UNLP); member of the Environmental Law Institute, La Plata Bar Association.

Abogado, Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales (FCJyS) Universidad Nacional de La Plata (UNLP); Maestría en Derecho Procesal, UNLP (en curso); Especialista en Derecho Ambiental, UNLP (elaboración de tesis en curso); Profesor del seminario "*Panorama Jurídico Ambiental, Nacional y Provincial*" (FCJyS, UNLP); miembro del Instituto de Derecho Ambiental, Colegio de Abogados de La Plata.

Correo:Gonzalo.sarachaga@yahoo.com.ar; Linkedln:<http://ar.linkedin.com/pub/gonzalo-sarachaga/61/636/23a>

environment, suitable for the development of present and future generations, regulated in Article 41 of the National Constitution. **Objectives:** To achieve goals in order to contribute to the study of the problem. **Methodology:** The method we will use is the inductive in combination with the analytical. **Keywords: Energy - Argentina - sustainable development - natural resources - environment**

## I. Introducción

A través de su historia, el ser humano ha ido creciendo en dependencia energética. Hoy en día es inimaginable la vida sin provisión de energía. Iluminación, calefacción, refrigeración, cocción de alimentos, transporte, comunicación, cada pequeña parte de nuestro mundo cotidiano está ligado a la energía.

La energía puede clasificarse según la forma en que es obtenida, en energía renovable o alternativa, y energía no renovable o convencional. La energía convencional o no renovable proviene de fuentes que se agotan, como el uranio, gas de yacimientos, carbón y petróleo. A medida que la población mundial crece a pasos agigantados (no así los recursos) se abre el interrogante de cómo sostener con las fuentes de energía convencionales (no renovables) todas las actividades que desarrolla la sociedad diariamente que están relacionadas con la utilización de energía. Además de la finitud que presentan, es importante tener en cuenta el factor nocivo al medio ambiente que estas traen aparejada, tanto las producidas con energía fósil (petróleo, gas natural, carbón) como con energía nuclear.

En este contexto, es dable señalar que la Argentina viene sufriendo en los últimos años una crisis energética muy importante de origen multicausal, que le ha demandado el gasto de miles de millones de dólares en importación de energía para satisfacer así el consumo doméstico, en tanto los precios locales, regulados, no guardaron relación alguna con los costos de producción y distribución y aún menos con el costo de las importaciones. Las tarifas de electricidad y gas fueron congeladas. La exportación de petróleo crudo debió pagar un derecho móvil que mantuvo el precio interno en un valor fijo, siempre muy por debajo del precio internacional. Mientras el país tuvo saldos exportables esta política aportó recursos al fisco, pero los precios en boca de pozo quedaron rezagados, lo que desalentó la exploración y la producción (ídem con el gas). Derivado de estas circunstancias, las inversiones no llegaron y se dirigieron hacia países que si reconocían precios a los del mercado internacional o que guardaban relación con estos últimos.

Ante este panorama, y considerando que las estimaciones indican que las reservas de petróleo y gas en yacimientos no convencionales (shale oil y shale gas) ubican a Argentina en el tercer lugar en el mundo, todas las esperanzas y expectativas parecieran estar puestas en que este tipo de fuentes de energía, y en particular, en el yacimiento no convencional "Vaca Muerta", se conviertan no solo en la garantía del autoabastecimiento energético sino también en un motor que impulse la economía del país. En este punto, resulta conducente recordar que la variable ambiental no debe soslayarse a la hora de pensar y diseñar la matriz energética de un país. Se ha dicho que el problema reviste un carácter **tridimensional** conformado por la energía, el ambiente y la economía.

Mientras se supone fácil analizar el equilibrio e intercambios entre la energía y el ambiente, o entre la energía y las economías (incluyendo aspectos sociales) como análisis bidimensionales, el problema / se sigue sosteniendo/ involucra los tres componentes y debería ser tratado de esa manera. (Clabot y Pigretti, 2011, P. 26.)

Por lo expuesto surge el interrogante si la necesidad energética no podría reencauzarse haciendo uso de las fuentes de energía renovables, como ser la energía solar, la energía eólica, la energía producida por la atracción gravitatoria de la luna (energía mareomotriz), la biomasa, la energía de la tierra (energía geotérmica), entre otras, que por contraposición a las convencionales y no convencionales, no se agotan con el tiempo y presentan una menor nocividad al medio ambiente, y Argentina cuenta con condiciones geográficas óptimas para el desarrollo de varias de ellas.



## II. Ventajas comparativas de las energías renovables frente a las fuentes no renovables de origen fósil. Contribución a mitigar el cambio climático.

Se emplea el uso “energías renovables” a todas aquellas formas de energía producidas de fuentes renovables de una manera sustentable (IRENA, 2009). Se obtienen de fuentes naturales virtualmente inagotables, unas por la inmensa cantidad de energía que contienen, y otras porque son capaces de regenerarse por medios naturales.

Como dijéramos, una de las principales variables a tener en cuenta al momento de pensar en la matriz energética es la Ambiental. En esta inteligencia, las Energías Renovables presentan diversos beneficios respecto a las fuentes de energía de origen fósil, a saber:

1. Las Energías Renovables, no emiten gases contaminantes como los resultantes de la combustión de combustibles fósiles, responsables del calentamiento global del planeta (CO<sub>2</sub>) y de la lluvia ácida (SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>) y la no generación de residuos peligrosos de difícil tratamiento y que suponen durante generaciones una amenaza para el medio ambiente como los residuos radiactivos relacionados con el uso de la energía nuclear.
2. Son inagotables, mientras que Los combustibles fósiles son finitos
3. Son autóctonas, mientras que las energías no renovables se encuentran en una determinada cantidad de países, no todos.
4. Conforme el punto anterior, la utilización de las energías *Limpias*, o renovables, evitan la dependencia exterior, a importar energía.

Entre las desventajas, se señala la diversidad geográfica, es decir la disponibilidad de las fuentes de energía varía según los países y regiones; la irregularidad en la fuente de alimentación y el alto coste de almacenamiento de la energía; inconvenientes relacionado con la transformación y distribución en las redes; y la contaminación visual del paisaje.

### *Contribución a mitigar el cambio climático.*

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (ONU, 1992) Aprobado en Argentina por ley 24295 (Sancionada el 07/12/1993 y publicada en el Boletín Oficial del 11/01/1994) dispone en su art. 2 que “Por “cambio climático” se entiende un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparable”. (p.3)

Asociado al cambio climático, el **calentamiento global** es el aumento registrado en las temperaturas atmosféricas medias de todo el planeta durante los últimos años.

El fenómeno ha sido provocado por la intensificación del efecto invernadero. El efecto invernadero, por su parte, es el fenómeno de apantallamiento térmico producido de forma natural por la atmósfera. Los Gases de Efecto Invernadero (GEI) atrapan parte de la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre hacia el espacio. El desbalance térmico entre la radiación que nuestro planeta recibe y la que emite, permite que existan condiciones propicias para la vida en la Tierra. De no existir la atmósfera, el planeta experimentaría bruscas fluctuaciones climáticas, entre 80 °C de día y -130 °C en las noches. La temperatura media sería de -18 °C en vez de los actuales 15 °C. También se conoce que la atmósfera es más permeable a la radiación solar incidente que a la infrarroja emitida por la tierra, de manera que puede atrapar calor.

En esta inteligencia, el aporte que tendría tanto el **uso racional y eficiente de la energía** como la sustitución de combustibles fósiles por **Energías Renovables** en la mitigación del cambio climático es más que importante, convirtiéndolas en una de las mejores e inmediatas alternativas para reducir emisiones GEI en el sistema energético mundial (Fundación Vida Silvestre Argentina, 2013). En efecto, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) público, ya en el año 2011 un informe especial sobre fuentes de energía renovable y mitigación del cambio climático, evaluando los aspectos científicos, tecnológicos, ambientales, económicos y sociales de la contribución de seis fuentes de energía renovable (bioenergía, energía solar directa, energía geotérmica, hidroenergía, energía del océano y energía eólica) a la mitigación del cambio climático. Conforme el organismo citado, las energías renovables presentaron en el 2008 el 12.9% de la provisión de energía primaria a nivel mundial (biomasa 10.2%, hidroenergía 2.3%, energía eólica 0.2%, energía solar directa 0.1%, energía geotérmica 0.1%, y energía del océano 0.002%) en tanto que la energía nuclear llegó al 2.0% y los combustibles fósiles el 85.1% (petróleo 34.6%, carbón 28.4% y gas 22.1%). Como parte del estudio realizado, el IPCC analizó 164 escenarios globales provenientes de 16 modelos integrados a gran escala, los cuales indican que el crecimiento del uso de energías renovables será generalizado alrededor del mundo. Y en un esquema en el cual ninguna fuente sería la predominante, no obstante, se prevé que la energía de la biomasa, la energía eólica y la energía solar directa constituyan la mayor contribución de tecnologías de energías renovables en el sistema energético hacia el 2050. Advirtió asimismo que si la implementación de las energías renovables es limitada, los costos de mitigación de GEI se incrementarían y no se lograría estabilizar los GEI en concentraciones bajas (IPCC, 2011).

