

SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS Y ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN, USANDO EL MODELO WATER EVALUATION AND PLANNING (WEAP), EN LA CUENCA DE LA REGIÓN YAQUE DEL NORTE DE LA REPÚBLICA DOMINICANA

SIMULATION OF CLIMATE CHANGE IMPACTS ON WATER RESOURCES AND ADAPTATION STRATEGIES, USING THE WATER EVALUATION AND PLANNING MODEL (WEAP), IN THE YAQUE DEL NORTE RIVER BASIN IN THE DOMINICAN REPUBLIC

J. F. Febrillet Huertas¹, S. José Clases¹, L. Bello y J. Chalas¹

Resumen:

Esta investigación presenta los resultados de los supuestos simulados utilizando el modelo Water Evaluation And Planning (WEAP), desarrollado por un equipo de investigadores del Stockholm Environment Institute (SEI), para la Región Yaque del Norte de la República Dominicana, que incluye tres supuestos: que todo permanezca igual a través del tiempo, hasta el 2050; que se produzca una mejora en la eficiencia del riego, por adaptación gradual de tecnología que ahorre el recurso agua; y de cambio climático a través del efecto del cambio gradual en la precipitación, temperatura y humedad relativa a largo plazo. Para la simulación del cambio climático, se eligió un escenario de clima moderado, que predice una tendencia a disminuir la precipitación anual en un 10% y un aumento de la temperatura entre 1.2 y 2.2 °C, para el 2100. Los resultados del estudio indican que las demandas de agua en el escenario de cambio climático ascienden a unos 3,517 MMC, con un incremento de la demanda de unos 1000 MMC aproximadamente, comparado con el escenario sin cambio climático, lo que muestran que la región Yaque del Norte es sensible a dichos cambios y que deben realizarse medidas de adaptación urgentes para mitigar los cambios que podrían producirse.

Palabras clave: cambio climático, conservación, recursos hídricos, protección, República Dominicana.

Abstract:

This research paper presents the results of creating a model for the Yaque del Norte River Basin in the Dominican Republic using the Water Evaluation and Planning System (WEAP), which was developed by a team of researchers from the Stockholm Environment Institute (SEI). For this study three scenarios were developed: 1) everything stays the same over time until the year 2050; 2) an improvement in irrigation efficiency will take place by gradual use of water saving technologies; and 3) climate change impact through the effects of the gradual change in rainfall, temperature and relative humidity over time. For the simulation of climate change, a scenario of moderate climate, which predicts a decreasing trend of annual precipitation by 10% and an increase in temperature between 1.2 and 2.2 °C, was chosen for the year 2100. The results of the study indicate that water demands in the climate change scenario amount to almost 3,517 MMC, an increase in demand of about 1000 MMC, compared to the scenario without climate change. Thus this shows that the Yaque del Norte River Basin is sensitive to such changes and urgent adaptation measures should be undertaken to mitigate the changes that may occur.

Keywords: climate change, conservation, water management, protection, Dominican Republic.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático presenta una importante amenaza para todas las regiones del mundo y algunos de los efectos mundiales que afectarán a la República Dominicana incluyen el aumento de la temperatura media de 1.1°C a 4.5°C, como ha predicho el Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático para el 2100. (IPCC, 2007).

Las modificaciones en los patrones de precipitación, en cantidad e intensidad principalmente, son una realidad evidente en los recursos hídricos disponibles en la República Dominicana, produciéndose con más frecuente lluvias torrenciales y de corta duración. (INDRHI, 2012. Plan Hidrológico Nacional. Santo Domingo, República Dominicana).

¹ Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos
Centro para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos en los Estados Insulares del Caribe
Ave. Jiménez Moya esq. Juan de Dios Ventura Simo, Centro de los Héroes, Santo Domingo, República Dominicana
jfebril@gmail.com

La Región hidrográfica Yaque del Norte es la más importante del país, con un área de 7,053 km², está formada por tres cuencas correspondientes a los ríos: Yaque del Norte que es el principal, Masacre y Chacuey, además incluye una porción de área de la cuenca costera de Monte Cristi. Esta región posee una gran red fluvial integrada por diversos ríos que atraviesan zonas montañosas muy húmedas y una región sumamente árida como la línea Noroeste, cuyo desarrollo depende básicamente del aprovechamiento de sus aguas, Fig. 1. El río Yaque Del Norte constituye el cauce principal de la Cuenca y junto a sus afluentes drena la vertiente norte de la Cordillera Central y la meridional de la Cordillera Septentrional, haciendo un recorrido de 253 Km. hasta su desembocadura en las bahía de Monte Cristi.



Figura 1. Regiones hidrográficas de la República Dominicana.

Fig. 1. Watershed Regions of the Dominican Republic

Por tanto, el cambio climático puede ser considerado como uno de los principales riesgos que la sociedad tiene que abordar en el futuro. Teniendo en cuenta todos estos aspectos, el gobierno dominicano tomó la iniciativa de realizar este proyecto que tuvo por fin de investigar los efectos más relevantes a ocurrir en los próximos 50 años y sugerir diferentes estrategias de adaptación que podrían incluirse en las políticas de tomas de decisiones y propuestas técnicas para la gestión de las infraestructuras físicas de agua como presas, embalses y sistemas de alcantarillado, de la región Yaque del Norte.

MARCO FÍSICO Y SOCIOECONÓMICO

La República Dominicana, con 48,670.82 km², se localiza en la isla Española, la que comparte con la República de Haití, está ubicada en el archipiélago de las Antillas Mayores, conformado además por Cuba, Puerto Rico y Jamaica. Su sistema orográfico es complejo y está formado por cinco sistemas montañosos, orientados noroeste-sureste

preferentemente, con oscilaciones de 46 m.b.n.m., en el Lago Enriquillo, hasta 3,175 m.s.n.m., en el pico Duarte. Las llanuras del país ocupan el 40% del territorio.

Esta situación hace que su clima tropical presente variaciones, con características propias en función de su ubicación y su exposición a los vientos alisios predominantes en la zona. La temperatura media anual es de 25.4°C, con oscilaciones entre 28°C y 33°C para la máxima y entre 16°C y 20°C para la mínima,

La precipitación media anual es de unos 1,500 mm, con oscilaciones desde 313 mm/a en las zonas secas, a más de 2795 mm/a en las zonas húmedas.

PROCEDIMIENTO (METODOLOGÍA)

Para la ejecución del proyecto fue utilizado el modelo Water Evaluation And Planning (WEAP), (<http://www.weap21.org>), desarrollado por un equipo de investigadores del Stockholm Environment Institute (SEI), el cual es una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos que proporciona un marco comprensivo, flexible y de fácil uso para la planificación y análisis de políticas.

Para la simulación hidrológica, WEAP incluye una serie actividades básicas que incluyen:

- Delimitación de fronteras temporales y espaciales (ver Fig. 2).
- Análisis de demanda.
- Análisis de información hidrológica y climatológica.
- Recursos hídricos e infraestructura.
- Calibración.
- Evaluación de escenarios-

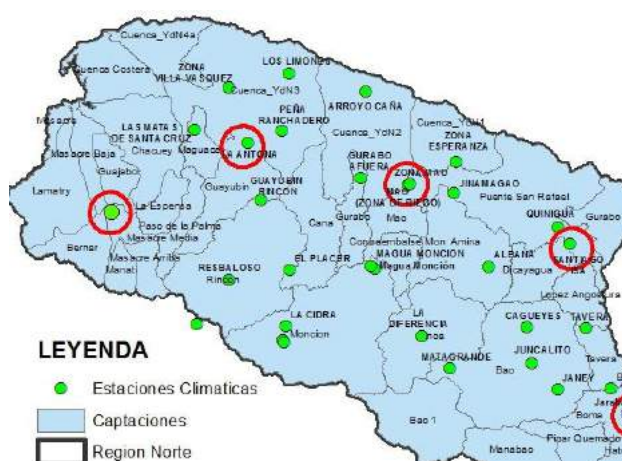


Figura 2. Captaciones y estaciones climáticas, región Yaque del Norte

Fig. 2. Catchments and climatic station, Yaque del Norte region

Durante la ejecución del proyecto se realizaron viajes de investigación a la zona de estudio, para adecuar las informaciones obtenidas de los shapefile, sobre

cobertura y uso del suelo, así como situación actual de las fuentes de agua potable, su procedencia y efectividad.

