



**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL  
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN**

**PROGRAMA DE POSGRADO**

**Análisis de sensibilidad en producción de agua y erosión hídrica bajo escenarios de  
cobertura vegetal y clima en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte,  
República Dominicana**

**Tesis sometida a la consideración de la División de Educación y el Programa de  
Posgrado como requisito para optar al grado de**

***MAGISTER SCIENTIAE***

**en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas**

**ESTHEFANY RODRÍGUEZ**

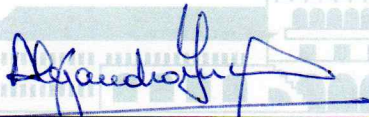
**Turrialba, Costa Rica**

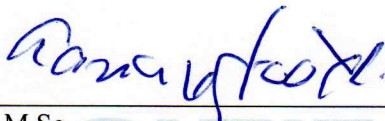
**2019**

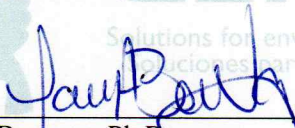
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero de la estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de


**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL  
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

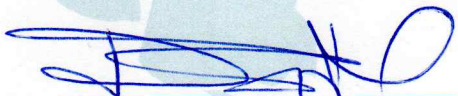
**FIRMANTES:**


  
Alejandro Imbach, M.Sc.  
Codirector de tesis

  
Ney Ríos, M.Sc.  
Codirector de tesis

  
Laura Benegas, Ph.D.  
Miembro Comité Consejero

  
Solhanlle Bonilla, M.Sc.  
Miembro Comité Consejero

  
Isabel A. Gutiérrez-Montes, Ph.D.  
Decana Escuela de Posgrado

  
Esthefany Rodríguez  
Candidata

## **DEDICATORIA**

A mi hijo, por ser el motor que me mantuvo activa día tras día.

A mi esposo, por creer en mí incluso en aquellos momentos que consideraba imposible obtener ciertos logros.

A mi madre, por ser luchadora incansable y siempre darme apoyo para que haga mis sueños realidad.

A todos aquellos que colaboraron de una u otra manera con la realización de este trabajo.

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestro Dios todo poderoso, por serme fiel y permanecer a mi lado incluso en esos momentos cuando sentí que ya no podía continuar.

Al Muhammad Ibrahim (Director General), Isabel Gutiérrez (Decana) y Alfredo Mena (representante de CATIE en República Dominicana) por creer en mi capacidad y darme la oportunidad de formarme en tan importante institución.

A mis codirectores Ney Ríos y Alejandro Imbach, por ser tan pacientes y estar conmigo hasta culminar el proceso de investigación. Gracias por ayudarme a entender que la negatividad es obstáculo para modelar, pues perseverar es lo que ayuda a alcanzar las metas y, gracias por mostrarme la salida cada vez cuando sentí que estaba en un callejón sin final.

A las integrantes del comité Laura Benegas y Solhanlle Bonilla, por brindarme todo el apoyo para que la investigación sea relevante tanto para el CATIE como para mi país.

A Benito Ferreiras y Edwin Reyes (Universidad ISA), por permitirme formar parte del programa de futuros investigadores de la institución y darme el apoyo financiero necesario para lograr la finalización exitosa de este proceso.

A Humberto Checo, Julián Holguín, Andrés Brea y el resto del equipo de Plan Yaque, por ser mis guías en la fase de campo.

A Aldo Paula, por acompañarme en cada fase de esta etapa de vida. Aldo: gracias por mostrarme que todo es posible si se trabaja en equipo.

A Michela Izzo, Cristian Gómez y el resto del equipo de Guakía Ambiente, por ser mi motivación final para que estudiara una maestría en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas y estar disponibles siempre que los necesité.

A Jesús López, Edgar Abad Conde, Aranjid Valverde, Héctor Hernández, Alex Solano, Christian Brenes, Sergio Vilchez y Dorian Carvajal por sacrificar parte de su tiempo para apoyarme con este trabajo.

A mis compañeros de Maestría Alberto Iraheta, Luis Aguirre, María Alejandra Martínez, Mayelin Palacios, Thayna Caballero, Omar Rodríguez y Vanessa Burbano. De igual forma a mis compañeros mexicanos Eliobeth Cueto y Liborio Martínez, y a los panameños por adoptar a la única dominicana de la promoción.

A todo el equipo técnico y profesional del CATIE por darme apoyo personal y profesional. Gracias por mostrarme que, aunque estaba lejos de casa aquí también contaba con una familia.

A mis padres, hermanos, demás familiares, colegas y amigos, por creer en mí y darme el apoyo necesario para fortalecer la formación como ser humano y profesional.

## CONTENIDO

DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	XI
RESUMEN .....	XII
ABSTRACT .....	XII
CAPÍTULO I .....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Justificación e importancia .....	2
1.2 Objetivos y preguntas de investigación.....	3
1.2.1 Objetivo general .....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.2.3 Preguntas de investigación.....	3
2. MARCO REFERENCIAL .....	4
2.1 Cambio Climático y su impacto en el Ciclo Hidrológico en Cuencas Hidrográficas.....	4
2.1.1 Ciclo hidrológico en cuencas hidrográficas.....	4
2.1.2 Cambio climático .....	5
2.1.2.1 Elementos de análisis de cambio climático.....	5
2.1.2.2 Análisis de la vulnerabilidad frente al cambio climático .....	8
2.1.3 Afectación de cambio climático al recurso hídrico.....	8
2.1.3.1 Escenarios regionales y nacionales de cambio climático.....	8
2.2 Modelación Hidrológica.....	9
2.3 Modelado Hidrológico con SWAT .....	11
2.4 Erosión .....	12
3. PRINCIPALES RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	13
4. LITERATURA CITADA .....	14
CAPÍTULO II .....	23
Artículo 1. Línea base de producción de agua y erosión hídrica en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana.....	23
RESUMEN .....	23
ABSTRACT .....	23
1. INTRODUCCIÓN .....	24
2. METODOLOGÍA.....	24
2.1 Área de estudio .....	24
2.1.1 Clima en el área de estudio.....	25