Más cercano en el tiempo, el IPCC se encuentra trabajando en el quinto informe de Evaluación (AR5) el cual está planificado en cuatro partes, difundándose a partir del 2013: La primera parte, **bases de la ciencia física**, publicada en septiembre de 2013, reafirmó que el cambio climático está ocurriendo, está causado por las actividades humanas y se está acelerando rápidamente. Esto en buena medida contrasta con la postura sostenida por muchos sectores que, pese a la abrumadora evidencia científica que muestra lo contrario, afirman que el calentamiento global no se ve influenciado por las actividades antrópicas, sino que se trata en realidad de un proceso natural. La segunda parte, publicada el 31 de marzo de 2014 por el Grupo de Trabajo II, se centra en **los impactos del cambio climático, vulnerabilidad y adaptación**. De la tercera parte -**Mitigación**- de publicación reciente, Greenpeace (2014) destaca lo siguiente.

1. La reducción seria de emisiones no ha comenzado realmente. Pese a los acuerdos globales y las políticas nacionales, **las emisiones siguen creciendo**, sobre todo en las economías emergentes, mientras que las emisiones de los países industrializados tradicionales se mantienen en niveles altos. Las emisiones mundiales han crecido más rápido entre 2000 y 2010 que en las décadas anteriores. Sin medidas mayores, nos dirigimos hacia un aumento de las temperaturas de entre tres y cinco grados centígrados (3-5°C).
2. **2000-2010 fue la década del carbón**. Casi el 80% del crecimiento de las emisiones durante este periodo fue causado por la quema de combustibles fósiles y, en particular, por la quema de carbón.
3. **No es demasiado tarde para limitar el calentamiento a menos de 2°C**, o incluso a 1,5°C con menos certeza, que es el nivel más allá del cual los riesgos comienzan a acelerarse sustancialmente. Pero tenemos que mantenernos dentro de un presupuesto de carbono limitado que se está reduciendo rápidamente. Los escenarios que limitan la temperatura a aumentos de 1,5°C implican entre el 70% y el 95% de reducción de emisiones para el año 2050 respecto a los niveles de 2010, mientras los escenarios que limitan el aumento a los 2°C implican, por lo menos, entre un 40% a un 70% de reducción de emisiones para el 2050.
4. Tenemos que dirigirnos hacia la eliminación del uso de combustibles fósiles y el cero neto en emisiones. **El sector de la energía es la mayor fuente de emisiones** y es ahí donde se necesita una transformación fundamental, incluyendo un abandono a largo plazo de las tecnologías de conversión de combustibles fósiles. Las emisiones globales de CO<sub>2</sub> netas deben disminuir hacia

cero. La descarbonización rápida del sistema eléctrico es un componente clave de las estrategias efectivas en coste, empezando por las centrales térmicas de carbón.

5. Las energías renovables están listas ya y vienen con los mayores beneficios añadidos. Las tecnologías basadas en energías renovables han avanzado sustancialmente en su rendimiento y costes desde el último informe del IPCC (AR4) y un número creciente de ellas han alcanzado un nivel de madurez técnico y económico para permitir el despliegue a escala significativa. No puede decirse lo mismo de la captura y almacenamiento de carbono (CAC) y de la energía nuclear. Dentro de estas tres opciones para alcanzar cero o bajas emisiones de CO<sub>2</sub> evaluadas en el informe, **las energías renovables se destacan como la opción más fácil de hacer y llevan asociados muchos beneficios colaterales.**
6. Usar la energía de manera más inteligente juega un papel fundamental en la reducción de emisiones. La reducción a corto plazo de la demanda de energía es importante para una mitigación eficaz en coste. Cuanto más se haga en cuanto a eficiencia energética, menor será la presión para depender de opciones arriesgadas de suministro de energía. **El potencial de la eficiencia es grande** y ponerlo en práctica ayudaría a evitar el peligro de quedarnos atrapados en infraestructuras intensivas en CO<sub>2</sub>, mientras que conllevaría importantes beneficios añadidos.
7. **La transición a las energías limpias significa la desinversión en combustibles fósiles.** La transición a un mundo bajo en emisiones de CO<sub>2</sub> implicaría grandes cambios en los patrones de inversión en los próximos 15 años, con importantes descensos en la extracción de combustibles fósiles y en las inversiones en centrales térmicas y grandes aumentos en las inversiones en eficiencia energética y en energías renovables. Para mantenernos por debajo del calentamiento de los 2°C solo alrededor de una quinta parte de todas las reservas de combustibles fósiles podrán ser quemadas. Por lo tanto, las políticas climáticas deben devaluar los activos en los combustibles fósiles. Se espera que el efecto sobre los exportadores de carbón vaya a ser muy negativo.
8. **Los costes de las medidas de actuación son pequeños cuando se ponen en contexto.** Mantenernos por debajo de los 2°C podría reducir el crecimiento del consumo en alrededor de 0,06 puntos porcentuales por debajo de la línea de base. En otras palabras, en lugar de un crecimiento global en el consumo anual del 1,6% al 3%, se pasaría a uno del 1,54 - 2,94% durante este siglo. Pero estos números hacen caso omiso de los beneficios derivados por evitar la destrucción producida por el cambio climático, así como los beneficios añadidos por la reducción de la contaminación. En realidad, los beneficios añadidos por la calidad del aire por sí solos pueden ser, a menudo, de un orden de magnitud similar a lo que cuesta la mitigación o muy superiores a ellos.
9. Actuar rápido reduce los costes y riesgos y evita medidas inconvenientes. **Cuanto más tardemos en actuar, más altos serán los costes totales y menores nuestras posibilidades de evitar un calentamiento catastrófico.**
10. **La cooperación mundial es necesaria y hacerla más justa podría ayudar.** Hasta ahora, la cooperación mundial en la acción climática ha sido limitada en términos de la reducción de emisiones reales, pero tener en cuenta la equidad y la justicia distributiva podría ayudar a avanzar. No hay métodos universalmente aceptados para un reparto del esfuerzo justo pero, mirando al conjunto de todos los marcos de reparto de esfuerzos, se concluye que, si el objetivo es mantener el calentamiento global por debajo de 2°C, entonces en 2030 los derechos de emisión de los países que pertenecían a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) en 1990 tendrían que ser aproximadamente la mitad que los niveles de 2010, con un amplio rango; en las economías en transición (EIT) cerca de dos tercios; más o menos como los niveles de emisiones de 2010 o ligeramente por debajo en Asia; ligeramente por encima de los niveles de emisiones de 2010 en Oriente Medio y África y bastante por debajo de los niveles de 2010 en América Latina.
11. Por último, no es solo la tecnología y la política las que tienen que cambiar, ni solo la energía. **El comportamiento, el estilo de vida y la cultura tienen una influencia considerable en el uso de la energía y las emisiones**, con un alto potencial para la reducción en algunos sectores. Los cambios en los patrones de consumo, el cambio en la dieta y la reducción de los residuos de alimentos pueden reducir emisiones considerablemente. Para los sectores con usos del suelo, la reducción de la deforestación es una de las opciones de mitigación más rentables.

Algunos autores han trazado un interesante paralelismo entre la situación actual referida a la inacción ante el cambio climático y la vivida durante la crisis económica mundial desatada en 2008 con motivo de la “*burbuja financiera*”, hablando en este caso de “*burbuja climática*” (PAULSON, 2014), dado que existen numerosos indicios que nos acercamos a un colapso climático por causas antrópicas, ante los cuales la humanidad no reacciona tempestiva ni adecuadamente. Sin perjuicio de ello, existen voces que afirman que el calentamiento global también afecta la efectividad de las energías renovables, al incidir en las condiciones naturales en las cuales se desarrollan.

Se espera que el cambio climático tenga un impacto en el tamaño y distribución geográfica de su potencial productivo. El cambio climático puede influir así en la bioenergía (impacto sobre la producción de biomasa) y sobre la energía solar (por posibles variaciones y cambios en la distribución de la nubosidad). Para la energía hidroeléctrica se espera que los impactos sean ligeramente positivos al aumentar globalmente las precipitaciones, aunque puede haber importantes efectos negativos locales o regionales. Para la eólica tampoco se pronostica un gran impacto, aunque sí algunos cambios en la distribución de los recursos eólicos. Finalmente, en la geotérmica y marina no se prevén cambios significativos. (Labandeira, Linares y Würzburg, 2012)

### III. Marco Normativo. Programas.

I. **Normativa:** El marco normativo Argentino regulatorio de las fuentes de Energía Renovables es relativamente de novedosa creación, coincidente con la crisis energética de los últimos años y abarca cuestiones relacionadas a incentivos, marco tarifario, beneficios fiscales, metas a alcanzar y plazos a cumplir, como a continuación veremos:

#### a. *Decreto Nacional N° 2247/85.*

Tuvo como objetivo una política de desarrollo de las energías no convencionales a través de la Dirección Nacional de Conservación y Nuevas Fuentes de la Secretaría de Energía de la Nación. En este marco fue creado en la provincia de Chubut el Centro Regional de Energía Eólica (CREE), integrado por la Secretaría de Planeamiento de esa provincia, la Universidad Nacional de la Patagonia y la Secretaría de Energía de la Nación.