Además se realizó un levantamiento de la información básica y se establecieron las características climáticas, hidrológicas, de uso de suelo, de demanda de agua de la cuenca y sus infraestructuras. Esto incluye:

- Ubicación cuenca en hoja topográfica, capas SIG (dibujar red, Ver Fig. 3, 4 y 5).
- Definir tiempo de modelaje (período).
- Selección de las estaciones de aforo y sus series a nivel mensual.
- Selección de las estaciones de aforo y sus series a nivel mensual.
- Selección de las estaciones climáticas y las series a nivel mensual de lluvia, ETref., temperatura máxima y mínima, humedad relativa, viento, latitud en grados.
- Ciudades, ubicación y población a que año.
- Consumo: demanda en ciudades y rural.
- Tasa crecimiento población.
- Áreas de riego y secano, productos y consumo. (Distribución de la demanda)
- Definir captaciones.
- Uso del suelo (área, coef. cultivo, etc. Datos relacionados)
- Embalses actuales y futuros (nombre, capacidad, etc).
- Hidroeléctrica y su generación (datos) y Centrales de pasada.
- Calidad de agua (si procede) sobre Temp. TSS, Sal, BDO, OD. (información relacionada) y Planta de tratamiento (datos).

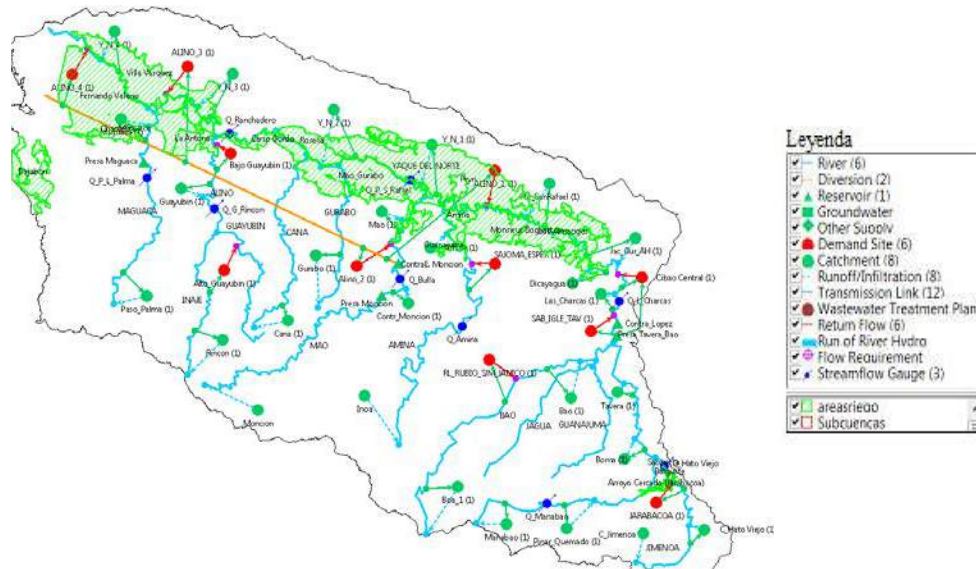


Figura 3. Esquema de la cuenca del Yaque del Norte
Fig. 3. Yaque del Norte basin outline

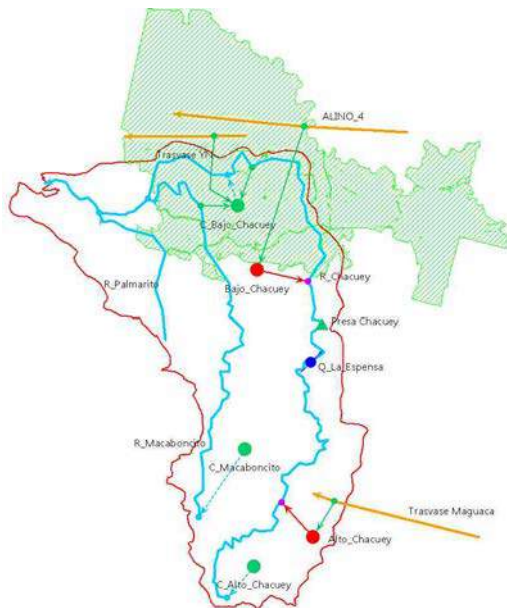


Figura 4. Esquema río Chacuey
Fig. 4. Chacuey river outline

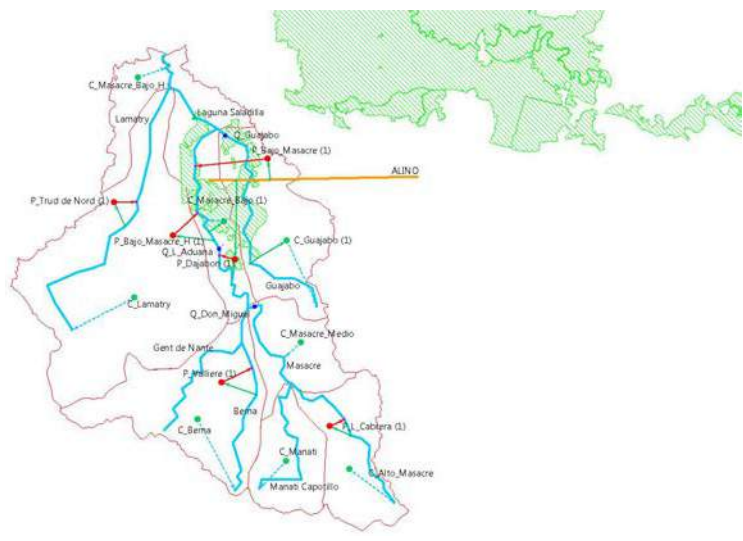


Figura 5. Esquema río Masacre
Fig. 5. Masacre river outline

DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES ACTUALES:

Inicialmente se determinan las condiciones actuales y se calibra el modelo antes de la suposición de escenarios.

WEAP modela los siguientes componentes del balance hidrológico: evapotranspiración, infiltración, escorrentía superficial, flujo horizontal entre capas, y flujo base. Para ello requiere ser alimentado con las siguientes informaciones climáticas: precipitación, temperatura, humedad relativa, y velocidad de viento. Además, requiere datos de caudales en estaciones de medición de las cuencas para poder validar los resultados modelados y ajustar su calibración.

Para la calibración de la precipitación, de la cuenca Yaque del Norte se utilizó el período 1968 a 1998 de las estaciones climáticas base Jarabacoa, Santiago, Mao, La Antona y Don Miguel (Fig: 2); para la cuenca del Chacuey se utilizó la serie 1974 a 1990 de Don Miguel y para la cuenca del Masacre de 1974 a 1990 de Don Miguel. Estos datos fueron ajustados por un factor de ponderación para cada captación empleando la precipitación anual y la isoyeta ponderada en el centroide de la captación.

Los datos de temperatura fueron obtenidos para cada captación usando los datos de las estaciones base señaladas anteriormente modificado por un delta de temperatura estimado para cada captación considerando un cambio de temperatura adiabático en función de la altura equivalente a 5.5 °C por cada 1000 m de elevación, Fig. 6.

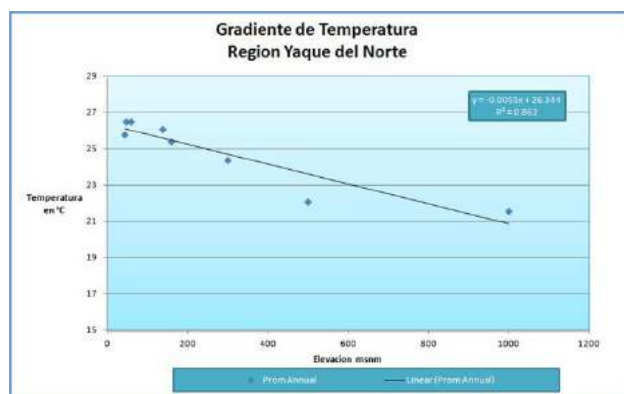


Figura 6. Gradiente temperatura Región Yaque del Norte

Fig. 6. Temperature gradient of Yaque del Norte región

Para la humedad relativa se utilizaron las variaciones medias mensuales de las estaciones base de referencia, al igual que para los datos de viento y evaporación. La latitud promedio de cada captación fue estimada usando ArcMap.