2.1.2	Áreas protegidas en el área de estudio .....	26
2.2	Línea Base de producción de Agua y Erosión Hídrica .....	27
2.2.1	Datos de entrada al modelo SWAT .....	28
2.2.1.1	Modelo de elevación digital.....	28
2.2.1.2	Datos de uso y cobertura de suelo.....	28
2.2.1.3	Datos de suelo .....	29
2.2.1.4	Datos climáticos.....	30
2.2.2	Delimitación de microcuencas.....	31
2.2.3	Ajustes para la modelación.....	32
2.2.4	Proceso de calibración del modelo.....	32
2.2.5	Comparación de medias de datos de caudal antes y después de la calibración.....	32
2.2.6	Línea base de producción de agua y erosión.....	33
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
3.1	Nueva delimitación de Área de Estudio.....	33
3.2	Simulación inicial.....	34
3.3	Calibración del Modelo.....	35
3.4	Implicaciones del proceso de calibración del Modelo.....	37
3.5	Comparación de las medias de datos de caudal .....	38
3.6	Precipitación y caudales por microcuenca .....	39
3.7	Descarga de sedimentos y caudales por microcuenca.....	39
3.8	Producción de agua y sus componentes por microcuenca .....	40
3.8.1	Línea base de producción de agua .....	41
3.9	Escorrentía superficial y erosión por microcuencas.....	42
3.9.1	Línea base de erosión .....	43
4.	CONCLUSIONES.....	44
5.	RECOMENDACIONES.....	45
6.	LITERATURA CITADA.....	45
	Artículo 2. Análisis de sensibilidad en producción de agua y erosión hídrica bajo escenarios de cobertura vegetal y clima en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana.....	54
	RESUMEN .....	54
	ABSTRACT .....	54
1.	INTRODUCCIÓN .....	55
2.	METODOLOGÍA.....	56
2.1	Descripción del área de estudio.....	56

2.1.1	Tipos de suelo.....	58
2.1.2	Capacidad productiva de los suelos.....	58
2.2	Proceso metodológico.....	59
2.2.1	Elaboración de escenarios al año 2030.....	60
2.2.1.1	Escenarios de uso y cobertura vegetal.....	60
2.2.1.1.1	Escenario tendencial de uso y cobertura de suelo al año 2030.....	61
2.2.1.1.2	Escenarios alternativos (forestal y pasto).....	61
2.2.1.2	Escenarios de cambio climático.....	62
2.2.1.2.1	Selección de los Modelos de Circulación Global (GCMs).....	62
2.2.1.2.2	Obtención de datos de anomalías climáticas.....	62
2.2.2	Incorporación de insumos al modelo SWAT.....	63
2.3	Criterios para la comparación de producción de agua y erosión bajo escenarios de cobertura vegetal.....	63
2.3.1	Comparación basada en producción de agua.....	64
2.3.2	Comparación basada en erosión.....	64
2.4	Criterios para la comparación de producción de agua y erosión bajo escenarios climáticos.....	65
2.5	Criterios para la comparación de producción de agua y erosión bajo escenarios de cobertura vegetal y clima.....	65
2.5.1	Consideraciones para el análisis de sensibilidad en producción de agua.....	66
2.5.2	Consideraciones para el análisis de sensibilidad por erosión.....	67
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	67
3.1	Escenarios de uso y cobertura de suelo.....	67
3.1.1	Comparación de escenarios de uso y cobertura de suelo.....	68
3.2	Producción de agua a partir de escenarios de cobertura vegetal.....	70
3.2.1	Comparación de producción de agua por microcuenca bajo escenarios de cobertura vegetal.....	70
3.3	Erosión a partir de escenarios de cobertura vegetal.....	71
3.3.1	Comparación de erosión bajo escenarios de cobertura vegetal.....	72
3.4	Anomalías climáticas al año 2030.....	73
3.4.1	Anomalías mensuales en precipitación.....	73
3.4.2	Anomalías mensuales en temperatura.....	74
3.5	Producción de agua y erosión bajo escenarios climáticos.....	74
3.5.1	Producción de agua bajo escenarios climáticos.....	74
3.5.2	Erosión bajo escenarios climáticos.....	75
3.6	Producción de agua bajo escenarios de cobertura vegetal y clima.....	76

3.7	Erosión bajo escenarios de cobertura vegetal y clima.....	76
3.8	Sensibilidad en producción de agua y erosión hídrica a partir de escenarios de cobertura vegetal y clima.....	77
3.8.1	Sensibilidad en producción de agua .....	77
3.8.2	Sensibilidad a la erosión hídrica .....	78
3.9	Priorización de microcuencas .....	79
4.	CONCLUSIONES.....	79
5.	RECOMENDACIONES.....	80
6.	LITERATURA CITADA.....	81

## **LISTA DE CUADROS**

Cuadro 1.	Preguntas de investigación por objetivo.....	3
Cuadro 2.	Escenarios de Trayectorias de Concentraciones Representativas (RCPs).....	6
Cuadro 3.	Modelos de Circulación Global empleados en República Dominicana.....	6
Cuadro 4.	Modelos hidrológicos utilizados en América Latina .....	10
Cuadro 5.	Componentes de producción de agua y erosión para el periodo 1982-2014 en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana.....	13
Cuadro 6.	Categorías de áreas protegidas y microcuencas de las que forman parte dichas áreas .	27
Cuadro 7.	Clases de pendiente, según FAO.....	28
Cuadro 8.	Código SWAT asignado a los usos de suelo.....	29
Cuadro 9.	Parámetros fisicoquímicos de suelos requeridos por el modelo SWAT .....	29
Cuadro 10.	Ubicación de las estaciones climáticas.....	30
Cuadro 11.	Parámetros climáticos requeridos por el modelo SWAT .....	31
Cuadro 12.	Cambio en por ciento de la delimitación de las microcuencas .....	33
Cuadro 13.	Parámetros utilizados para la calibración del caudal en el modelo SWAT .....	35
Cuadro 14.	Estadísticos de ajuste para el punto de aforo de la microcuenca del Río Jimenoa, Jarabacoa, La Vega, República Dominicana.....	36
Cuadro 15.	Parámetros de las microcuencas que componen la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte. ....	57
Cuadro 16.	Descripción de las clases de suelo de la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte.....	59
Cuadro 17.	Descripción de criterios de categorización de diferencia porcentual en producción de agua bajo escenarios alternativos de cobertura y uso de suelo .....	64
Cuadro 18.	Descripción de criterios de categorización de diferencia porcentual en erosión bajo escenarios alternativos de cobertura y uso de suelo.....	65
Cuadro 19.	Comparación de la extensión de cada categoría de cobertura y uso de suelo en escenarios tendencial y alternativos respecto del uso actual. ....	69



Cuadro 20. Categorización de la cantidad de agua producida en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte por escenario de uso y cobertura de suelo.....	70
Cuadro 21. Categorización de la cantidad de agua producida en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte por escenario de uso y cobertura de suelo.....	72