#### b. *Ley 25.019 “Régimen Nacional de Energía eólica y solar<sup>32</sup>” (reglamentada por Decreto 1597/99)*

Declaró de interés nacional la generación de energía eléctrica de origen eólico y solar en todo el territorio nacional, promoviendo asimismo la investigación y uso de energías no renovables o no convencionales. Estipula por otra parte, diferimientos en el pago del impuesto al valor agregado por 15 años para aquellas inversiones de capital destinadas a la instalación de centrales y o equipos eólicos o solares, y estabilidad fiscal (también por 15 años), para Toda actividad de generación eléctrica eólica y solar que vuelque su energía en los mercados mayoristas y/o que esté destinada a la prestación de servicios públicos.

#### c. *Ley 26190 “Régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica<sup>33</sup>” (Reglamentada por Decreto 562/2009)*

En el año 2006 se dicta, bajo el N° 26190, una ley nacional que declara en su art. 1 de interés nacional 1) el uso de fuentes de energía renovables destinadas a la prestación de servicios públicos. 2) la investigación para el desarrollo tecnológico. 3) La fabricación de equipos con esa finalidad.

32 Sancionada el 23 de septiembre de 1998, publicada en el Boletín Oficial el 26 de octubre de 1998.

33 Sancionada el 6 de Diciembre de 2006, publicada en el Boletín Oficial el 2 de Enero de 2007

De esto se observa un avance con respecto a la ley 25019, al quedar comprendido todo el *iter* necesario para la prestación efectiva del servicio público con fuentes de energía renovable, es decir, investigación – producción – utilización, lo cual resulta una decisión importante a los fines de lograr un futuro e hipotético autoabastecimiento, que no sería tal de ser necesaria la completa importación de los equipos requeridos para la producción, debiendo quizás reorientar los recursos de a fin de adquirir técnicas de know-how tendientes a disminuir los costos de producción y aprovechar más eficientemente la energía producida. Por otra parte, resulta necesario llevar a cabo una adecuada política de cooperación y transferencia tecnológica con países desarrollados, identificando asimismo líneas de crédito disponibles.

Traza la meta de alcanzar un 8% en la participación de las fuentes de energías renovables en el consumo eléctrico nacional para el año 2016 (art. 2). Las tecnologías que se incluyen son las: eólica, mareomotriz, hidráulica hasta 30MW, gases de vertedero, y gases de plantas de depuración y biogás.

Define una serie de medidas destinadas a promover la inversión en energías renovables, a saber:

- Elaborar, en coordinación con las jurisdicciones provinciales, un Programa Federal para el Desarrollo de las Energías Renovables el que tendrá en consideración todos los aspectos tecnológicos, productivos, económicos y financieros necesarios para la administración y el cumplimiento de las metas de participación futura en el mercado de dichos energéticos.
- Coordinar con las universidades e institutos de investigación el desarrollo de tecnologías aplicables al aprovechamiento de las fuentes de energía renovables.
- Identificar y canalizar apoyos con destino a la investigación aplicada, a la fabricación nacional de equipos, al fortalecimiento del mercado y aplicaciones a nivel masivo de las energías renovables.
- Celebrar acuerdos de cooperación internacional con organismos e institutos especializados en la investigación y desarrollo de tecnologías aplicadas al uso de las energías renovables.
- Definir acciones de difusión a fin de lograr un mayor nivel de aceptación en la sociedad sobre los beneficios de una mayor utilización de las energías renovables en la matriz energética nacional.
- Promover la capacitación y formación de recursos humanos en todos los campos de aplicación de las energías renovables.

Por otra parte, alguno de los instrumentos de promoción económicos (las famosas “zanahorias”), que establece son.

- I. Un régimen de Inversiones (art. 7): por diez (10) años, para la construcción de obras nuevas destinadas a la producción de energía eléctrica generada a partir de fuentes de energía renovable, destinado a las personas físicas y/o jurídicas que sean titulares de inversiones y concesionarios de estas últimas (art. 8).
- II. Crea Fondo Fiduciario de Energías Renovables, que se destina al subsidio de la tarifa eléctrica de los servicios públicos que cuentan en su producción con las diferentes fuentes de energía renovable (art. 14). Asimismo, se estipula la posibilidad de diferir el pago del IVA de las inversiones en capital y la exención del Impuesto a la Ganancia, por un lapso de 15 años a contar desde la sanción de la ley (art. 9)

#### *d. Ley 26093. Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentables de Biocombustibles<sup>34</sup>.(reglamentada por Decreto Decreto 109-2007)*

Mediante esta ley se estableció un Régimen de Promoción para la producción y Uso Sustentables de Biocombustibles en el territorio de la Nación Argentina, por un periodo de 15 años, creando al efecto la “Comisión Nacional Asesora para la Promoción de la Producción y Uso Sustentables de los Biocombustibles”(art. 2), entre cuyas funciones se encuentran (art. 4):

<sup>34</sup> Sancionada: 19/04/ 2006, Publicada en el Boletín Oficial el 15/05/2006.



- Promover y controlar la producción y uso sustentables de biocombustibles.
- Establecer las normas de calidad a las que deben ajustarse los biocombustibles.
- Establecer los requisitos y condiciones necesarios para la habilitación de las plantas de producción y mezcla de biocombustibles, resolver sobre su calificación y aprobación, y certificar la fecha de su puesta en marcha.
- Realizar auditorías e inspecciones a las plantas habilitadas para la producción de biocombustibles a fin de controlar su correcto funcionamiento y su ajuste a la normativa vigente.
- Aplicar sanciones.
- Solicitar con carácter de declaración jurada, las estimaciones de demanda de biocombustible previstas por las compañías que posean destilerías o refinerías de petróleo, fraccionadores y distribuidores mayoristas o minoristas de combustibles, obligados a utilizar los mismos.
- Administrar los subsidios que eventualmente otorgue el Honorable Congreso de la Nación.
- Determinar y modificar los porcentajes de participación de los biocombustibles en cortes con gasoil o nafta.
- Asumir las funciones de fiscalización, y determinar la tasa de fiscalización y control que anualmente pagarán los agentes alcanzados por la ley.
- Crear y llevar actualizado un registro público de las plantas habilitadas para la producción y mezcla de biocombustibles, así como un detalle de aquellas a las cuales se les otorguen los beneficios promocionales.
- Firmar convenios de cooperación.
- Publicar periódicamente precios de referencia de los biocombustibles.

**Mezcla de biodiesel (arts. 7 y 8):** En los artículos citados se establece que todo combustible líquido caracterizado como gasoil o diesel oil, y nafta que se comercialice dentro del territorio nacional, deberá ser mezclado por aquellas instalaciones que hayan sido aprobadas por la autoridad de aplicación para el fin específico de realizar esta mezcla con la especie de biocombustible denominada "biodiesel", en un porcentaje del CINCO POR CIENTO (5%) como mínimo de este último, medido sobre la cantidad total del producto final.

**Régimen Promocional (art. 13, 14 y 15):** Dispone beneficios fiscales para todos los proyectos de radicación de industrias de biocombustibles, siempre y cuando: a) Se instalen en el territorio de la Nación Argentina, b) Sean propiedad de sociedades comerciales, privadas, públicas o mixtas, o cooperativas, constituidas en la Argentina y habilitadas con exclusividad para el desarrollo de la actividad promocionada por la ley, c) Su capital social mayoritario sea aportado por el Estado nacional, por la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, los Estados Provinciales, los Municipios o las personas físicas o jurídicas, dedicadas mayoritariamente a la producción agropecuaria, d) Estén en condiciones de producir biocombustibles cumpliendo las definiciones y normas de calidad e) Hayan accedido al cupo fiscal.

*e. Ley 26.334 - Régimen de Producción de Bioetanol<sup>35</sup>:*

Mediante esta ley se establece un Régimen de Promoción de la Producción de Bioetanol, con el objeto de satisfacer las necesidades de abastecimiento del país y generar excedentes para exportación. El fin es impulsar la conformación de cadenas de valor mediante la integración de productores de caña de azúcar e ingenios azucareros en los procesos de fabricación de bioetanol, quienes gozarán de los beneficios establecidos en los Capítulos I y II de la Ley N° 26.093, ya analizada

*f. Ley 26193. "Régimen para el Desarrollo De La Tecnología, Producción, Uso y Aplicaciones del Hidrogeno como Combustible y Vector de Energía."<sup>36</sup>*

<sup>35</sup> Sancionada: 4/12/2007, Publicada en el Boletín Oficial el 3/1/2008

<sup>36</sup> Sancionada: 2/08/2006, Publicada en el Boletín Oficial el 25/08/2006.