Se desarrolló una caracterización de la demanda actual del agua, las cargas de contaminantes, los ríos, recursos y las fuentes para el sistema.

Para definir el uso de los suelos se utilizaron los shape file disponibles (2003) y se corrigieron con las visitas al campo. Para cada captación se definieron las siguientes coberturas vegetales agrupadas de la siguiente manera:

1. Bosque conífero
2. Bosque latifoliado
3. Bosque seco
4. Matorral
5. Pasto natural y sabana
6. Arroz
7. Plátano
8. Café y cacao
9. Caña
10. Cultivos mixtos
11. Cultivos intensivos
12. Palma africana y coco
13. Poblados
14. Agua manglar humedales
15. Escasa vegetación y otros

Y se alimentaron con los parámetros presentados en el Tabla 1.

Los parámetros de población fueron obtenidos del IX Censo Nacional de Población y Vivienda 2010, Tabla 2, pero teniendo en cuenta que la tasa de crecimiento de la población en la región fue inferior a la unidad y en algunos casos negativa, decidimos utilizar la tasa media nacional de 1.21.

Para los embalses y su generación se emplearon los parámetros mostrados en la Tabla 3.

Con esta información WEAP traduce la precipitación a escorrentía superficial, flujos inter superficiales y flujos bases (Fig. 7) mediante la entrada de los datos climatológicos y de cobertura vegetal para estimar estos componentes del balance hidrológico para cada una de las captaciones.

Desde el almacenamiento superior ocurre la escorrentía como flujo directo, superficial e intermedio, mientras que el flujo base se origina solo desde el almacenamiento inferior. En la figura tenemos que:

P = precipitación

Et = evapotranspiración

Pe = precipitación efectiva

Sw = capacidad de almacenamiento superior (zona de raíces)

Dw = capacidad de almacenamiento inferior (zona profundas)

Z1 = promedio a largo plazo del almacenamiento en la zona de raíces (porcentaje de la capacidad total disponible; % of Sw)

Z2 = promedio a largo plazo del almacenamiento en la zona profunda (porcentaje de la capacidad total disponible; % of Dw)

Tabla 1. Parámetros asociados a los cultivos

Table 1. Farming associated parameters

Tipo Cobertura Vegetal	Kc	Sw	LAI	Riego mensual	Umbral Máximo	Umbral Mínimo
		(mm)				
Bosque conífero	1	750	5	na	na	na
Bosque latifoliado	Jan, 0.7, Feb, 0.8, Mar, 0.9, Apr, 1, May, 1.1, Jun, 1.1, Jul, 1.1, Aug, 1.1, Sep, 1, Oct, 0.9, Nov, 0.8, Dec, 0.7	500	5	na	na	na
Bosque seco	Jan, 0.7, Feb, 0.8, Mar, 0.9, Apr, 1, May, 1.1, Jun, 1.1, Jul, 1.1, Aug, 1.1, Sep, 1, Oct, 1.0, Nov, 0.9, Dec, 0.8	1000	5	na	na	na
Matorral	1	490	3	na	na	na
Pasto natural y sabana	1	950	3	na	na	na
Arroz	0,9	500	4	100	100	90
Plátano	Jan, 1, Feb, 1.1, Mar, 1.2, Apr, 1.2, May, 1.2, Jun, 1.1, Jul, 1.1, Aug, 1.1, Sep, 1.1, Oct, 1.1, Nov, 1.1, Dec, 1.1	450	4	100	90	70
Café y cacao	1,1	500	4	na	na	na
Caña	Jan, 1.3, Feb, 1.3, Mar, 1.3, Apr, 1, May, 0.8, Jun, 0.8, Jul, 0.8, Aug, 0.8, Sep, 0.8, Oct, 0.8, Nov, 0.8, Dec, 1.3	1000	4	100	60	40
Cultivos mixtos	Jan, 0.8, Feb, 0.8, Mar, 0.8, Apr, 0.9, May, 1, Jun, 1, Jul, 1, Aug, 1, Sep, 0.8, Oct, 0.8, Nov, 0.8, Dec, 0.8	700	4	Jan, 0, Feb, 0, Mar, 100, Apr, 100, May, 100, Jun, 100, Jul, 100, Aug, 100, Sep, 100, Oct, 100, Nov, 100, Dec, 0	70	50
Cultivos intensivos	Jan, 0.8, Feb, 1.2, Mar, 1.2, Apr, 1.1, May, 1.1, Jun, 0.8, Jul, 0.8, Aug, 0.8, Sep, 0.8, Oct, 1.2, Nov, 1.1, Dec, 1.1	500	4	Jan, 100, Feb, 100, Mar, 100, Apr, 100, May, 100, Jun, 100, Jul, 0, Aug, 0, Sep, 100, Oct, 100, Nov, 100, Dec, 100	75	50
Palma africana y coco	1	550	4	100	65	50
Poblados	1	600	2	na	na	na
Agua manglar humedales	1,1	130	5	na	na	na
Escasa vegetación	1	250	1,6	na	na	na

Tabla 2. Tasa de crecimiento media anual por provincia 2002 a 2010

Table 2. Average annual growth rate by province 2002 to 2010

Provincia	Población 2002	Población 2010	Tasa media en %
Santiago	908.250	963.040	0,728
Dajabón	62.046	63.955	0,364
Valverde	158.293	163.030	0,364
La Vega	385.101	394.205	0,288
Monte Cristi	111.014	109.607	-0,157
Santiago Rodríguez	59.629	57.476	-0,452

Tabla 3. Parámetros de embalses y generación

Table 3. Reservoir and electricity generation parameters

Nombre	Tavera-Bao	Monción	Contraembalse M	Lopez-Angostura
Capacidad, Mm3	300	345	7,49	4,4
Vol. Inicial, Mm3	250	250	6	2,5
Curva h-V	0, 260, 1.3, 270, 3.1, 275, 7.2, 280, 15.1, 285, 26.1, 290, 40.6, 295, 59.9, 300, 84.6, 305, 115.4, 310, 153.8, 315, 200.9, 320, 256.8, 325, 287.8, 327.5, 321.2, 330	0, 178, 0.34, 186, 1.08, 192, 3.26, 200, 5.71, 205, 9.32, 210, 14.4, 215, 21.14, 220, 41.77, 230, 74.29, 240, 120.58, 250, 182.53, 260, 262.15, 270, 341.11, 278, 478.12, 290, 615.887, 300	0, 106, 1.521, 115, 2.348, 117, 3.451, 119, 4.83, 121, 6.511, 123, 8.587, 125, 11.052, 127, 13.797, 129, 15.258, 130	0, 208, 0.1, 210.5, 0.2, 212, 0.44, 214, 0.77, 216, 1, 217, 1.26, 218, 1.6, 219, 1.94, 220, 3.05, 222.5, 3.3, 223, 3.84, 224, 4.4, 225, 4.9, 226, 4.9, 226, 5.4, 227
Evaporación. Neta, mm	0.7*Evaporación Tavera	0.7*Evaporación Mao	0.7*Evaporación Mao	0.7 *Evaporación Tavera
Vol. Conservación, Mm3	200	280	6	3
Vol. Amortiguamiento, Mm3	115	150	4	2
Vol. Inactivo, Mm3	26	25	2	1
Coefficiente. Buffer	0,5	0,6	0,8	0,8
Flujo mínimo, m3/s	23,6	24	12,42	20
Flujo máximo, m3/s	62	45,8	24	56,7
Altura de carga, m	110	124	15	51
Factor de planta, %	72,7	89,5	74	66,67
Eficie. Generación, %	100	100	91	94,5
Acueducto, m3/s	5	3,1		1,5