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación cualitativa del ciclo hidrológico.....	4
Figura 2. Ubicación de área de estudio.....	25
Figura 3. Comportamiento mensual de la precipitación y temperatura en Jarabacoa, La Vega, República Dominicana.....	26
Figura 4. Áreas protegidas en el área de estudio.....	26
Figura 5. Procedimiento metodológico general.....	27
Figura 6. Datos de entrada del modelo SWAT.....	28
Figura 7. Delimitación para la modelación y delimitación del área de estudio con QSWAT 1.8. ....	31
Figura 8. Componentes del balance hídrico del área.....	34
Figura 9. Caudal simulado vs. observado en la microcuenca del río Jimenoa.....	35
Figura 10. Caudal observado, simulado y banda de predicción PPU95% para la microcuenca del río Jimenoa, cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana.....	37
Figura 11. Comparación de medias de los datos de caudal de la microcuenca del río Jimenoa antes y después de calibrado el modelo respecto del caudal observado.....	38
Figura 12. Precipitación y caudales de las microcuencas de la sección alta del río Yaque del Norte, República Dominicana.....	39
Figura 13. Carga de sedimentos (SED OUT) y caudal medio a la salida de cada microcuenca de la sección Alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana.....	40
Figura 14. Producción de agua (WYLD) y sus componentes (flujo lateral-LAT Q, flujo de retorno-GW Q y escorrentía superficial-SURQ) en las microcuencas de la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana.....	41
Figura 15. Producción de agua y sus componentes en el área de estudio.....	41
Figura 16. Escorrentía superficial (SURQ) y erosión (SYLD) en el área de estudio.....	43
Figura 17. Erosión en el área de estudio.....	43
Figura 18. Ubicación de área de estudio.....	57
Figura 19. Tipos de suelo en el área de estudio.....	58
Figura 20. Capacidad productiva de los suelos en el área de estudio.....	58
Figura 21. Proceso metodológico general.....	60
Figura 22. Procedimiento en Dinámica EGO con cada insumo y salida para la construcción del escenario tendencial de uso y cobertura de suelo en el área de estudio.....	61

Figura 23. Procedimiento para la obtención de las anomalías mensuales de precipitación y temperatura. ....	63
Figura 24. Categorización del grado sensibilidad de las microcuencas a partir de la diferencia porcentual en producción de agua. ....	66
Figura 25. Categorización del grado sensibilidad de las microcuencas a partir de la diferencia en erosión ( $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ). ....	67
Figura 26. Escenarios de uso y cobertura de suelo en la sección alta.....	68
Figura 27. Comparación de la extensión de las principales categorías de uso y cobertura de suelo actual, tendencial y escenarios alternativos.....	69
Figura 28. Producción de erosión en la sección alta de la cuenca del río.....	71
Figura 29. Cambio porcentual de precipitación mensual al año 2030 bajo el RCP 4.5 (izquierda) y 8.5 (derecha) en el área de estudio. ....	74
Figura 30. Cambio porcentual de temperatura mensual al año 2030 bajo el RCP 4.5 (izquierda) y 8.5 (derecha) en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana .....	74
Figura 31. Producción de agua en las microcuencas que componen la sección alta de la cuenca del río Yaque de Norte, bajo cinco GCMs y los RCP 4.5 (izquierda) y 8.5 (derecha).....	75
Figura 32. Erosión en las microcuencas que componen la sección alta de la cuenca del río Yaque de Norte, bajo cinco GCMs y los RCPs 4.5 (izquierda) y 8.5 (derecha). ....	76
Figura 33. Producción de agua a partir de distintos escenarios .....	76
Figura 34. Erosión a partir de distintos escenarios de cobertura.....	77
Figura 35. Grado de sensibilidad en producción de agua de las microcuencas .....	77
Figura 36. Grado de sensibilidad por erosión de las microcuencas .....	78
Figura 37. Microcuencas priorizadas de acuerdo con los escenarios de erosión.....	79

## **LISTA DE ACRÓNIMOS**

FR	Forzamiento Radiactivo
GCMs	Modelos de Circulación Global
INDRHI	Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos
MED	Modelo de Elevación Digital
MIMARENA	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
ONAMET	Oficina Nacional de Meteorología
RCPs	Escenarios de Trayectorias de Concentraciones Representativas

## RESUMEN

La investigación fue realizada en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte, ubicada entre las provincias Santiago y La Vega, República Dominicana. La extensión del territorio es de 908.4 km<sup>2</sup>. El objetivo fue determinar el grado de sensibilidad en producción de agua y erosión bajo diferentes escenarios de cobertura vegetal y clima. Fue utilizado el modelo hidrológico SWAT, en la interfase QGIS (QSWAT 1.8). Para la calibración del modelo se utilizó SWAT-CUP. Debido a la no consideración de las extracciones de agua en la zona los estadísticos analizados dieron como resultado una calibración insuficiente, variando el NSE de -78 a -8. Los escenarios de cobertura fueron: tendencial (al año 2030) y alternativos (forestal y pasto) y los escenarios climáticos fueron el estable (4.5) y el extremo (8.5) y 5 modelos de circulación global. Los resultados indican que habrá una disminución en producción de agua ente -1% (4.5) y -11% (8.5). La erosión disminuirá entre -8% y 11% (4.5 y 8.5). La sensibilidad en producción de agua de las microcuencas fue baja con el RCP 4.5 y alta con el escenario 8.5. La sensibilidad en erosión fue media positiva para el 75% del área y baja, pero positiva para el 25% del área. Las microcuencas con tendencia a bajo aumento de erosión se ubican en la parte más alta del área de estudio.

**Palabras claves:** modelación hidrológica, SWAT-CUP, producción de agua, erosión, modelos de circulación global, sensibilidad.

## ABSTRACT

This research was developed at the high section of the Yaque del Norte river's watershed, located in the provinces Santiago and La Vega, Dominican Republic. The studied area is 908.4 km<sup>2</sup>. The objective was to determine the degree of sensitivity in water production and erosion under several vegetation cover and climate scenarios. The hydrological model software SWAT was used with the QGIS interphase (QSWAT 1.8). The software SWAT-CUP was used to calibrate the model. Due to the no inclusion of water extractions in that zone, the analyzed statistics parameters resulted in an insufficient calibration, varying the NSE from -78 to -8. The vegetations cover scenarios were the following: trending (year 2030) and alternatives (forest and grass); the climate scenarios were the following: stable (4.5) and extreme (8.5) and 5 General Circulation Models. The results show that there will be a reduction in water production between -1% (4.5) y -11% (8.5). Erosion will decrease between -8% y 11% (4.5 y 8.5). The sensitiveness in micro watershed's water production was low with RCP 4.5 and high in scenario 8.5. The erosion sensitiveness was moderately positive for 75% of the area and low but positive for the other 25%. The micro watersheds with trend to little increase of erosion are located in the highest section of the studied area.