Mediante esta ley se declara de interés nacional el desarrollo de la tecnología, la producción, el uso y aplicaciones del hidrógeno como combustible y vector de energía, y en el mismo sentido que las anteriores leyes promocionales ya analizadas, se destaca que los fines de la misma son promover la investigación, el desarrollo, la producción y el uso del hidrógeno como combustible y vector energético, generado mediante el uso de energía primaria y regula el aprovechamiento de su utilización en la matriz energética.

Entre los objetivos (art. 3) se destacan:

- Desarrollar y fortalecer la estructura científico- tecnológica destinada a generar los conocimientos necesarios para el aprovechamiento de los recursos energéticos no convencionales.
- Incentivar la aplicación de tecnologías que permitan la utilización del hidrógeno, en especial para el desarrollo de proyectos experimentales y las transferencias de tecnologías adquiridas.
- Incentivar la participación privada en la generación y producción del hidrógeno propendiendo a la diversificación de la matriz energética nacional, priorizando aquellos emprendimientos en donde el beneficio sea significativo en términos de desarrollo de la industria nacional, utilización de mano de obra local y captación de recursos humanos nacionales de alta especialización e innovación tecnológica.
- Promover la formación de recursos humanos y el desarrollo de ciencia y tecnología en materia de energía de hidrógeno.
- Promover la cooperación regional, especialmente con los países que integran el MERCOSUR e internacional, en el campo de la generación y utilización del hidrógeno.
- Fomentar el desarrollo de un plan educativo nacional para concientizar a la población en la necesidad de disminuir la contaminación ambiental y de los usos y alcances del hidrógeno como combustible y vector energético.
- Impulsar el estudio de la obtención del hidrógeno a partir del uso de energías renovables y no renovables, el montaje de plantas pilotos para la generación de energía a partir del hidrógeno mediante procesos no contaminantes.
- Incentivar la instalación de plantas generadoras de energía eléctrica de baja y media tensión mediante el uso del hidrógeno como combustible.
- Fomentar la investigación y desarrollo de tecnologías que permitan la utilización del hidrógeno como combustible de uso vehicular.

**Fondo (art. 13):** Se crea el *Fondo Nacional de Fomento del Hidrógeno* (FONHIDRO) con el fin de financiar los planes del Programa Nacional del Hidrógeno que resulten aprobados.

- a. La partida del Presupuesto de la Administración Nacional que fije anualmente el Congreso de la Nación y cuya cuantía reflejará el Poder Ejecutivo en el proyecto respectivo.
- b. Los generados con su actividad, en la proporción que la reglamentación determine.
- c. Préstamos, aportes, legados y donaciones de personas físicas y jurídicas, organismos e instituciones nacionales o internacionales, públicas o privadas.
- d. Los importes correspondientes a la aplicación de las sanciones.
- e. Las partidas que para subsidios prevea anualmente el Presupuesto de la Administración Nacional.

Asimismo, al igual que en las anteriores leyes en análisis, se establece un régimen fiscal promocional de la actividad.

## II. Programas:

### a. Permer

El Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales (PERMER) tiene como objetivo principal el abastecimiento de electricidad a un significativo número de personas que viven en hogares rurales, y a aproximadamente 6.000 servicios públicos de todo tipo (escuelas, salas de emergencia médica, destacamentos policiales, etc.) que se encuentran fuera del alcance de los centros de distribución de energía. Es un proyecto de alto contenido social, cuyos objetivos son atender al mejoramiento de la calidad de vida de las comunidades rurales dispersas, contribuyendo al alivio a la pobreza en las mismas.

La implementación de mini centrales hidroeléctricas en el sentido de la corriente, turbinas eólicas, centrales diesel o centrales híbridas operadas por medios diesel/eólico o diesel/solar o solar/eólico en pequeñas comunidades así como la instalación de sistemas fotovoltaicos y/o eólicos individuales brindará al poblador rural además del servicio eléctrico, la posibilidad de desarrollar pequeños emprendimientos productivos. El proyecto está financiado con un préstamo del Banco Mundial (U\$S 30 Millones), una donación del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (U\$S 10 Millones), Fondos Eléctricos u otros fondos Provinciales; aportes de los Concesionarios provinciales y de beneficiarios.

Actualmente, el Proyecto está ejecutándose en las provincias de Jujuy, Salta, Tucumán, Santiago de Estero, Chaco, Chubut, Catamarca, Misiones, Río Negro, Neuquén y San Juan a las que le seguirán aquellas provincias que firmaron acuerdos para implementarlo (Córdoba, La Pampa, Mendoza, San Luis, Santa Fe y Tierra del Fuego).

### b. *Genren I y II.*

Atento que La Ley 26.190 impulsó el “*Régimen de Fomento Nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinadas a la generación eléctrica*”, y en la misma se estableció que en el plazo de 10 años, el 8% del consumo eléctrico tiene que ser abastecido a partir de fuentes de energías renovables, Energía Argentina Sociedad Anónima (ENARSA) mediante el plan **Licitación de generación eléctrica a partir de fuentes renovables** licitará la compra de energía eléctrica proveniente de fuentes renovables. ENARSA venderá la energía al Mercado Eléctrico mediante contratos a 15 años de plazo.

A su vez, existen normas que si bien no impulsan directamente el uso de la ER, como las mencionadas anteriormente, regulan y permiten un mejor control de la calidad de los equipos de aprovechamiento de dichas fuentes. Ejemplo de ello lo constituyen las normas que tienen difusión nacional como las del Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) para colectores solares planos y paneles fotovoltaicos, así como también sobre la calidad de combustibles biomásicos.

## IV. Situación y perspectiva de las Energías Renovables en Argentina.

La matriz energética del país da cuenta que más del 90% del total de nuestros consumos energéticos actuales están abastecidos por fuentes de energía no renovables, y el 10% restante se divide, en partes más o menos iguales, entre: hidroelectricidad, nuclear, energías renovables y carbón. Esta realidad contrasta ostensiblemente con nuestro vecino país Brasil, que tiene muy diversificada sus fuentes primarias, constituyendo las energías de origen renovable alrededor del 44,8 %, valor que el país tiene previsto hacer crecer hasta el 46,3 % en 2020. En el subsector eléctrico la situación es un poco diferente aunque subsiste el predominio de las centrales de generación alimentadas con hidrocarburos y sus derivados (60%), en tanto que las centrales hidroeléctricas participan en un 33%, y las nucleares en un 6%.

En materia de Energías Alternativas, pese a su escasa contribución actual, Argentina es el país con mejores oportunidades de desarrollo de de Latinoamérica. En este sentido, un informe desarrollado por el Centro Estratégico para el Crecimiento y Desarrollo Argentino (2013), al afirmar que.

Argentina cuenta en la Patagonia con uno de los tres corredores eólicos más importantes del mundo y con el mayor potencial eólico a nivel global. Para que esta forma de energía pueda ser aprovechada significativamente, es necesario crear un mecanismo en el que dicha forma de energía pueda competir con las energías convencionales (p. 23)

Entre los incentivos a las energías renovables, encontramos el Mecanismo para el Desarrollo Limpio (MDL o CDM en inglés). Este mecanismo ofrece a los gobiernos y a las empresas privadas de los países industrializados la posibilidad de transferir tecnologías limpias a países en desarrollo (como Argentina), mediante inversiones en proyectos de reducción de emisiones o sumideros, recibiendo de esta forma certificados de emisión que servirán como suplemento a sus reducciones internas. Por otra parte, España Ríos y Beloso Pérez (1997) han afirmado que:

un elemento importante en la nueva lógica de desarrollo debe ser reintegrar a las regiones parte de las riquezas que proviene de ellas, lo cual puede ser parcialmente logrado a través del desarrollo de las energías renovables puesto que éstas favorecen la aparición de nuevos sectores de actividad económica relacionados con la distribución y mantenimiento de equipos y sistemas energéticos, como un mecanismo de compensación (pág. 820)

Esto último resulta un beneficio socioeconómico de interés, recordando que en base al Federalismo Ambiental imperante en Argentina, las provincias tienen el dominio originario de los recursos naturales (art. 124 Constitución Nacional<sup>37</sup>) (figura 109).