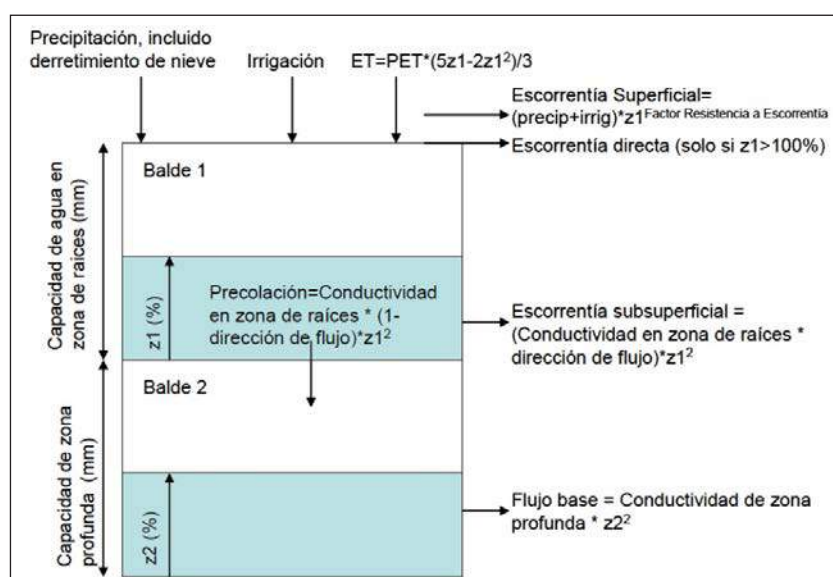


Figura 7. Esquema estilizado de los elementos hidrológicos modelados en WEAP

Fig. 7. WEAP modelled water elements outline

CALIBRACIÓN

Alimentado el modelo con la información actual y requerida por el mismo, se procedió realizar sus corridas y a verificar la bondad de la calibración hidrológica comparando los valores simulados con los reales para las siguientes localidades:

Caudales en las siguientes cuencas aportantes:

- Río Yaque del Norte (Estación Manabao)
- Río Jimenoa (Estación Hato Viejo)
- Río Amina (Estación Amina)
- Río Mao (Estación Bulla)
- Río Guayubín (Estación Rincón)
- Río Maguaca (Estación Las Palmas)

Caudales aguas debajo de embalses y puntos de descarga de agua a canales de regadío

- Río Yaque del Norte (Estación Las Charcas)
- Río Yaque del Norte (Estación Puente San Rafael)
- Río Yaque del Norte (Estación Pena Ranchadero)
- Río Yaque del Norte (Estación Palo Verde)

Nivel de agua almacenado en embalse:

- Tavera-Bao
- Contraembalse López
- Presa de Monción
- Contraembalse de Monción
- Presa Maguaca

El objetivo del proceso de calibración fue optimizar los resultados del modelo para obtener patrones de flujo mensual correctos y los valores de caudal total por año producidos por el modelo lo más cercanos posible a los valores reales de acuerdo con las estaciones de medición de caudales.

RESULTADOS

Resultados de la calibración

Cuenca Río Yaque del Norte

El primer paso, para el proceso de afinamiento requerido para lograr la mejor calibración del modelo posible fue comparar caudales modelados vs. reales en las subcuencas de la cabecera de los ríos.

En la cuenca del río Yaque del Norte se observó que los patrones mensuales de los caudales

En la cuenca del río Yaque del Norte se observó que los patrones mensuales de los caudales seguían el patrón real, Fig. 8 (a título de ejemplo), sin embargo los caudales modelados resultaron ligeramente mayores que los caudales reales reportados en las estaciones de medición Manabao río Yaque del Norte, Hato Viejo río Jimenoa, Amina río Amina, Bulla río Mao, Rincón río Guayubín, Paso Las Palmas río Maguaca. (Tabla 4).

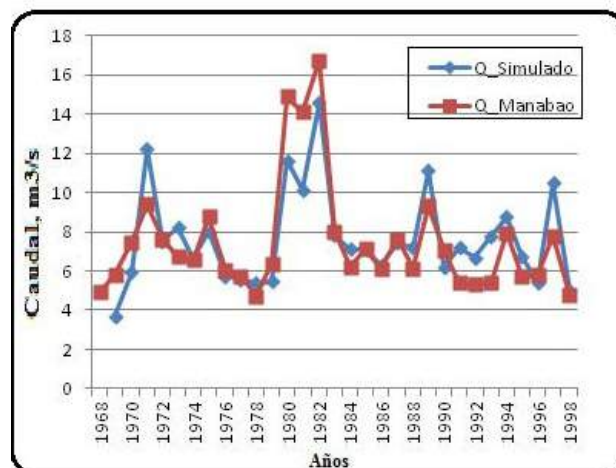


Figura 8. Caudales mensuales reales (azul) y modelados (rojo) en cuenca alta, río Yaque del Norte

Fig. 8. High basin real (blue) and modelled (red) monthly flow, Yaque del Norte River

Tabla 4. Comparación caudales medios multianuales, cuenca alta Yaque del Norte (m³/s)

Table 4. Yearly average flow comparison, Yaque del Norte high basin

Río	Estación	Modelado (m ³ /s)	Real (m ³ /s)	Modelado/Real
Yaque del Norte	Manabao	7.49	7.44	1.0066
Jimenoa	Hato Viejo	6.84	6.74	1.0147
Amina	Amina	7.45	7.39	1.0097
Mao	Bulla	19.73	19.33	1.0206
Guayubín	Rincón	9.53	9.50	1.0036
Maguaca	P_L_Palma	2.62	2.60	1.0083

Calibrados los caudales de la cabecera, el siguiente paso fue comparar los caudales modelados vs. reales en las subcuencas de la parte media y baja de los ríos, tabla 5. En general los caudales modelados

también siguieron el patrón mensual de los caudales reales, Fig. 9 y 10. En cuanto a la magnitud de los caudales modelados en la porción occidental de la cuenca resultaron menores que los caudales reales.

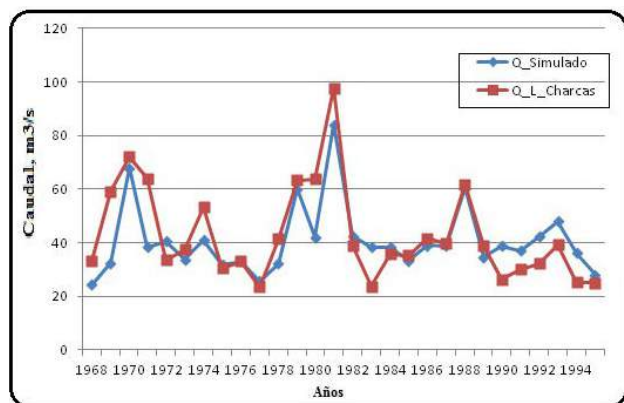


Figura 9. Caudales mensuales reales (azul) y modelados (rojo) en cuenca media río Yaque del Norte.

Fig. 9. Hig basin real (blue) and modelled (red) monthly flow, Yaque del Norte River.

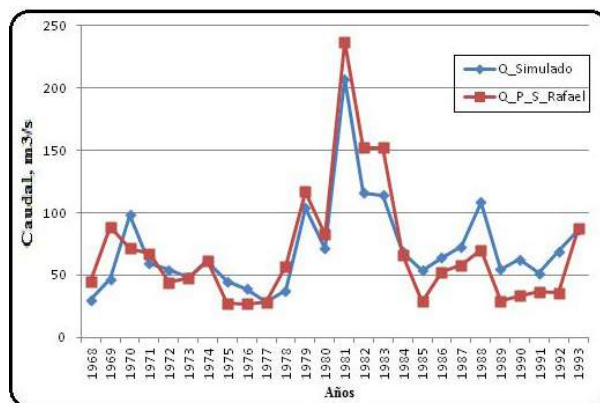


Figura 10. Caudales mensuales reales (azul) y modelados (rojo) en cuenca baja río Yaque del Norte.

Fig. 10. Low basin real (blue) and modelled (red) monthly flow, Yaque del Norte River.

Tabla 5. Comparación caudales medios multianuales, cuenca baja Yaque del Norte (m³/s)

Table 5. Yearly average flow comparison, Yaque del Norte low basin

Río	Estación	Modelado (m ³ /s)	Real (m ³ /s)	Modelado/Real
Yaque del Norte	Las Charcas	41.65	40.97	1.0165
Yaque del Norte	Puente San Rafael	63.45	61.20	1.0368
Yaque del Norte	Ranchadero	59.17	59.71	0.9909
Yaque del Norte	Palo Verde	64.84	65.19	0.9946

Cuenca Río Chacuey

En la cuenca del río Chacuey solo existe un lugar de control en la estación hidrométrica La Espensa y en el embalse de Chacuey.