**Key words:** hydrological modeling, SWAT-CUP, water production, erosion, General Circulation Models, sensitivity.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

Explican Noriega *et al.* (2011) que alrededor de 35 millones de km<sup>3</sup> (2,5%) del planeta tierra corresponden a agua dulce, de la cual América Latina y el Caribe cuentan con el 31% (Tuesca *et al.* 2013). Más del 60% del agua dulce se encuentra congelada en casquetes polares y glaciares o es subterránea (De León 2007). Sin embargo, los casquetes polares se están derritiendo y gran parte del agua pasa al océano, por lo que está disminuyendo su cantidad (Oswaldo y León 2007; Pacheco y Valdés 2012; TNG 2018).

El derretimiento de los glaciares ocurre debido al aumento de la temperatura global provocada por el aumento de las emisiones de algunos gases de efecto invernadero (Oswaldo y León 2007). Tal como explica la Organización Mundial de la Salud (2018), el aumento de los gases de efecto invernadero afectará el suministro de agua dulce, lo cual hace que este recurso hídrico sea sensible ante los cambios de clima (García *et al.* 2012).

A pesar de que alrededor del mundo se están desarrollando medidas para reducir los gases de efecto invernadero y mitigar los efectos del cambio climático, este tema sigue siendo una de las mayores amenazas actuales y futuras (Mansilla 2012). Esto es una preocupación tanto para los países desarrollados como para los que se encuentran en vía de desarrollo debido a los impactos negativos que podría generar (CEPAL 2009). Uno de los principales impactos esperados es la modificación en cantidad y distribución del régimen de lluvias (Echeverría 2011), lo cual modificaría el establecimiento, crecimiento y reproducción de los organismos, el ciclo de nutrientes y la productividad en diversos ecosistemas (Miranda 2008).

La República Dominicana aporta apenas un 0.1% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (INDC-RD 2015), sin embargo es el onceavo país del mundo más vulnerable a los efectos del cambio climático (USAID 2017) y comparte la isla con Haití, el país con mayor riesgo de vulnerabilidad climática (CAF 2014), lo que convierte a la isla La Española en una de las más vulnerables del mundo (Kreft *et al.* 2016). Aproximadamente el 40% del territorio de República Dominicana presenta niveles de vulnerabilidad de alta a muy alta (Izzo *et al.* 2013).

Por lo anterior, es evidente que este país insular en desarrollo está siendo afectado por los efectos del cambio climático (Herrera y Orrego 2011). La vulnerabilidad del país frente a desastres asociados a fenómenos climáticos se evidencia en un estudio socioeconómico y ambiental realizado tras inundaciones y que incluye la cuenca más importante del país, Yaque del Norte (CEPAL 2004). El estudio indica que es necesario un manejo integrado de las principales cuencas, en las cuales las actividades antropogénicas han alterado los cursos naturales de la red fluvial.

Considerando que la cantidad del agua dulce del planeta está disminuyendo, el recurso hídrico es vulnerable y la cuenca más importante de la República Dominicana se está viendo afectada. Esta investigación tiene como propósito principal analizar la sensibilidad hídrica al año 2030 de la cuenca alta del río Yaque del Norte bajo diferentes escenarios climáticos y de cobertura vegetal. Para esto se utilizó el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool), ya que una forma de analizar los efectos del cambio climático sobre el ciclo hidrológico y analizar la vulnerabilidad de un ecosistema es utilizar un modelo hidrológico distribuido (Stehr *et al.* 2010).

## **1.1 Justificación e importancia**

La cuenca del río Yaque del Norte es la más importante de la República Dominicana y la segunda de la isla La Española, luego de la Artibonito (MIMARENA 2018). En esta cuenca se encuentran varios sistemas de presas integrados por Tavera-Bao, Monción, Chacuey y Maguaca que junto a otras fuentes de agua abastecen del servicio a 1.8 millones de habitantes, aproximadamente el 17% de la población dominicana (Fondo Agua 2018; WB 2018).

Actualmente la disminución de precipitación, el aumento de temperatura junto a la deficiencia en el manejo de aguas residuales y desechos sólidos e inadecuadas prácticas de producción agrícola e industrial, están afectando la calidad y disponibilidad del agua de esta cuenca (Fondo Agua 2017). Las anomalías climáticas están ocasionando impactos negativos en la dinámica hídrica de la cuenca, con lo cual resulta más afectada el agua para uso agrícola y para consumo humano (Rathe 2008; Reynoso 2015).

Algunos de los problemas antes mencionados se están evidenciando en la cuenca alta del río Yaque del Norte (Plan Yaque 2018). Cuando es afectada la sección alta de una cuenca el resto de ésta (sección media y baja) también es afectada. Consecuentemente, según Reynoso (2015), cinco de las seis provincias que incluye esta cuenca sufrirán escasez del recurso hídrico en el año 2025, con categorías de escasez crónica en Santiago y problemas generales en Valverde, Montecristi, Santiago Rodríguez y Dajabón.

Para minimizar los impactos negativos generados por los diversos problemas actuales y futuros de la cuenca es preciso comenzar a tomar acciones. Dichas acciones deben ser enfocadas primordialmente en la restauración y conservación de la zona de recarga hídrica, principalmente en cuenca alta (Rodríguez y Pérez 2014).

Para seleccionar adecuadas estrategias de intervención es necesario entender qué sucede con el ecosistema y cuáles son las zonas más vulnerables (Hoyos 2016). Con base en esto, una de las actividades planteadas en la Estrategia Nacional de Adaptación al Cambio Climático en el sector agropecuario del país es elaborar mapas de vulnerabilidad para identificar y priorizar regiones y áreas agropecuarias (PLENITUD *et al.* 2014). De igual manera, una de las líneas de acción de la Estrategia Nacional de Desarrollo 2010-2030 integra el tema de vulnerabilidad al cambio climático (MEPyD 2009).