*Figura 109. Mapa Argentino donde se destaca las zonas mas favorables para el desarrollo de las distintas energias renovables.*



37 "Artículo 124.- Las provincias podrán crear regiones para el desarrollo económico y social y establecer órganos con facultades para el cumplimiento de sus fines y podrán también celebrar convenios internacionales en tanto no sean incompatibles con la política exterior de la Nación y no afecten las facultades delegadas al Gobierno federal o el crédito público de la Nación; con conocimiento del Congreso Nacional. La ciudad de Buenos Aires tendrá el régimen que se establezca a tal efecto. Corresponde a las provincias el dominio originario de los recursos naturales existentes en su territorio"

A modo de ejemplificar lo dicho, analizaremos algunos elementos salientes de las perspectivas de la energía **eólica**, **biomasa** y **solar** en el país:

**a. Biomasa:** Se denomina biomasa a todo aquel combustible renovable de origen animal o vegetal, lo que incluye el aprovechamiento de residuos forestales o residuos agrícolas. También los cultivos que dedican su producción exclusivamente a la generación de combustible y los gases procedentes de la descomposición de materia orgánica son considerados biomasa. Se puede producir energía a partir de biomasa proveniente de una variedad de materias primas: residuos de árboles y bosques; cultivos alimentarios, cultivos para biocombustibles y también de desechos urbanos, agrícolas e industriales compuestos por materia orgánica. Un claro ejemplo de aprovechamiento de este tipo de fuente de energía renovable es Oslo, capital de Noruega, que no sólo produce basura sino que la importa de Inglaterra, Irlanda y Suecia, a fin de transformar los residuos de nuestra era de en energía eléctrica y calorífica.

Diferentes tipos de Biomasa:

1. Biomasa natural: se produce de manera espontánea en la naturaleza, como el material que se recoge en la poda de un bosque.
2. Biomasa residual seca: se compone de desechos derivados de la actividad agrícola, forestal o alimenticia.
3. Biomasa residual húmeda: surge de los vertidos biodegradables, como las aguas residuales o los excrementos del ganado.
4. Cultivos energéticos: son plantas, como el cardo o el girasol, que se utilizan para obtener biomasa transformable en biocombustible. (Fernández Muerza, 2010).

Algunos beneficios derivados de la utilización de la Energía Biomasa:

- Es un recurso totalmente renovable
- Mitiga el uso e importación de combustibles fósiles al país
- Reduce drásticamente los impactos negativos al medio ambiente: las emisiones de dióxido de carbono quedan en gran parte compensadas por el dióxido de carbono capturado en el crecimiento de las plantas.
- No emite contaminantes sulfurados o nitrogenados, ni apenas partículas sólidas
- Genera empleo y desarrollo socioeconómico
- Si se utilizan residuos de otras actividades (estiércol proveniente de tambos) esto se traduce en un reciclaje y disminución de residuos, aquí radica una de las mayores ventajas de la energía de biomasa pues supone convertir un residuo en un recurso
- Nuevas oportunidades al sector agrícola que permite la introducción de cultivos de gran valor frente a monocultivos cerealistas
- Disminuye la dependencia externa del abastecimiento de combustibles
- al emplear la biomasa como combustible se eliminan residuos, desechos, aguas residuales y purines que son fuente de contaminación del subsuelo y de las aguas subterráneas (Energía Biomasa, 2012)

La Argentina posee una gran disponibilidad de biomasa apta para ser utilizada como energía. Según el informe Wisdom de la FAO (2009), la productividad leñosa anual sustentable del país es de 193 millones de t de las cuales 143 millones (42.900 ktep/año) son físicamente accesibles y están potencialmente disponibles para usos energéticos. A estos recursos se le suman 2,7 millones de toneladas de biomasa leñosa proveniente de los subproductos de aserraderos y de las plantaciones frutales y cerca de 23 millones de otros subproductos biomásicos derivados de las agroindustrias dando un total de recursos que ascienden a 148 millones de toneladas (37.200 ktep/año). EL informe señala que:

Desde el punto de vista agronómico y forestal, Argentina posee condiciones ecológicas adecuadas para el desarrollo de los insumos básicos necesarios para la producción de energía a partir de la biomasa. Asimismo, tiene un gran potencial y ventajas comparativas para la producción de biocombustibles, ya que es uno de los principales productores mundiales de cereales y oleaginosas. (...) Existen también los instrumentos legales para sostener el desarrollo de la bioenergía: el régimen de promoción de la Ley 26.093 para la producción y uso sustentable de biocombustibles y la Ley 26.190 que promueve el uso de fuentes renovables de energía para la producción de energía eléctrica. (...) desde el punto de vista económico y social el desarrollo de la bioenergía y los biocombustibles promoverá la creación de nuevas actividades e industrias hoy inexistentes en el país, tendrá un “efecto riqueza” generado por las inversiones realizadas en el sector, posibilitará la diversificación de riesgo del productor debido a la existencia de un nuevo destino para su producción, permitirá una significativa generación de puestos de trabajo, tanto en la producción de los dendro y biocombustibles como en su conversión y utilización, impulsará el desarrollo de áreas marginales a partir de la implementación de cultivos energéticos y su industrialización in situ, y promoverá una mejora ambiental por reducción de emisiones contaminantes y con efecto invernadero. (...) Por su parte, entre las principales barreras de la bioenergía —que son comunes a la mayoría de las energías renovables— pueden mencionarse las barreras técnicas, económicas y financieras, institucionales y sociales.(p.13/14)

De acuerdo al análisis citado, estarían dadas las condiciones para que este tipo de fuente de energía renovable comience a incidir fuertemente en el portfolio energético, atento la existencia en cantidad suficiente de la materia prima necesaria, marco regulatorio de fomento (analizado oportunamente) y beneficios económicos y sociales de consideración. Por otra parte, señala que entre los principales beneficios de la biomasa para la región en particular, son:

Diversificar la matriz energética, incluyendo nuevos actores del sector agrícola y forestal; Reducir la generación de emisiones con efecto invernadero y mejorar la salud pública por aire más limpio; Diversificar y agregar valor a la producción agrícola, hoy excesivamente limitada por los “commodities”; Introducción de zonas actualmente marginales para la producción agrícola y forestal, con el desarrollo concomitante de las economías regionales, hoy altamente deterioradas.; Crear empleo en zonas rurales, con la consiguiente estabilización de la población en zonas que actualmente son “expulsoras” de mano de obra.; Posibilitar la generación de acreencias en el mercado de bonos de reducción de emisiones de carbono (p. 14)

#### b. Energía Solar.

Por energía solar entendemos a la conversión de los rayos del sol en formas útiles de energía, como la electricidad o el calor. La energía solar también es responsable en parte, entre otras, de la energía eólica, ya que los patrones de viento están muy influenciadas por el sol.

La Argentina cuenta con interesantes niveles de irradiación que permitirían su aprovechamiento tanto a nivel fotovoltaico (producción de electricidad) como a nivel térmico (producción de calor y de electricidad). La región con mayor potencial es la del Noroeste, seguida en orden de importancia por las regiones de Cuyo, Centro y Noreste del país. El recurso solar en el Noroeste de la Argentina es tan abundante que potencialmente podría abastecer a toda la demanda de energía eléctrica del país (ENARSA, 2012). Un aspecto interesante de estas tecnologías es que pueden ser usadas tanto en gran escala como en pequeña escala a nivel domiciliario.

Sus principales ventajas, de acuerdo a la Secretaria De Energia (2008) de Argentina son:

- Evitar un costoso mantenimiento de líneas eléctricas en zonas de difícil acceso
- Eliminar los costos ecológicos y estéticos de la instalación de líneas en esas condiciones Contribuir a evitar el despoblamiento progresivo de determinadas zonas
- Es una energía descentralizada que puede ser captada y utilizada en todo el territorio
- Una vez instalada tiene un costo energético nulo
- Mantenimiento y riesgo de avería muy bajo
- Tipo de instalación fácilmente modulable, con lo que se puede aumentar o reducir la potencia instalada fácilmente según las necesidades
- No produce contaminación de ningún tipo
- Se trata de una tecnología en rápido desarrollo que tiende a reducir el costo y aumentar el rendimiento (P.9)

### c. Energía Eólica.

La energía eólica aprovecha la energía cinética del viento y la convierte, según sea la necesidad, en energía eléctrica, mecánica o térmica. Es una de las principales fuentes que contribuirán a satisfacer la demanda energética mundial en auge. En este contexto a la Argentina, que como se observa en el cuadro 32 actualmente ocupa el puesto número 40 a nivel mundial con una capacidad instalada de 217, 1 MW, se le presenta una oportunidad importante, atento que tiene condiciones excepcionalmente favorables para el empleo de esta fuente en cuanto a la existencia de zonas muy vastas con vientos con velocidades apropiadas para la generación eléctrica.