Esa estación de medición actualmente no existe y sus datos son dudosos por los numerosos cambios de la sección de medición, sin sección de control ni aforos sistemáticos para corregir la curva de calibración. Por tanto los valores presentados en la Tabla 6, son solamente una guía de lo que sucede en la cuenca.

Tabla 6. Comparación caudales medios multianuales, cuenca río Chacuey (m³/s)

Table 6. Yearly average flow comparison. Chacuey River basin

Río	Estación	Modelado (m ³ /s)	Real (m ³ /s)	Modelado/Real
Chacuey	La Espensa	1.32	1.31	1.0076

Cuenca Río Masacre

En la cuenca del río Masacre existe tres lugares de control en las estaciones hidrométricas Don Miguel,

La Aduana y Carbonera, ubicado en el afluente del Masacre, Guajabo.

En general los caudales modelados siguieron el patrón mensual de los caudales reales. En cuanto a la magnitud de los caudales modelados en la cuenca resultaron mayores que los caudales reales. (Tabla 7, Fig. 11 y 12).

Los caudales del Río Guajabo en Carbonera fue generada de forma sintética, con una serie muy pequeña anteriores al período de calibración, mientras que en la captación se generaron valores con datos reales correspondientes al período de calibración, siendo esta la razón por la cual los caudales reales y observados difieren notablemente.

Tabla 7. Comparación caudales medios multianuales, cuenca río Masacre (m³/s)

Table 7. Yearly average flow comparison, Masacre River basin

Río	Estación	Modelado (m ³ /s)	Real (m ³ /s)	Modelado/Real
Masacre	Don Miguel	4.2930	4.2654	1.0065
Masacre	La Aduana	8.0574	8.0095	1.0060
Guajabo	Carbonera	0.3891	0.3857	1.0088

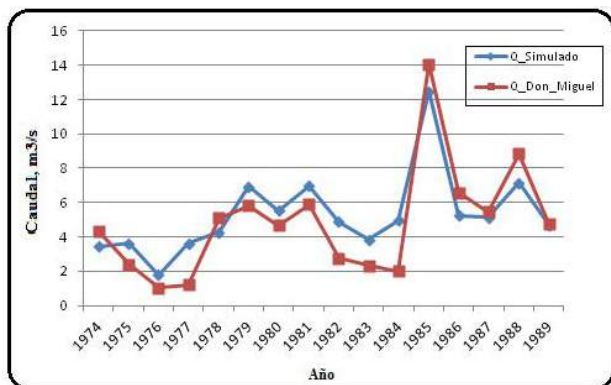


Figura 11. Caudales mensuales reales (azul) y modelados (rojo), Masacre en Don Miguel

Fig. 11. Real (blue) and modelled (red) monthly flow, Masacre River at Don Miguel

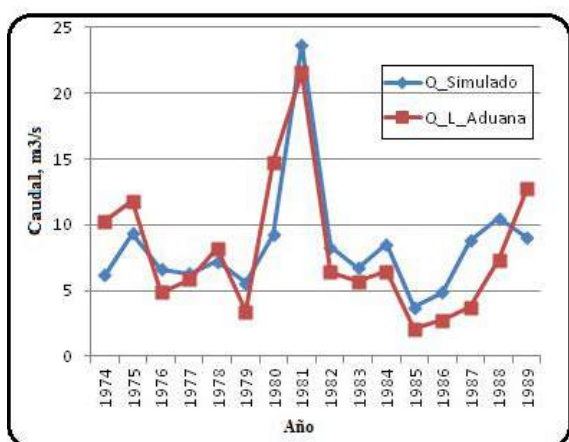


Figura 12. Caudales mensuales reales (azul) y modelados (rojo), Masacre en La Aduana

Fig. 12. Real (blue) and modelled (red) monthly flow, Masacre River at La Aduana

EVALUACIÓN DE ESCENARIOS

Calibrado el modelo para la región completa se procede a realizar una serie de estudios específicos, relacionados con la evaluación de diferentes escenarios potenciales futuros. Los escenarios futuros considerados fueron:

- Escenarios de crecimiento a largo plazo.
- Escenarios de uso de suelo.
- Escenarios de cambio climático.

Bases metodológicas escenarios futuros

Escenarios de crecimiento a largo plazo

El primer supuesto es considerar que todo permanece igual a través del tiempo del punto de vista de uso del suelo y se proyecta dicha situación hasta el 2050. Luego se comparan los resultados para determinar los principales problemas que esta situación produce.

Escenarios de uso de suelo

El segundo supuesto es considerar una mejora en la eficiencia del riego, por adaptación gradual de tecnología que ahorre el recurso agua, y se analizan sus resultados proyectados al 2050.

Escenarios de cambio climático

El tercer supuesto son los escenarios de cambio climático y su efecto a largo plazo. Se simularon cambios en la precipitación, temperatura y humedad relativa.

Descripción de los escenarios de cambio climático

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), en su Artículo 1, define el cambio climático como atribuible 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 comparables.

Se han analizados seis familias de escenarios SRES (Special Reports on Emission Scenarios) y el informe AR4 provee las temperaturas proyectadas y el aumento en los niveles del mar para cada familia de escenarios. Fig. 13.

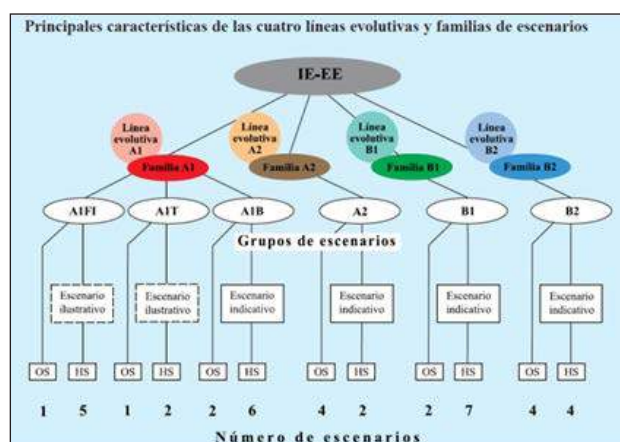


Figura 13. Familias de escenarios de cambio climático

Fig. 13. Weather changes Scenarios

Resumiendo:

Los grupos A, ponen énfasis en la riqueza humana. En A1, globalizado e intensivo, predominan las fuerzas del mercado; en A2, regional e intensivo predomina el golpeo de las civilizaciones.

Los grupos B, ponen énfasis en la sostenibilidad y la equidad. En B1, globalizado y extensivo, predomina el desarrollo sostenible; en B2, regional y extensivo, predomina la bolsa verde, Tabla 8.

Tabla 8. Resumen de los Escenarios del IPCC

Table 8. IPCC Scenarios summary

Enfoque	Más económico	Más medioambiental
Globalizado (mundo homogéneo)	A1 crecimiento económico rápido (grupos: A1T; A1B; A1FI) 1.4 - 6.4 °C	B1 sostenibilidad del medio ambiente mundial 1.1 - 2.9 °C
Regional (mundo heterogeneo)	A2 orientación regional desarrollo económico 2.0 - 5.4 °C	B2 sostenibilidad del medio ambiente local 1.4 - 3.8 °C

Debe tenerse en cuenta que para remover el dióxido de carbono antropogénico del pasado y futuro se requiere más de un milenio, por lo que continúan contribuyendo al calentamiento global.

Para las proyecciones de precipitación y temperatura en la región Yaque del Norte, se utilizaron los escenarios de emisión de gases; A2, en el cual las emisiones continúan aumentando continuamente y B1 en que las emisiones comienzan a disminuir a partir del 2050, basados en los resultados obtenidos por la Dra. Claudia León de Riverside, para dicha región, Fig. 14. Utilizamos el escenario de clima moderado, debido a los resultados presentados por la Dra. Michela Izzo en su trabajo Tendencias climáticas históricas en la República Dominicana y vulnerabilidad del territorio frente al cambio climático, julio 2013, en que demuestra que la temperatura se está incrementando en todo el territorio nacional, aunque la temperatura máxima está creciendo

menos que la mínima. (En el período 1936-2007, $+3.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ para la temperatura mínima y $+1.8 \pm 0.4^\circ\text{C}$ para la máxima), y las precipitaciones presentan un comportamiento menos uniforme, dependiendo su tendencia de la posición del lugar dentro del país.