Tomando en consideración lo anterior, la presente investigación pretende contribuir a una mayor comprensión del comportamiento hídrico de la cuenca bajo escenarios de cambio en cobertura y cambio climático proyectados para la cuenca. Se ha realizado un análisis de sensibilidad a los recursos naturales agua y suelo, lo cual es uno de los componentes principales para la realización de un análisis de vulnerabilidad.

## 1.2 Objetivos y preguntas de investigación

### 1.2.1 Objetivo general

Analizar la sensibilidad en producción de agua y erosión hídrica bajo cambios de cobertura vegetal y clima en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Estimar mediante modelación hidrológica la producción de agua y la erosión.
- Analizar la producción de agua y erosión hídrica bajo distintos escenarios de cobertura vegetal y clima al 2030.
- Determinar el grado de sensibilidad de las microcuencas bajo escenarios de cobertura vegetal y clima.

### 1.2.3 Preguntas de investigación

Cuadro 1. Preguntas de investigación por objetivo

<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN</b>
<b>OE 1.</b> Estimar mediante modelación hidrológica la producción de agua y la erosión.	<b>1.1</b> ¿Cuál es la producción de agua y la erosión promedio en la sección alta? <b>1.2</b> ¿Cuáles microcuencas presentan mayores y menores promedios de producción de agua y erosión hídrica?
<b>OE 2.</b> Analizar la producción de agua y erosión hídrica bajo distintos escenarios de cobertura vegetal y clima.	<b>2.1</b> ¿Cuál es la producción de agua en las microcuencas bajo diferentes escenarios de cobertura vegetal? <b>2.2</b> ¿Cuál es la producción de agua en las microcuencas bajo diferentes escenarios de cambio climático? <b>2.3</b> ¿Cuál es la producción de agua en la sección alta del río Yaque del Norte bajo diferentes escenarios de cobertura vegetal y de clima?
<b>OE 3.</b> Determinar el grado de sensibilidad de las microcuencas bajo distintos escenarios de cobertura vegetal y clima.	<b>3.1</b> ¿Cuál es la magnitud de la diferencia en producción de agua y erosión hídrica bajo escenarios de cobertura vegetal y clima? <b>3.2</b> ¿Cuáles microcuencas cuentan con mayor grado de sensibilidad en producción de agua y erosión?

## 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1 Cambio Climático y su impacto en el Ciclo Hidrológico en Cuencas Hidrográficas

#### 2.1.1 Ciclo hidrológico en cuencas hidrográficas

El agua es un compuesto formado por dos moléculas de hidrógeno y una de oxígeno ( $H_2O$ ) que posee características únicas de gran significación para la vida. Es el elemento más abundante de la naturaleza y determinante de los procesos químicos, físicos y biológicos del mundo natural (García *et al.* 1998). Según Ordoñez (2011), las masas de agua tienen movimientos o transferencias de manera constante en estado líquido, sólido o gaseoso y de manera superficial, subsuperficial o subterránea. Dichos movimientos son conocidos como ciclo hidrológico. El ciclo es complejo, implica un conjunto de procesos, está en constante movimiento y carece de principio o fin (Fernández 2012; Easton y Bock 2015).

El ciclo tiene comportamiento ascendente por evaporación o descendente por precipitación y circula en el planeta en forma de escorrentía superficial o subterránea (Pladeyra *et al.* 2008). Existe un sinnúmero de esquemas para hacer representación visual del ciclo hidrológico. A continuación, se presenta un sencillo gráfico que muestra los diferentes movimientos del agua sobre la tierra (Figura 1).

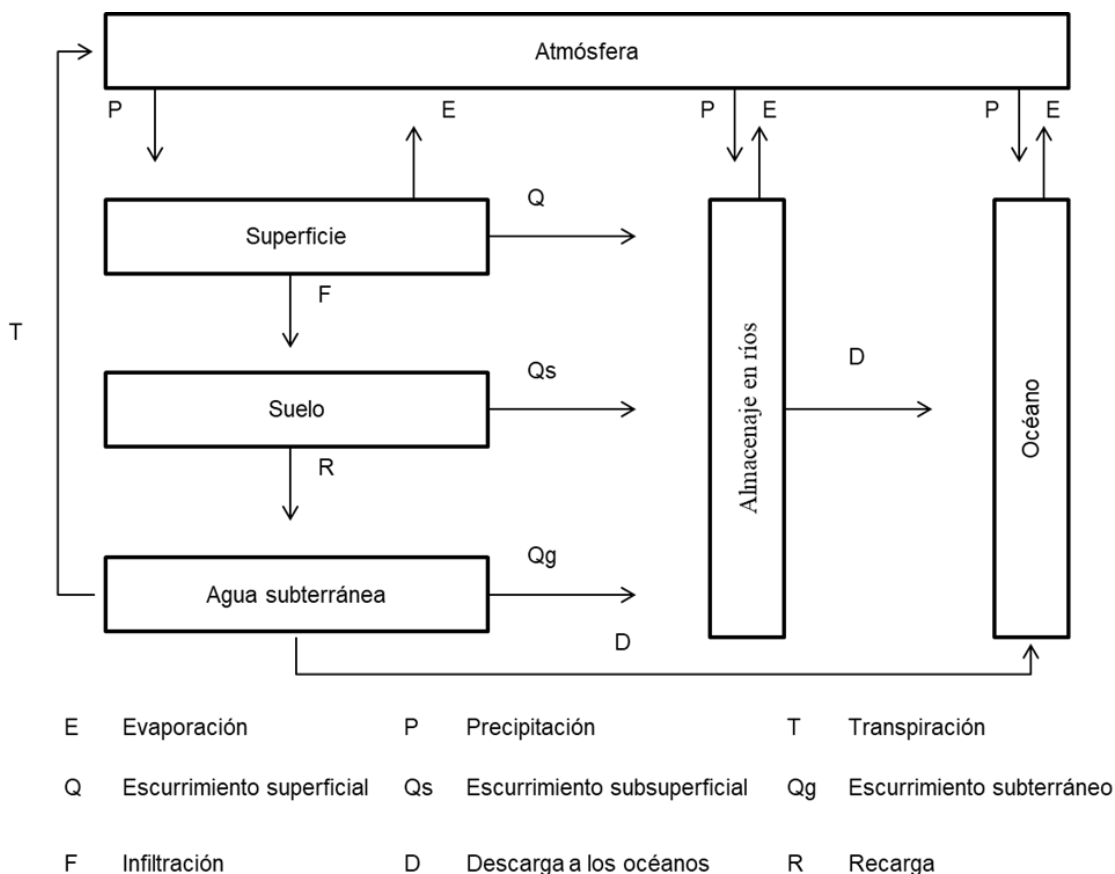


Figura 1. Representación cualitativa del ciclo hidrológico.