La Patagonia Argentina, es una de las regiones de mayor potencial eólico del planeta, gracias a la dirección, constancia y velocidad del viento, pudiendo alcanzarse con granjas eólicas allí instaladas factores de capacidad superiores al 35%. (...) En el resto del mundo sólo se encuentran vientos de energía o persistencia equivalentes en algunas islas del Mar del Norte y del Pacífico Norte, o en instalaciones "off shore" (Asociación Argentina De Energía Eólica, 2009)

*Cuadro 32. Ranking Mundial 2013 Energía Eólicas 2013*

Position 2013	Country	Total capacity installed end 2013 [MW]	Added capacity 2013 [MW]	Growth rate 2013 [%]	Installed capacity per capita W/person	Installed capacity per sqkm Kw/sqkm	Total capacity installed end 2012 [ MW]	Total capacity installed end 2011 [ MW]	Total capacity installed end 2010 [ MW]
1	China	91'324.0	16'000.0	21.2	68.3	9.5	75'324.0	62'364.0	44'733.0
2	USA	61'108.0	1'084.0	2.0	195.1	6.2	59'882.0	46'919.0	40'180.0
3	Germany	34'660.0	3'345.0	11.7	425.4	97.1	31'315.0	29'075.0	27'215.0
4	Spain	22'959.0	175.0	0.7	491.1	45.4	22'796.0	21'673.0	20'676.0
5	India	20'150.0	1'829.0	10.0	16.9	6.1	18'321.0	15'880.0	13'065.8
6	United Kingdom	10'531.0	1'883.0	24.7	168.0	43.2	8'445.0	6'018.0	5'203.8
7	Italy	8'551.0	444.0	5.0	140.1	28.4	8'144.0	6'737.0	5'797.0
8	France	8'254.0	631.0	10.1	126.8	12.8	7'499.8	6'607.6	5'628.7
9	Canada	7'698.0	1'497.0	24.1	226.2	0.8	6'201.0	5'265.0	4'008.0
10	Denmark	4'772.0	657.0	14.7	862.9	110.7	4'162.0	3'927.0	3'734.0
11	Portugal	4'724.0	196.0	4.4	439.0	51.3	4'525.0	4'083.0	3'702.0
12	Sweden	4'470.0	724.0	19.4	491.8	9.9	3'745.0	2'798.0	2'052.0



Cuadro 32 (continuación)

13	Brazil	3'399.0	892.0	35.6	16.7	0.4	2'507.0	1'429.0	930.00
14	Poland	3'390.0	894.0	35.8	88.0	10.8	2'497.0	1'616.4	1'179.0
15	Australia	3'049.0	465.0	18.0	140.1	0.4	2'584.0	2'226.0	1'880.0
16	Turkey	2'959.0	646.0	28.0	37.6	3.8	2'312.0	1'799.0	1'274.0
17	The Netherlands	2'693.0	303.0	12.6	159.9	64.8	2'391.0	2'328.0	2'269.0
18	Japan	2'661.0	50.0	1.8	21.0	7.0	2'614.0	2'5010.0	2'304.0
19	Romania	2'599.0	695.0	36.4	118.7	10.9	1'905.0	826.0	591.0
20	Ireland	2'037.0	288.0	17.2	436.1	29.0	1'738.0	1'631.0	1'428.0
21	Mexico	1'992.0	644.0	47.8	17.5	1.0	1'348.0	929.0	521.0
22	Greece	1'865.0	116.0	6.6	173.3	14.1	1'749.0	1'626.5	1'208.0
23	Austria	1'684.0	308.0	22.2	204.9	20.1	1'378.0	1'084.0	1'010.6
24	Belgium	1'651.0	276.0	20.1	158.3	54.1	1'375.0	1'078.0	886.0
25	Norway	768.0	110.0	9.2	163.7	2.4	703.0	520.0	434.6
26	Bulgaria	681.0	7.0	1.0	96.0	6.1	674.0	503.0	499.0
27	New Zealand	623.0	0.0	0.0	145.2	2.3	622.8	622.8	506.0
28	Chinese Taipei	614.2	50.4	8.9	26.6	17.1	563.8	563.8	518.7
29	Korea (South)	561.3	78.7	16.3	11.5	5.6	482.6	406.3	379.3
30	Egypt	550.0	0.0	0.0	6.7	0.5	550.0	550.0	550.
31	Morocco	494.8	204.0	70.0	15.5	1.1	291.0	291.0	286.0
32	Finland	448.0	162.0	55.6	85.2	1.3	288.0	197.0	197.0
33	Ukraine	371.0	95.0	34.4	8.2	0.6	276.0	151.1	87.4
34	Chile	335.0	145.0	76.3	19.8	0.4	190.0	190.0	170.0
35	Hungary	329.4	0.0	0.0	33.0	3.5	329.4	329.4	295.0
36	Croatia	302.0	132.0	67.8	67.4	5.8	180.0	131.0	89.0
37	Estonia	280.0	11.0	4.1	218.2	6.2	269.0	184.0	149.0
38	Lithuania	279.0	16.0	24.0	78.9	4.3	225.0	179.0	163.0
39	Czech Republic	269.0	9.0	3.5	26.4	3.4	260.0	217.0	215.0
40	Argentina	217.1	76.2	54.1	5.2	0.1	140.9	129.2	54.0
41	Thailand	193.0	81.0	72.3	89.9	0.2	112.0	8.0	0.0
42	Ethiopia	171.0	120.0	235.3	-----	-----	51.0	80.0	0.0
43	Costa Rica	148.2	0.0	0.0	32.4	2.9	148.2	148.2	123.0
44	Cyprus	147.0	0.0	0.0	131.2	15.9	147.0	134.0	82.0
45	Nicaragua	141.6	39.6	38.8	23.8	1.1	102.0	63.0	63.0
46	Puerto Rico	125.0	0.0	0.0	34.1	13.7	125.0	0.0	0.0
47	Pakistan	106.0	0.0	0.0	0.6	0.1	106.0	6.0	6.0
48	Tunisia	104.0	0.0	0.0	9.8	0.6	104.0	54.0	54.0
49	South Africa	102.0	92.0	909.9	2.1	0.1	10.1	10.1	10.0
50	Honduras	102.0	0.0	0.0	12.4	0.9	102.0	70.0	0.0

Fuente: Asociación Argentina De Energía Eólica, 2013.

Se estima que el potencial eólico patagónico al sur del paralelo 42 encierra una energía muy superior al contenido en toda la producción anual argentina de petróleo. Más aún, no solo el extremo sur argentino posee condiciones favorables para la instalación de granjas eólicas, existen asimismo numerosas regiones aptas en las provincias de Río Negro y Neuquén, en varias zonas serranas y costeras de la provincia de Buenos Aires, y en muchos otros sitios puntuales en todo el país.

d. Biocombustibles.

Los biocombustibles son combustibles de origen biológico obtenido de manera renovable a partir de restos orgánicos. Estos restos orgánicos proceden habitualmente del azúcar, trigo, maíz o semillas oleaginosas. Todos ellos reducen el volumen total de CO<sub>2</sub> que se emite en la atmósfera, ya que lo absorben a medida que crecen y emiten prácticamente la misma cantidad que los combustibles convencionales cuando se queman, por lo que se produce un proceso de ciclo cerrado. Las tres especies más difundidas son el biodiesel, el bioetanol y el biogás.

El Biodiesel es un combustible de origen renovable complementario o sustitutivo del combustible diesel, producido a partir de la transesterificación de aceites vegetales (nuevos o usados) o grasas animales, en presencia de un catalizador, o bien, a partir de la esterificación de ácidos grasos. El Bioetanol es otro combustible de origen renovable, complementario o sustitutivo a las naftas o gasolinas (destinadas a motores ciclo Otto), producido a partir de la fermentación y destilación de azúcar de caña o de remolacha azucarera, o la sacarificación, fermentación y destilación de cereales o materias primas lignocelulósicas. (...) el biogás es un combustible renovable sucedáneo del gas natural, producido a partir de la descomposición de materia orgánica en un digestor, por la acción de bacterias, en ausencia de oxígeno. Está compuesto por metano –principalmente-, dióxido de carbono y otros gases (ácido sulfúrico y nitrógeno), y tiene menor poder calórico, comparado con las 9.300 calorías del gas natural” (Molina, 2006, p. 2).

Junto con Brasil, Argentina es el mayor productor de biodiesel de Sudamérica y su capacidad de producción sobrepasa la demanda local por lo que el producto excedente se exporta principalmente a Europa. La siguiente es una cronología resumida de las variaciones del mercado de Biodiesel argentino en los últimos 7 años:

- **2007:** Comienza exportación de biodiesel.
- **2010 – 2013:** Argentina establece **5%** de biodiesel en Gas Oil y sucesivos aumentos hasta llegar al **8%**.
- **2013:**
- Mercado Exportación: Europa establece un arancel antidumping a las importaciones de biodiesel argentino (24,6%). El gobierno español excluye a las fábricas argentinas de biodiesel del listado de plantas autorizadas a vender en España.
- Mercado Nacional: Las demoras en la actualización del precio del biodiesel (regulados por la Secretaría de Energía) y la escalada de los costos de producción provocan una disminución de la producción de biodiesel en Argentina. Las empresas productoras operan a 60% de capacidad.
- 2014: El periodo comenzó con la aprobación de medidas oficiales para reactivar el sector
- Rebajas en las retenciones a la exportación de biodiesel 21% al 11,07%
- Reforma al impuesto adicional al gasoil:
  - La alícuota del 22% no es aplicable al biodiesel destinado a la generación eléctrica.
  - Eximición de la alícuota del 19% del impuesto a los combustibles líquidos.
- Los menores tributos hacen más competitivo el precio del biodiesel, por lo que se esperan producciones similares al año 2012 (Año record de producción).
- **Se prevé un incremento del 30% en la exportación de Biodiesel.**

**Beneficios.** Entre los principales beneficios encontramos, al igual que en el resto de las energías renovables, el hecho de reducir la demanda de petróleo por lo cual torna más seguro el autoabastecimiento de energía, disminuyendo la dependencia exterior y los costos de importación, favoreciendo la balanza de pagos. Asimismo, las emisiones de gases invernadero, monóxido de carbono y particulados podrían reducirse de forma significativa. Por otra parte, una ventaja comparativa con el resto de las energías renovables es su fácil almacenaje y posterior distribución.