Los resultados de la Dra. Claudia León, de Julio 2013, en su trabajo Selección de proyecciones de cambio climático, para la República Dominicana, Fig. 14, fueron:

- Clima seco y cálido. Disminución de la precipitación anual de 30% a 40% y aumento de la temperatura entre 2.6 y 3.7 °C
- Clima moderado. Disminución de la precipitación anual 10% y aumento de la temperatura entre 1.2 y 2.2 °C
- Clima húmedo y cálido. Aumento de la precipitación anual de 8% a 20% y aumento de la temperatura entre 1 y 3 °C

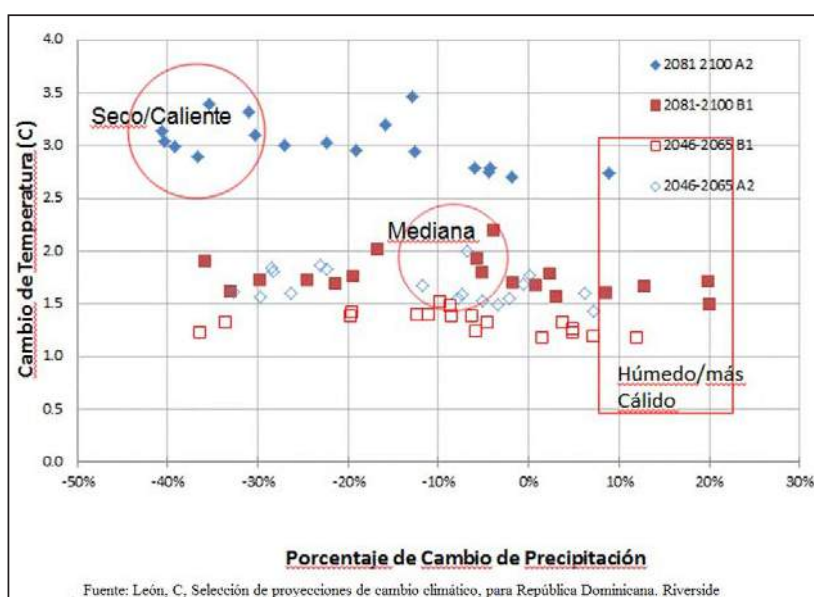


Figura 14. Variabilidad anual temperatura y precipitación

Fig. 14. Yearly temperature and rain variability

En base a los resultados de la Dra. Claudia León de Riverside, en su trabajo "Selección de Proyecciones de Cambio climático, para la República Dominicana", Julio 2013, se ha elegido el escenario de clima moderado, que predice una tendencia a disminuir la precipitación anual en un 10% y un aumento de la temperatura entre 1.2 y 2.2 °C, para el 2100.

La selección utilizada es similar a los resultados presentados en la "Segunda Comunicación Nacional, Proyecto Cambio Climático 2009, de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales y el Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo, PNUD, utilizando los ECH98 y PRECIS, que predice un descenso general de la precipitación de un 5% para el 2050 y un incremento de la temperatura entre 0.6 y 0.7°C.

RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS

Presentamos los resultados de los supuestos simulados con el programa del modelo de recursos hídricos en la plataforma WEAP, Water Evaluation And Planning, para la Región Yaque del Norte de la República Dominicana, que incluye tres supuestos: que todo permanezca igual a través del tiempo, hasta el 2050; que se produzca una mejora en la eficiencia del riego, por adaptación gradual de tecnología que ahorre el recurso agua; y de cambio climático a través del efecto del cambio gradual en la precipitación, temperatura y humedad relativa a largo plazo.

Escenario de crecimiento a largo plazo (2015 a 2050)

En este escenario no se contemplo cambios de uso del suelo, debido a una falta de política estatal que defina y especifique un real cambio de uso del suelo. Por lo que haber realizado estas asunciones se arrojarían resultados erróneos ya que se basarían en hipótesis irreales.

El suministro a los acueductos resultó ser adecuado, para el riego se observan algunas áreas con problemas, con déficit medio mensual de 56 MMC para el Yaque del Norte, 0.24 MMC para la cuenca del Chacuey y 0.78 MMC para la cuenca del Masacre.

Escenario mejoramiento del riego

El principal usuario del agua en la región Yaque del Norte es la agricultura y por tanto para mejorar el uso del agua en la cuenca debemos realizar actividades que optimicen el uso del recurso en este usuario, ya que se necesita expandir la producción agrícola, para sostener el desarrollo, y para ello se necesitan nuevas áreas de producción y como consecuencia, una presión mayor sobre el recurso. La información básica de este punto fue obtenida de

los resultados del Plan Hidrológico Nacional, debido a la confiabilidad de las mismas, (INDRHI, 2012).

Del Plan Hidrológico Nacional tenemos las áreas potenciales a ser incorporadas al riego de la región, que ascienden a unas 5,318 hectáreas, adicionales para el 2050.

Para realizar esta expansión es necesario mejorar la eficiencia del uso del recurso en dichas áreas, teniendo en cuenta que las pérdidas en los sistemas de conducción se deben a filtraciones y evaporación; que las pérdidas en la aplicación del riego en las parcelas, se deben al viento, a la evaporación y al drenado; y que las pérdidas en el suelo, al agua en exceso que el cultivo no puede aprovechar.

Por tanto es necesario reducir dichas pérdidas, incrementando la eficiencia de riego. El incremento de la eficiencia en los sistemas de riego incide positivamente en el ahorro de los volúmenes de agua aplicados a las parcelas, lo que produce una disminución de la recarga al nivel freático, con los resultados favorables que esto significa de evitar la degradación de los suelos por problemas de drenaje y salinidad.

Para simular los cambios en la eficiencia con el modelo WEAP se usó 21 % como línea base de eficiencia global de riego promedio en los sistemas de riego ubicados en las cuencas Yaque del Norte, Chacuey y Masacre. Este valor inicial fue obtenido en base a evaluaciones previas realizadas por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI) en el 2010, como parte de sus funciones del manejo del agua de riego a nivel nacional. Partiendo de esta premisa y considerando los trabajos de mejoramiento de la infraestructura física que realiza el INDRHI en estos sistemas de riego, a través del proyecto de Recuperación de Emergencia y Gestión de Riesgo por Desastres Naturales, préstamo BIRF-7546-DO, con fondos del Banco Mundial, se estima que se producirá una mejoría en la eficiencia global promedio de riego de un 25 %, lo que arroja una eficiencia mejorada ascendente a 46 %. Esto además, será favorecido por actividades continuas de capacitación de los agricultores a los fines de mejorar los umbrales de aplicación del agua de riego a las parcelas. Es importante destacar que no se vislumbra políticas públicas estatales en el sub sector riego tendente a cambiar áreas significativas de riego por superficie a riego presurizado.

Por lo que para simular estos cambios en la eficiencia, en el modelo WEAP, se procedió a cambiar las pérdidas de conducción a nivel de canales principales y red de distribución, y los umbrales de riego aplicados, observándose una reducción en los volúmenes derivados para satisfacer la demanda agrícola de riego de 3,493.22 MMC a 2,624.28 MMC, lo que representa una economía del orden de 869 MMC.

Escenario de cambio climático

Para las corridas correspondientes al cambio climático, se analizaron los tres (3) escenarios modelados por la Dra. Claudia de León, Julio 2013, y se seleccionó el correspondiente a clima moderado, por ser el más adecuado a suceder en virtud a la posición de la isla y visto también los estudios realizados en el país por la Dra. Michella Izzo en su trabajo "Tendencias Climáticas Históricas en la República Dominicana y Vulnerabilidad del Territorio frente al Cambio Climático, Julio 2013, el modelo WEAP fue ajustado introduciendo el incremento de la temperatura en 1.2°C, la reducción de la precipitación y la humedad relativa en 10%, generándose las series correspondientes. Posteriormente fueron ajustados dentro de WEAP, de acuerdo a los mismos factores de ajuste para cada captación empleada en el escenario de línea base.