Fuente: Villón 2004



En el ciclo hidrológico, el agua que se encuentra en la superficie terrestre se evapora por efecto de las altas temperaturas, consecuencia de la radiación solar. El vapor es transportado a las nubes, el cual se condensa en determinadas condiciones y puede ocasionar precipitaciones que caen a la superficie terrestre por la gravedad. Durante la precipitación, el agua puede volverse a evaporar o ser interceptada por las plantas o elementos sobre la superficie, agua que luego es transpirada y devuelta a la atmósfera en forma de vapor. De la misma manera el agua que cae por precipitación puede fluir hasta la superficie o puede ser infiltrada. El agua que fluye por la superficie alimenta los cuerpos de agua, mientras que la infiltrada satisface la humedad del suelo y abastece los depósitos subterráneos. Toda el agua vuelve a evaporarse y vuelve a caer por precipitación, ocurriendo un balance hidrológico (Llorens 2003).

El volumen de agua que entra a la cuenca menos el volumen de agua que sale es igual al volumen de agua que se instala en la cuenca (Bateman 2007). Los balances hídricos permiten estimar y determinar el comportamiento del ciclo hidrológico, la capacidad de captación de las cuencas y los flujos de agua (Santillán *et al.* 2013). Para estimar un balance hidrológico de una cuenca es necesario estimar la oferta y demanda hídrica existente en la misma (Sabas y Paredes 2009). Según Duque *et al.* (2015) uno de los tantos beneficios de las cuencas hidrográficas es la captación y almacenamiento del recurso hídrico, lo cual permite aprovechar la oferta hídrica, igual a las entradas al sistema cuencas, a través de la precipitación (Ordoñez 2011).

Considerando el caudal de una determinada cuenca hidrográfica, es posible determinar la disponibilidad del agua en una zona. Por otro lado, la demanda hídrica hace referencia al agua empleada para el desarrollo de diversas actividades (Sabas y Paredes 2009). La demanda de agua se puede estimar para distintos sectores, tales como el agrícola, industrial, ganadero, salud, energía, entre otros (Ruiz-Álvarez *et al.* 2012).

## **2.1.2 Cambio climático**

Desde 1992 la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) define el cambio climático como un cambio en el clima que se atribuye de manera directa o indirecta a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera del planeta Tierra y que se suma a la variabilidad natural del clima, observadas durante periodos de tiempo comparables. Esta definición persiste en el tiempo, entendiéndose cambio climático como una variación identificable del estado del clima (variación del nivel medio y/o en las variaciones de sus propiedades) debido a procesos naturales o antropogénicos (ITESM 2010; SEMARNAT 2010; IPCC 2013a), en periodos de tiempo largos, generalmente mayores a 30 años (OMM 2011).

### ***2.1.2.1 Elementos de análisis de cambio climático***

El aumento de la temperatura, el aumento de las precipitaciones, las sequías prolongadas, así como el incremento de la desertificación provocan irregularidades tanto térmicas como pluviométricas, por lo que se convierten en elementos para considerar al analizar el clima (Allen y Ingran 2002; García *et al.* 2013; Costello y Imbar 2016). Estas variaciones climáticas son consideradas una desviación de elementos del clima respecto de sus valores normales, anomalías (AEMET 2018). Dichas anomalías climáticas pueden afectar en gran medida el ciclo hidrológico (Benavides y León 2007).

Para analizar las variaciones del clima en un período de tiempo determinado se emplean escenarios de emisiones, conocidos como Trayectorias de Concentraciones Representativas (RCPs por sus siglas en inglés). Dichas trayectorias se centran en las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, representando un forzamiento radiactivo total calculado para el año 2100 respecto al 1750 (BID 2015a).

Los RCPs se basan en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos sencillos, modelos de la química atmosférica y modelos del ciclo global del carbono (Espinoza 2016). Las trayectorias incluyen un escenario de mitigación estricto, con emisiones muy bajas (RCP2.6), dos escenarios intermedios, escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5) (IPCC 2014). Estos escenarios se muestran en el Cuadro 2 con los forzamientos radiactivos (FR) que lo caracterizan, las tendencias de FR y las emisiones de CO<sup>2</sup>.

Cuadro 2. Escenarios de Trayectorias de Concentraciones Representativas (RCPs)

RCPs	FR	Tendencia del FR	Dióxido de Carbono (CO <sup>2</sup> ) en 2100
RCP2.6	2.6 W/m <sup>2</sup>	Decreciente	421 ppm
RCP 4.5	4.5 W/m <sup>2</sup>	Estable	538 ppm
RCP 6.0	6.0 W/m <sup>2</sup>	Creciente	670 ppm
RCP 8.5	8.5 W/m <sup>2</sup>	Extremo	936 ppm

Fuente: IPCC 2014

Los escenarios de emisiones anteriores son proyectados a través de modelos de circulación global (GCMs). Los GCMs son una representación numérica del sistema climático, basada en las propiedades físicas químicas y biológicas de sus componentes, sus interacciones y procesos (IPCC 2014). La función de estos modelos radica en entender la dinámica de la atmósfera, océano, superficie terrestre y hielo marino, así como también, en realizar proyecciones basadas en emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles (BID 2015b).

Los GCMs representan el clima, a través de una malla tridimensional sobre el globo terráqueo, generalmente con una resolución horizontal de 250 a 600 km y de 10 a 20 capas verticales en la atmósfera y ocasionalmente 30 capas en océanos (IPCC 2013b; Rojas 2017). Estas representaciones son realizadas a través de ecuaciones de las leyes y principios de la física de los procesos de cada componente del sistema y los intercambios de energía (Castro 2007). En el AR4-IPCC se implementaron 22 GCMs<sup>1</sup>, de los cuales en República Dominicana se han implementado varios (Cuadro 3).