**Desventajas.** Producir biocombustibles a gran escala requiere de grandes extensiones de tierra, lo cual acrecentaría en buena medida dos de los conflictos ambientales más urgentes de Argentina: 1) El corrimiento y expansión de la frontera agrícola en el país con la consiguiente intensificación del monocultivo, pérdida de bosques nativos, biodiversidad y conflicto con comunidades locales y pueblos nativos; 2) Masificación del uso de paquete tecnológico para cultivo (semillas transgénicas y agroquímicos); cuya aplicación en el país ha dado lugar a severos conflictos, muchos de los cuales se dirimieron en la justicia, con serias denuncias de daños tanto a la salud de las personas y animales como al ambiente.

Por otra parte, otro de los dilemas que se plantean en torno a la producción de biocombustibles surge respecto a la decisión de utilizar tierras fértiles y alimentos para producir energía, en vez de destinarla a satisfacer las necesidades alimenticias de la población, en un mundo en el cual millones de personas no acceden a este derecho humano básico. Respecto a lo expuesto, la FAO (2008) ha informado lo siguiente respecto a los biocombustibles:

- La demanda de materias primas agrícolas para la producción de biocombustibles líquidos será un factor de peso para los mercados agrícolas y la agricultura mundial durante el próximo decenio y tal vez más allá.
- El rápido aumento de la demanda de materias primas para la producción de biocombustibles ha contribuido al alza de los precios de los alimentos, lo que representa una amenaza directa para la seguridad alimentaria de las personas pobres que son compradores netos de alimentos (en valor), tanto en las zonas urbanas como en las rurales.
- A largo plazo, el aumento de la demanda y de los precios de los productos agrícolas básicos puede crear oportunidades de desarrollo agrícola y rural.
- Las consecuencias de los biocombustibles para las emisiones de gases de efecto invernadero –una de las principales motivaciones que subyacen al apoyo que recibe el sector de los biocombustibles– difieren según la materia prima, el lugar, la práctica agrícola y la tecnología de conversión.
- Es preciso armonizar enfoques a la hora de evaluar los balances respecto de los gases de efecto invernadero y otros efectos ambientales de la producción de biocombustibles si se aspira a lograr los resultados deseados
- Es probable que los biocombustibles líquidos no sustituyan sino solo una pequeña parte de los suministros de energía a nivel mundial y por sí solos no puedan eliminar nuestra dependencia de los combustibles fósiles
- En la actualidad, en muchos países la producción de biocombustibles líquidos no es económicamente viable sin la ayuda de subvenciones, dadas las tecnologías existentes de producción agrícola y elaboración de biocombustibles y los recientes precios relativos de las materias primas de productos agrícolas y el petróleo crudo.
- Las intervenciones normativas, especialmente en forma de subvenciones y los mandatos de mezcla de biocombustibles con combustibles fósiles, son la causa principal de la prisa por producir biocombustibles líquidos (p. 8/10)
- A fin de garantizar la sostenibilidad ambiental, económica y social de la producción de biocombustibles es necesario emprender iniciativas normativas en los siguientes ámbitos generales: proteger a los pobres y a los que padecen inseguridad alimentaria; aprovechar las oportunida-

des de desarrollo agrícola y rural; garantizar la sostenibilidad ambiental; examinar las políticas actuales sobre biocombustibles; asegurar el apoyo del sistema internacional al desarrollo sostenible de los biocombustibles.

## V. Conclusiones.

Las energías de fuentes renovables poseen ventajas comparativas relevantes en materia social, económico y ambiental, frente a las energías convencionales no renovables.

Existe suficiente evidencia científica para tener por acreditado que el calentamiento global producto del cambio climático, encuentra entre sus causas las emisiones de gases de efecto invernadero producto de las actividades antrópicas. Es un problema prioritario en la agenda mundial, por lo que Argentina, si bien participa de los países no desarrollados que no han contribuido mayoritariamente al calentamiento global, debe tenerlo como premisa en el diseño de todas sus políticas de estado, entre ellas, la energética. En este sentido, las energías renovables son un camino inexorable si se desea alcanzar el objetivo de reducir las emisiones de GEI.

La Argentina está viviendo una crisis energética considerable. Paso de ser un país exportador a no lograr el autoabastecimiento, comprometiendo su balanza de pagos por la necesidad de importar ingentes cantidades de fuentes de energía fósil.

Argentina cuenta con reservas de hidrocarburos no convencionales (shale gas y shale oil) que la convierten en una potencia mundial en la materia, pero a la vez los distintos climas que posee favorece excepcionalmente el desarrollo de energías renovables. Resulta necesario entonces, repensar el camino a seguir, el cual debe ser debatido en el seno de la sociedad, dando participación a todos los actores vinculados a la temática.

Con el desarrollo en zonas geográficas estratégicas del país de energías renovables como la solar o eólica, se alcanzaría el ansiado autoabastecimiento energético. Además de las condiciones naturales, se cuenta con legislación que impulsa la actividad a través de diversos incentivos y fomentos.

Entre las principales barreras que deben sortearse se encuentran las relacionadas con el desarrollo de tecnología, el económico-financiero (acceso a líneas de crédito, transferencia tecnológica, etc.), las sociales e institucionales.

## Referencias

Asociación Argentina De Energía Eólica (2009). *Potencial de energía eólica en Argentina*: Recuperado de [http://www.argentinaeolica.org.ar/portal/index.php?option=com\\_content&task=blogcategory&id=19&Itemid=49](http://www.argentinaeolica.org.ar/portal/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=19&Itemid=49)

Asociación Argentina De Energía Eólica (2013). *Ranking Mundial 2013*. [http://www.argentinaeolica.org.ar/portal/index.php?option=com\\_content&task=view&id=5019&Itemid=46](http://www.argentinaeolica.org.ar/portal/index.php?option=com_content&task=view&id=5019&Itemid=46)

Centro Estratégico para el Crecimiento y Desarrollo Argentino (2013) *El Status Quo De Las Energías Renovables En Argentina . Análisis De Problemáticas Y Desafíos Para Un Sector Estratégico En El Crecimiento Y El Desarrollo Del País*. Recuperado de <http://www.cecreda.org.ar/index.php/prensa/item/437-el-sector-de-energias-renovables-tiene-en-la-argentina-el-mayor-potencial-de-la-region-CECREDA>

Clabot, Dino L., Cavalli, Luis A., y Pigretti, E. (2011). *Ambiente, Petróleo y Gas*. Buenos Aires, Argentina, Editorial Lajouane, P. 26

Energía Argentina S.A. (2012). *Energía Solar*. Recuperado de <http://www.enarsa.com.ar/index.php/es/energiasrenovables/387-energia-solar>

Energía Biomasa (2012). *Beneficios De La Energía Biomasa*. Recuperado de <http://www.energiabiomasa.org/energia.php?id=93>

España Ríos, I., Belloso Pérez M.E. (1997). *Energías Renovables, Medio Ambiente Y Ordenación Del territorio*. Recuperado de [http://www2.uca.es/escuela/emp\\_je/investigacion/congreso/mcc045.pdf](http://www2.uca.es/escuela/emp_je/investigacion/congreso/mcc045.pdf)

Fernández Muerza, A. (2010). *Biomasa, Una Energía Renovable De Gran Futuro*. Recuperado de [http://www.consumer.es/web/es/medio\\_ambiente/energia\\_y\\_ciencia/2005/12/25/195137.php](http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2005/12/25/195137.php)

Food and Agriculture Organization of The United Nations (2009). *Análisis del Balance de Energía derivada de Biomasa en Argentina - WISDOM Argentina -*. Recuperado de <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/i0900s/i0900s00.pdf>

Food and Agriculture Organization of The United Nations (2008). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*. Recuperado de [http://www.carbio.com.ar/es/pdf/biblioteca/22\\_ElEstadomundial-delaagriculturaylaalimentacion.Biocombustiblesperspectivasriesgosoportunidades\\_FAO.pdf](http://www.carbio.com.ar/es/pdf/biblioteca/22_ElEstadomundial-delaagriculturaylaalimentacion.Biocombustiblesperspectivasriesgosoportunidades_FAO.pdf)