Para la cuenca del Yaque del Norte, en los resultados de la demanda no satisfecha, la cobertura del servicio, la confiabilidad de la oferta se observa un déficit de la demanda media anual de 82.76 MMC, y una reducción de la cobertura considerable al compararla con la del escenario de que todo siga igual.

En el análisis de la demanda se observa un incremento, entre los escenarios con cambio climático y sin cambio climático, de 1092.70 MMC, al 2050. De los cuales 266.62 MMC corresponden al agua potable que incluye el industrial y 826.08 MMC al sector riego.

Los resultados obtenidos de la generación hidroeléctrica, el flujo turbinado, los niveles de elevación de los embalses y los volúmenes observados, en el escenario de cambio climático, muestran que la generación hidroeléctrica disminuirá en 3.5% equivalente a 150 Tera Joules.

Para la cuenca del Chacuey, las demandas no satisfechas y las coberturas de la demanda en el período 1977 a 2050, presentan un déficit de 0.32 MMC y un incremento en la reducción de la cobertura del servicio. Mientras que el efecto del cambio climático en el incremento de la demanda de agua en la cuenca del río Chacuey, asciende a unos dos millones de metros cúbicos.

La cuenca del Masacre es más sensible a los cambios en la precipitación, humedad relativa y temperatura del aire, presentándose una marcada tendencia a la disminución de los caudales. La demanda no satisfecha presenta un déficit de 0.87 MMC, en la zona del Guajabo, ascendiendo los requerimientos de agua para los cultivos de la zona a unos 42 MMC como media anual, y la confiabilidad del suministro del recurso presenta pocos cambios entre ambos escenarios. El incremento de la demanda de agua

en la cuenca del río Masacre, asciende a unos 7 millones de metros cúbicos. De incorporar 90 ha adicionales, 65 entre Loma Cabrera y Dajabón y el resto en área de Dajabón, la demanda ascendería a 193 MMC con déficit de unos 150 MMC.

CONCLUSIONES Y ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN

Mientras no se produzcan cambios significativos en el flujo de los vientos alisios, como consecuencia del cambio climático, la Región Yaque del Norte continuará teniendo, más o menos, la misma disponibilidad del recurso agua, con las oscilaciones normales del ciclo de los once años de las precipitaciones.

Como el recurso agua es un recurso finito y la demanda del mismo continuará creciendo como consecuencia del incremento de la población y la demanda agrícola e industrial, se impone el reducir las cuantiosas pérdidas del recurso en las fugas de agua, baja eficiencia en el uso del agua en la agricultura y el derroche en su uso industrial.

Establecer un plan de mejoramiento de las eficiencias de riego, de acueductos e industrias, es complejo y costoso, pero sin lugar a dudas, necesario para preservar los recursos que van a necesitar las próximas generaciones y adicionalmente se crearían innumerables fuentes de trabajo con sus efectos multiplicadores sobre la estabilidad de la región.

No deben subestimarse los consumidores comerciales no industriales como lavaderos de vehículos, lavanderías, hoteles, restaurantes, los cuales ameritan ser reeducados en el ahorro del agua.

Estrategia para aumentar el volumen de agua regulada

Los requerimientos de agua para la región Yaque del Norte en los años 2007 y 2008 fueron, respectivamente, 2,348.04 MMC y 2,376.43 MMC. Las demandas de agua en el escenario de cambio climático ascienden a unos 3,517 MMC, con un incremento de la demanda de unos 1000 MMC aproximadamente, similar a la comparación del escenario sin cambio climático. Para aumentar el volumen regulado se sugiere implementar los proyectos recomendados por el Plan Hidrológico Nacional (INDRHI, 2012), en armonía con la gestión sostenible del medio ambiente, cuyo listado se presenta en el Tabla 9, con los que se aumentaría la capacidad embalsada en unos 500 MMC, lo que reduciría significativamente el déficit de la región al 2050.

Tabla 9. Presas propuestas Región Yaque del Norte, adaptado

Table 9. Yaque del Norte region proposed dams, adapted

Río	Proyecto	Comentarios	Costo (en MM de US\$)
Amina	Presa de Amina Embalse de 347.00 MMC	Eliminar el déficit de agua potable y reducir deficiencias de riego en la zona, también aportará 59.00 GW/HR/AÑO	180.00
Bao	Presa Las Placetas Embalse de 19.60 MMC	Aportar 331.00 GW/HR/AÑO al sistema eléctrico	285.00
Guayubín	Presa San José Embalse de 70.00 MMC	Eliminar el déficit de agua potable y reducir deficiencias de riego en la zona.	60.00
Yaque del Norte	Manabao-Bejucal Embalse de 45.00 MMC	Aportar 290.00 GW/HR/AÑO al sistema eléctrico	200.00
Masacre	Presa Los Jobos Embalse de 0.86 MMC	Reducir el déficit de agua para riego	15.00
Masacre	Presa Don Miguel Embalse de 29.30 MMC	Reducir déficit de agua para riego	30.00
Masacre	Presa de Capotillo Embalse de 23.80 MMC	Reducir déficit de agua para riego	24.00
Masacre	Presa de Manatí Embalse de 1.80 MMC	Reducir el déficit de agua para riego	N/D
Masacre	Presa de Loma de Cabrera Embalse de 8.90 MMC	Reducir déficit de agua para riego	20.00
Total	546.26 MMC		810.00

El resto del déficit del recurso se obtendría del control de las fugas en los acueductos, la mejora de la eficiencia de los sistemas de riego y el almacenamiento en embalses distribuidos en toda la cuenca que aprovecharían las aguas no utilizadas en el riego durante las noches y mediante trasvase de ríos cercanos, entre otras se tienen elegidos las nuevas pequeñas presas pre-aprobadas de Don Armando en Guatapanal, Samba en cañada Samba y Los Caimonies en arroyo Bellaco, alimentados del río Caña; Guanito, Antón Sape; Los Juberos, El Capei y Agua de Luis por Villa Vásquez.

Entre otras posibles presas de interés en la zona se encuentran Laguna Saladilla, Apargatales y los Corbanos, Los Limones y El Cayal.

Estrategia para mejorar la eficiencia del sector riego

Como se observa en la Tabla 10, se obtiene una reducción en los volúmenes para la demanda agrícola, después de los ajustes en las pérdidas de conducción y los umbrales de aplicación del riego, de 3,493.22 MMC a 2,624.28 MMC, lo que representa una economía del orden de 869 MMC, similar a los 838 MMC de las supuestas pérdidas actuales, por lo que la ampliación de la zona de riego teniendo en cuenta la mejora de la eficiencia, no representa nuevos requerimientos del recurso.

Tabla 10. Resumen demanda escenarios sin y con cambio climático

Table 10. Summary of water demand scenarios with and without weather change

Demanda	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Suma
Sin cambio climático	252.65	272.97	444.85	317.21	261.59	300.79	343.77	294.48	322.43	213.36	231.04	238.08	3493.22
Con cambio climático	183.17	221.65	349.20	236.95	194.10	228.00	263.33	223.22	233.76	149.78	173.98	177.13	2624.28
Diferencia	69.48	51.32	95.65	80.26	67.49	72.79	80.44	71.26	88.67	63.58	57.06	60.95	868.94

Estrategia para mejorar la eficiencia de los acueductos

Las pérdidas en los acueductos de la región son significativas, para el acueducto Cibao Central las pérdidas son estimadas en 80% y en las demás ciudades son superiores al 40%. De acuerdo con el Ing. Arturo Socías, ex subdirector ejecutivo del INAPA, la dotación per cápita asciende a 907.7 lppd, cuando en Estados Unidos es de 300 lppd. En el proyecto utilizamos un consumo de 80% para el acueducto Cibao Central y 50% para el resto de los acueductos.

Esta situación sugiere que deben implementarse medidas inmediatas de corrección de fugas en todo el sistema de abastecimiento de agua potable. INAPA y CORAASAN deben organizar brigadas de corrección de fugas, que investiguen y reparen las filtraciones en las líneas de conducción y dentro de las casas.

De implementarse un programa de reducción de las pérdidas en los acueductos de la cuenca Yaque del Norte, se obtendría una economía del agua del orden de los 135 MMC.