Cuadro 3. Modelos de Circulación Global empleados en República Dominicana

Modelo	Institución	Lugar	Fuente
NorESM-1	Norwegian Climate Center NCC	Oslo, Noruega	Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático
MPI-ESM-LR	Met Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	Hamburgo, Alemania	
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute (MRI)	Tsukuba, Japón	

<sup>1</sup> <http://modelos.ideam.gov.co/media/dynamic/escenarios/evaluaciondemodelosglobalesipcc.pdf>

MIROC5	Atm. and Ocean Research Inst. (Univ. of Tokyo), Nat. Inst. for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japón AORI&NIES&JAMSTEC	Japón	(PNUD 2017)
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre	Reino Unido	
GISS-E2-R	NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA-GISS)	New York, Estados Unidos	
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Meteorologiques, CNRM & CERFACS	Toulouse, Francia	
CCSM4	NCAR Community Climate System Model	Estados Unidos	
CCCMA_CGCM3_1	Canadian Center for Climate Modelling and Analysis	Canadá	Modelación hidrológica con SWAT en las cuencas Yaque del Norte, Ozama, Haina y Nizao, República Dominicana (TNC 2013)
CNRM_CM3	Centre National de Recherches Meteorologiques	Francia	
GFDL_CM2_0	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	Estados Unidos	
GFDL_CM2_1			
IPSL_CM4	Institut Pierre Simon Laplace	Francia	
MICRO3_2_MEDRES	Atmosphere and Ocean Research Institute, the University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	Japón	
MIUB_ECHO_G	Meteorological Institute, University of Bonn	Alemania	
MPI_ECHAM5	Max-Planck-Institut for Meteorology	Alemania	
MRI_CGCM2_3_2 <sup>a</sup>	Meteorological Research Institute	Japón	
ECHAM4	Max-Planck-Institute for Meteorology (MPI) and Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ)	Alemania	Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático (SEMARENA y PNUD 2009)
HADCM3	Hadley Centre	Reino Unido	
HADCM2	The Hadley Centre for Climate Prediction and Research	Reino Unido	

### **2.1.2.2 Análisis de la vulnerabilidad frente al cambio climático**

La vulnerabilidad es un proceso mediante el cual la humanidad y los ecosistemas pueden sufrir daños o amenazas ocasionadas por factores biofísicos y sociales (Ávila 2008). Con el análisis de vulnerabilidad al cambio climático se busca evaluar el riesgo de exposición al cambio climático y a fenómenos extremos respecto de la sensibilidad humana a dicha exposición y a la capacidad adaptativa del país de los impactos potenciales (CAF 2014). La exposición generalmente está vinculada a la geografía, construcciones e infraestructuras de un lugar, la sensibilidad depende del grado en que una zona se puede ver afectada por los estímulos del clima y la capacidad adaptativa depende del acceso a recursos, así como también de la flexibilidad y estabilidad existente en el lugar afectado (Jiménez *et al.* 2011; Crevenna 2016).

La República Dominicana es uno de los países más vulnerables a los efectos del cambio climático, pues ocupa el onceavo lugar y compartiendo isla con Haití, el tercer país más vulnerable, lo cual convierte a la isla La Española en una de las más vulnerables de carácter global (Kreft *et al.* 2016; USAID 2017). Según un estudio de vulnerabilidad frente al cambio climático, más del 40% del país presenta vulnerabilidad desde muy alta a alta (Izzo *et al.* 2013; CNCCMDL 2016).

Un análisis de la sensibilidad hídrica ayudaría a determinar el grado de fragilidad de una fuente determinada respecto de la amenaza a sequías, inundaciones y erosión hídrica cuando se presentan ciertas condiciones climáticas (IPCC 2007; García 2016). Es por esta razón que el presente análisis resulta una herramienta útil que permite una adecuada toma de decisión para la gestión del agua y del suelo en el área de estudio, así como también establecer políticas de manejo de los recursos (Mendoza y Jiménez 2008).

Lo que determina la sensibilidad del recurso natural (suelo o agua) de un país o región depende de factores sociales, económicos y de gobernanza (Echeverría 2011; FAO 2015). En este caso particular, se consideran sensibles aquellas zonas que tienen una variación importante respecto de otra en términos de producción de agua y erosión hídrica bajo distintos escenarios (Stevens 2011).

### **2.1.3 Afectación de cambio climático al recurso hídrico**

Según Echaverría (2011) uno de los principales impactos esperados por el cambio climático son las modificaciones de la cantidad y distribución en el tiempo de las precipitaciones. Este impacto afectará directamente al recurso hídrico ocasionando cambios en el ciclo hidrológico, provocando mayor frecuencia de inundaciones o sequías, cambio en la disponibilidad y cantidad de agua, afectando directamente las infraestructuras construidas para el aprovechamiento del recurso hídrico o afectando directamente los suelos (Bates *et al.* 2008). Las inundaciones y sequía son un riesgo importante para la mayoría de las zonas agroclimáticas (Meza *et al.* 2010).

#### **2.1.3.1 Escenarios regionales y nacionales de cambio climático**

Según las evidencias, el planeta sufrirá cambios significativos en las precipitaciones, temperaturas, el nivel de los océanos y la ocurrencia de fenómenos extremos en el siglo XXI (Corrales 2010). Según estudios, la temperatura global aumentará entre 1.5-5.8 grados centígrados y la precipitación disminuirá aproximadamente un 20% en el próximo siglo (Acevedo-

Osorio *et al.* 2017). Estos cambios son una amenaza tanto para América Latina como para el Caribe, debido a que se esperan temperaturas más altas, precipitaciones más intensas, aumento de las intensidades de los ciclones, así como también una intensificación de las sequías e inundaciones asociadas al fenómeno El Niño y La Niña (SEMARNAT 2006; Familiar 2014).

En la región del Caribe, el incremento de la temperatura y del nivel del mar, así como la frecuencia e intensidad de los huracanes son amenazas para la vida, las propiedades y los medios de subsistencia de los seres humanos (Bueno *et al.* 2008). Del mismo modo, los escenarios futuros muestran que en la región habrá una modificación en la productividad del suelo, aumento de degradación de suelo, incremento del porcentaje de desertificación, reducción de la capa forestal y aumento del número de especies en peligro de extinción (Samaniego 2009).

Las islas más pequeñas de menor elevación pueden desaparecer al sumergirse bajo niveles más elevados del mar (Bueno y Herzfeld 2008). La isla La Española será una de las más afectadas por los efectos adversos del cambio climático (USAID 2017).

En República Dominicana los sectores más sensibles son el agrícola y el de turismo, los cuales al depender de agua superficial y subterránea cuya cantidad disminuirá debido a la evaporación por el aumento de temperatura, cuyo incremento tendencial se estima entre 1°C y 3°C en la temperatura media máxima, deben prever de inmediato la acción climática. Las temperaturas mínimas aumentarán entre 1 y 3 para el 2050 y entre 2 y 6 para el 2070, mientras que las temperaturas máximas aumentarán entre 2 y 3 para el 2050 y entre 3 y 5 para el 2070 (CNCCMDL *et al.* 2016).