Fundación Vida Silvestre Argentina (2013). *Escenarios Energéticos Para la Argentina (2013-2030) Con Políticas De Eficiencia*. Recuperado de [http://awsassets.wwf.ar.panda.org/downloads/escenarios\\_energeticos\\_para\\_la\\_argentina\\_2013\\_2030\\_con\\_politicas\\_de\\_eficiencia.pdf](http://awsassets.wwf.ar.panda.org/downloads/escenarios_energeticos_para_la_argentina_2013_2030_con_politicas_de_eficiencia.pdf)

Greenpeace (2014). *De la década del carbón al siglo de las energías renovables*. Resultados clave del informe de mitigación del GTIII del IPCC y acciones que Implica. Recuperado de [http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/2014/Report/cambio-climatico/resultados\\_clave\\_IPCC\\_abril\\_2014.pdf](http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/2014/Report/cambio-climatico/resultados_clave_IPCC_abril_2014.pdf)

Intergovernmental Panel on Climate Change (2011). *Fuentes de Energías Renovables y Mitigación de Cambio Climático. Resumen Para Responsables de Políticas y Resumen Técnico*. Recuperado de [https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/srren\\_report\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/srren_report_es.pdf)

International Renewable Energy Agency ( 2009). *Statute of the International Renewable Energy Agency*. Recuperado de [http://www.irena.org/documents/uploadDocuments/Statute/IRENA\\_FC\\_Statute\\_signed\\_in\\_Bonn\\_26\\_01\\_2009\\_incl\\_declaration\\_on\\_further\\_authentic\\_versions.pdf](http://www.irena.org/documents/uploadDocuments/Statute/IRENA_FC_Statute_signed_in_Bonn_26_01_2009_incl_declaration_on_further_authentic_versions.pdf)

Labandeira, Xavier, Linares Pedro y Würzburg Klaas (2012). *Energías Renovables y Cambio Climático*. Recuperado de <http://www.eforenergy.org/docpublicaciones/documentos-de-trabajo/WP06-2012.pdf>

Molina, Alberto C. (2006). *Fundamentos de los Biocombustibles*. Recuperado de [http://www.carbio.com.ar/es/pdf/biblioteca/18\\_FundamentosdelosBiocombustibles.2006.pdf](http://www.carbio.com.ar/es/pdf/biblioteca/18_FundamentosdelosBiocombustibles.2006.pdf)

Naciones Unidas (1992), *Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre El Cambio Climático*. Recuperado de <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>

Paulson jr., H. (2014). *The Coming Climate Crash Lessons for Climate Change in the 2008 Recession*. Recuperado de <http://www.nytimes.com/2014/06/22/opinion/sunday/lessons-for-climate-change-in-the-2008-recession.html?module=Search&mabReward=relbias%3Ar&r=1>

Secretaría de Energía Argentina (2008). *Energías Renovables. Energía Solar*. Recuperado de [http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/contenidos\\_didacticos/publicaciones/libro\\_energia\\_solar.pdf](http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/contenidos_didacticos/publicaciones/libro_energia_solar.pdf)



# Conclusiones Generales

En un contexto de Cambio Climático la búsqueda e implementación de tecnologías para la producción de energías alternativas y para un manejo sustentable del agua es urgente. Aceptar que se vive en un tiempo con recursos naturales cada vez más limitados en acceso, cantidad y calidad, que se suma a condiciones de cambio en el clima favorece la toma de decisiones para el diseño e implementación de medidas de adaptación y mitigación.

En el caso del agua, el Cambio Climático intensifica los problemas existentes de uso del agua desde la captación, la distribución de agua para consumo humano, la necesidad de tratamiento, la contaminación de fuentes de agua y la producción de alimentos, entre otros, los cuales en conjunto debilitan la seguridad hídrica de las naciones. Es por lo anterior que la incorporación de políticas, estrategias, planes y programas gubernamentales basados en estudios hidrológicos avanzados deben constituirse como herramientas clave para la toma de decisiones a nivel local, regional y global.

El Cambio Climático es un fenómeno que agravará la situación actual del recurso hídrico en la zona de vida de bosque tropical seco, en áreas áridas y semiáridas de Mesoamérica, por lo que se deben realizar esfuerzos articulados a diferentes niveles entre los diferentes actores para la implementación de medidas de adaptación acordes con las necesidades poblacionales y de protección al recurso hídrico actual y futuro. Por ejemplo, en el libro se presentan varias tecnologías que se presentan excelentes opciones para resolver problemas relacionados con agua para consumo humano y la diversificación de productos agrícolas a nivel local en épocas donde usualmente no se cultivaba por falta de lluvia; contribuyendo de esta manera con las seguridad alimentaria.

La utilización indicadores de consumo como la Huella Hídrica en diferentes sectores productivos permite conocer cuánto se está utilizando del recurso y cómo se realiza el uso del recurso, para así mejorar las políticas de gestión del recurso hídrico con el fin de implementar medidas de ahorro y uso eficiente del agua. En el sector agrícola este indicador permite conocer la Huella Hídrica de un producto en determinadas zonas geográficas lo que nos provee información de las tendencias de uso y productividad de un cultivo; por ejemplo en zonas con alto uso de riego (Agua azul) debido a una estacionalidad de poca precipitación donde el aprovechamiento sostenible es fundamental.

La contaminación de las aguas superficiales en la mayoría de los ríos costarricenses es deplorable, debido principalmente a una mala planificación territorial y al mal manejo y disposición de las aguas residuales provenientes de las diferentes actividades humanas. Los asentamientos urbanos ocasionan un impacto negativo sobre la calidad de los ecosistemas acuáticos, tal y como se evidenció al aplicar el índice de calidad de áreas ribereñas, Índices de Calidad del Agua y el uso de indicadores biológicos en la subcuenca del Río Liberia, Guanacaste. La evaluación de los ríos implementando planes de monitoreo es primordial para identificar los principales focos de contaminación de manera que de ser identificados y conocer el nivel de impacto se puedan realizar medidas de mejora. Los planes de monitoreo de la calidad del agua evalúa los avances en la Gestión Integral del Recurso Hídrico si es que se realiza en la subcuenca.

La articulación de los diferentes actores involucrados en el uso y manejo del agua con una participación ciudadana y municipal es la vía más segura para observar cambios en la calidad de los cuerpos de agua superficial, de los cuales los seres humanos y la biodiversidad se beneficia de múltiples servicios ambientales de los cuales depende la salud pública e integral de los ecosistemas.

Los nutrientes generados en las aguas residuales constituyen una amenaza importante a las fuentes de aguas superficiales y subterráneas, de aquí la importancia que los sistemas de tratamiento que se



utilicen posean altos porcentajes de remoción. Se presentaron diferentes opciones para la remoción de nutrientes: 1) utilizando humedales artificiales conocidos como tecnologías blandas y 2) el uso de microalgas. El primero utilizando descargas de aguas negras y el segundo tratando diferentes efluente de origen industrial. Ambas tecnologías, demostraron eficiencia alta en la remoción de nutrientes.

El tratamiento de aguas residuales ha evolucionado en las últimas décadas y se encuentran en una constante investigación y búsqueda de tecnologías, materiales y procesos innovadores para la mejora el tratamiento de aguas provenientes de diferentes actividades humanas y la protección de los ecosistemas acuáticos. La variedad de sistemas de tratamiento actual desde convencionales y no convencionales o alternativos son opciones que se pueden adaptar según las necesidades y características de las aguas a tratar.

En el caso de la energía, son múltiples las opciones que se han propuesto para una producción energética alternativa a los hidrocarburos. En Centroamérica, Costa Rica es el país que cuenta con una mayor generación con fuentes renovables, lo cual se ha logrado a través de la ejecución de una política nacional de largo plazo y las instituciones públicas y privadas. Es importante señalar que ha este aspecto político - institucional se le une el potencial apreciable para la generación y la realización de diagnósticos y prospecciones de la producción de energía con fuentes alternativas a los hidrocarburos.

En este libro los autores han señalado la importancia de conservar la capacidad de gestión institucional e incluso fortalecerla para desarrollar procesos de dirección, planificación, ejecución, regulación y evaluación de la innovación y crecimiento de la producción de energía eléctrica con fuentes alternativas. Así mismo, es necesario visualizar posibles escenarios de producción y demanda energética y valorar la posibilidad de suplir este consumo proyectado a través de fuentes renovables. Es importante en este sentido, trabajar en crear las condiciones de mercado para la energía proveniente de estas fuentes, para hacerlas rentables en producción y para su consumo.

Para el CEMEDE e HIDROCEC como los centros de investigación de la Sede Chorotega este espacio que se ha generado para la discusión de la influencia del clima sobre temas fundamentales como es el agua y la energía, es de vital importancia para el desarrollo de la Región y el país y se espera que contribuya a los esfuerzos tendientes al diseño y ejecución de medidas de adaptación y mitigación al cambio climático.