Tabla 11. Población, consumo y ahorro del agua al 2050, en MMC

Table 11. MMC population, water consumption and water-saving by 2050

Acueductos	Rata l/p/a	Pob. 2010	Pob. 2050	Consumo 2010	Consumo 2050	Perdidas	Mejorar al 0.25	Economía
Cibao Central	164250	700000	1132492	114.975	186.012	148.81	37.20	111.61
JARABACOA	91250	60000	97071	5.475	8.858	3.54	0.89	2.66
SAB_IGLE_TAV	73000	24000	38828	1.752	2.834	1.13	0.28	0.85
RL_RUBIO_SJM_JANICO	73000	40000	64714	2.92	4.724	1.89	0.47	1.42
SAJOMA_ESPER	91250	34000	55007	3.1025	5.019	2.01	0.50	1.51
ALINO_1	91250	86000	139135	7.8475	12.696	5.08	1.27	3.81
Alto_Guayubin	54750	20000	32357	1.095	1.772	0.71	0.18	0.53
Bajo Guayubín	73000	41000	66332	2.993	4.842	1.94	0.48	1.45
Alino_2	91250	166000	268562	15.1475	24.506	9.80	2.45	7.35
ALINO_3	91250	70000	113249	6.3875	10.334	4.13	1.03	3.10
ALINO_4	91250	34000	55007	3.1025	5.019	2.01	0.50	1.51
Suma		1275000	2062753	164.7975	266.617	181.05	45.26	135.79

Estrategia para mejorar la eficiencia del uso del agua en la industria

Las industrias de la región Yaque del Norte, especialmente en el entorno de la ciudad de Santiago, deben introducir plantas depuradoras para el tratamiento de sus aguas residuales que permitan reducir volumen y toxicidad, mediante la remoción de sólidos, arenas, aceites y grasas, metales pesados, arsénico, cadmio, cromo hexavalente, cobre, cianuro, plomo, mercurio, níquel, zinc, control de pH, floculación y coagulación.

Estrategia para mejorar la calidad del agua

La contaminación en la región Yaque del Norte es principalmente de naturaleza antrópica, por falta de redes de alcantarillado y plantas de tratamiento que garanticen un efluente ambientalmente aceptable y por las aguas utilizadas en la agricultura, la industria y el comercio que son devueltas a los cursos de agua, en condiciones de calidad no adecuadas.

Es imprescindible construir sistemas de alcantarillado con sus plantas de tratamiento de las aguas residuales, principalmente en Jarabacoa, Santiago, San José de Las Matas, Mao, Villa Vásquez, Guayubín, Dajabón, entre otras.

Estrategia para proteger las fuentes productoras de agua

El proceso de degradación de las zonas productoras de agua es debido al manejo incorrecto de los suelos, prácticas agrícolas inadecuadas, deforestación, agricultura migratoria, sobre pastoreo y uso inapropiado del agua, lo que impacta negativamente en el medio ambiente,

Por tanto deben fortalecerse los programas de restauración ecológica, reducción de la contaminación por actividades agrícolas, reducción o eliminación de los daños a cauces de los ríos y fortalecimiento del manejo de cuencas.

Estrategia para educar a la población sobre el manejo del recurso

Casi la totalidad de la población no tiene cultura de lo que debe ser el uso racional del agua y con bastante frecuencia este recurso vital se usa con poco criterio para su ahorro y conservación, por lo que se requiere implementar una amplia campaña de educación a todos los niveles, partiendo desde los niveles básicos de la educación hasta abarcar toda la población. Sugerimos implementar el siguiente resumen de actividades de educación en la región Yaque del Norte, apoyados en las sugerencias del Plan Hidrológico Nacional (INDRHI 2012).

- Fortalecer el Programa Cultura del Agua en la Región.
- Incorporar programa de capacitación a los regantes sobre técnicas de uso eficiente del recurso.
- Implementar un programa de educación comunitaria sobre ahorro del agua.
- Integrar a los ayuntamientos, INAPA, CORAASAN e instituciones afines (APEDI, etc) a los programas de uso eficiente del agua.
- Uso de los medios masivos de comunicación, radio, TV, periódicos para la difusión de educación sobre el uso eficiente y ahorro del agua.
- Capacitación a maestros en Liceos y Colegios sobre la importancia del agua, su manejo adecuado y su conservación.

Además se sugiere el involucramiento del personal técnico de alta calificación de los Centros de Gestión de Agronegocios y los Centros Audiovisuales y Bibliotecas (CEGA-CABI) en acciones de capacitación de los agricultores en mejores prácticas de riego y conservación de los recursos naturales.

Agradecimiento

Este proyecto "Simulación de los Efectos del Cambio Climático en los Recursos Hídricos y Estrategias de Adaptación en la Cuenca de la Región Yaque del Norte", fue ejecutado con el apoyo económico del Fondo Nacional De Innovación Y Desarrollo Científico Y Tecnológico, FONDOCYT, del Ministerio de Educación Superior Ciencia y Tecnología (MESCYT), a través del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, INDRHI, y su Centro para la Gestión Sostenible de los Recursos Hídricos en los Estados Insulares del Caribe (CEHICA), durante los doce meses del año 2013.

REFERENCIAS

León, Claudia, Julio 2013, Selección de proyecciones de cambio climático, para República Dominicana. Riverside.

Izzo, Michela, Julio 2013. Tendencias climáticas históricas en la República Dominicana y vulnerabilidad del territorio frente al cambio climático, Primer Simposio Biodiversidad y Cambio Climático. Santo Domingo, República Dominicana.

INDRHI, 2012. Plan Hidrológico Nacional. Santo Domingo, República Dominicana.

Jabloun, Mohamed and Sahli, Ali, January 2012, WEAP-MABIA Tutorial.

Flores-López, F., et al. (2012). Implementación de estrategias de manejo integral de recursos hídricos en la cuenca hidrológica de Yaque del Sur, Republica Dominicana mediante el uso del modelo WEAP.

Stockholm Environment Institute. May 2011, User Guide, Water Evaluation And Planning, WEAP. Http://www.weap21.org.

ONE, IX Censo Nacional de Población y Vivienda 2010, Vol.1. Santo Domingo, República Dominicana.

Stockholm Environment Institute. Feb 2009, Tutorial Water Evaluation And Planning, WEAP

Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009. Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP.

CATHALAC, 2008. Potential Impacts of Climate Change on Biodiversity, in Central America, Mexico and the Dominican Republic.

Escobar, M., Condom, T., Suarez, W., Purkey, D., Pouget, J.C., Ramos, C. 2008. Construcción del Modelo WEAP del Río Santa. Proyecto: Evaluación de Impactos de Cambio Climático en Hidrología de Montañas: Desarrollo de una Metodología a través de un Estudio de Caso en Perú. IRD, SEI-US, Banco Mundial

Céleri, R. 2007. Rainfall variability and rainfall-runoff dynamics in the Paute River Basin – Southern Ecuadorian Andes. Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Lovaina, Lovaina, Belgica.

IPCC, 2007. Informe de síntesis AR4, Cambio climático 2007. OMM-PNUMA.

Grusamar (2007). Plan Hidrológico Nacional Fase I Diagnostico. Santo Domingo, R.D.

Yates, D., J. Sieber, D. Purkey, and A. Huber Lee, and H. Galbraith. 2005a. WEAP21: A demand, priority, and preference driven water planning model: Part 2, Aiding freshwater ecosystem service evaluation. Water International. 30(4):487-500.

INDRHI-EPTISA, 2004. Estudio Hidrogeológico Nacional de la República Dominicana Fase II. Unidad Hidrogeológica de la Cordillera Central y Valle del Cibao. Santo Domingo, República Dominicana.

González, J. A., 2003. Valle del Cibao: Ecología, suelos y degradación. Santo Domingo, República Dominicana.

IPCC, 2000. Escenarios de emisiones. Resumen para responsables de políticas. OMM-PNUMA.

García, A., Brugal, M. 1995. Aspecto de la calidad del agua en la cuenca degradada del río Yaque del Norte.

Síntesis del seminario-taller sobre Degradación de la cuenca del río Yaque del Norte. Santo Domingo, República Dominicana.

Allen, R.G., Pereira, L.S., et al (1988. Crop Evapotranspiration- Guidelines for computing crop water requirements FAO 56, Irrigation and Drainage Paper, Rome.