Por otro lado, el cambio porcentual anual promedio de las precipitaciones variará entre -40% y +20%, además, la ocurrencia de ciertos eventos afectará la erosión de suelo y la sedimentación (TNC 2013). Tanto para el 2050 como para el 2070 se espera que las lluvias disminuyan hasta en un 50% en cuatro provincias del país (Independencia, Puerto Plata, San Juan y Santiago). La precipitación total anual disminuirá 15% en el 2050 y 17% en el 2070 (CNCCMDL *et al.* 2016).

El cambio climático generará mayores impactos al alterar los regímenes climáticos e intensificar la ocurrencia de eventos extremos de lluvias entre 20 y 30% durante los meses de mayo a octubre (CNCCMDL *et al.* 2016). Las evidencias muestran que las temperaturas del país tienen tendencia a aumentar, mientras que las precipitaciones disminuirán de manera importante.

## **2.2 Modelación Hidrológica**

El modelado hidrológico de cuencas es una herramienta que permite dar a conocer la cantidad y calidad de agua de una cuenca, hacer pronóstico del recurso hídrico en los años próximos y analizar las interacciones entre la producción de escorrentía y los procesos físicos y químicos que operan en el nivel de cuenca, a diferentes escalas espaciales y temporales (Khalidou *et al.* 2013; Ocampo y Vélez 2013). Estos modelos son utilizados con el fin de hacer simulaciones para la predicción basados en procesos de hidrología y erosión (Torres-Benites *et al.* 2004). A pesar de que los modelados hidrológicos son desarrollados con más frecuencia en las últimas décadas, la disponibilidad de datos meteorológicos es escasa y esto es una limitante para el desarrollo de esta metodología (Vichis-Mata 2015).

A través de los años se han desarrollado diferentes tipos de modelados hidrológicos de cuenca (Barrios y Urribarri 2010). Algunos de estos modelos hidrológicos se presentan en el Cuadro 4:

Cuadro 4. Modelos hidrológicos utilizados en América Latina

Modelo	Descripción	Aplicación	Estudio de caso
AGNPS <sup>2</sup>	Es un modelo de distribución paramétrica para estimar la producción de sedimentos y nutrientes en tierras agrícolas (Massobrio <i>et al.</i> 1998).	Permite simular hidrología, erosión, N, P y plaguicidas (Abott 1986; FAO 1997). Además, sirve para identificar y cuantificar las fuentes de contaminantes en la cuenca (UPV 2004).	Análisis de sensibilidad de un modelo predictivo distribuido de producción de sedimentos y nutrientes asociados (AGNPS), en una microcuenca del arroyo del Tala, Argentina (Massobrio <i>et al.</i> 1998).
CASC2D <sup>3</sup>	Este es un modelo físicamente basado y distribuido que simula la respuesta hidrológica de una cuenca sujeta a un campo de lluvia (UPV 2004).	Simula hidrología y erosión. Permite simular la producción de sedimentos y la deposición final por fracción de tamaño en cualquier punto de la cuenca (UPV 2004).	Indicadores físico-geográficos en el análisis de cuencas hidrográficas y su aplicación a la microcuenca Estero, Costa Rica (Quesada y Marsik 2007).
PRMS <sup>4</sup>	Es un modelo física y espacialmente distribuido, que representa los procesos físicos de una cuenca (Mociño 2015)	Modela flujo hidrológico, evalúa los efectos de geomorfología, tipo y uso de suelo, vegetación y parámetros climáticos (Mociño 2015).	Expansión urbana, plan regulador metropolitano de Santiago y corredor fluvial de río Mapocho inferior en Chile (Ferrando 2010).
SHETRAN <sup>5</sup>	Es un modelo espacialmente distribuido, basado en procesos físicos (Birkinshaw, <i>et al.</i> 2000; Caro 2015).	Con este modelo se obtienen datos de caudales, velocidades de flujo, transporte de sedimentos y transporte de sólidos (Caro 2015).	Aplicación del sistema hidrológico europeo (SHETRAN) en una microcuenca cordillerana a problemas de inundación (Villaruel 2003).
SWAT <sup>6</sup>	Es un instrumento para la evaluación de suelo y agua (Arnold <i>et al.</i> 1998).	Permite la simulación de procesos hidrológicos, sedimentos, nutrientes y plaguicidas.	Modelación hidrológica con SWAT y el impacto del clima y el cambio de uso de suelo en las cuencas Yaque del Norte, Ozama, Haina y Nizao, República Dominicana (TNC

<sup>2</sup> Agricultural Non-Point Source

<sup>3</sup> Cascade two-dimensional

<sup>4</sup> Precipitation-Runoff Modeling System

<sup>5</sup> Systeme Hydrologique Europeen Transport

<sup>6</sup> Soil and Water Assessment Tool

			2013).
TREX <sup>7</sup>		Simula escurrimiento, erosión y transporte de sedimentos y contaminantes (Stehli <i>et al.</i> 2016).	Aplicación de un modelo hidrológico distribuido en una cuenca urbana, Brasil (Stehli <i>et al.</i> 2016).

## 2.3 Modelado Hidrológico con SWAT

SWAT es una herramienta robusta e interdisciplinaria empleada para evaluar agua y suelo en cuencas hidrográficas, desarrollado por Jeff Arnold para el Servicio Agrícola (ARS) del Departamento Agrícola de los Estados Unidos (USDA) y validado por diferentes países (Uribe 2010). Este modelo tiene gran potencial para el análisis territorial, por lo cual es uno de los modelos paramétricos más utilizados actualmente (Neitsch *et al.* 2002; Arroyo *et al.* 2010). SWAT es utilizado para predecir el impacto del uso de suelo y manejo del agua, así como también, la producción de sedimentos y las prácticas agrícolas en cuencas hidrográficas durante períodos de tiempo amplios (Neitsch 2005; Barrios y Urribarri 2010; Ulloa 2014).

Existen más de 3.500 artículos publicados que integran el componente de modelación con SWAT, lo cual evidencia su aceptación (CARD 2018). Este modelo se fundamenta en procesos físicos, incluyendo componentes de clima, hidrología, propiedades y temperatura de suelo, crecimiento de plantas, nutrientes, biocidas, bacterias y manejo de la tierra, utilizando datos de precipitación, temperatura, uso de suelo, mapa de suelo, modelo digital de elevación y la red de drenaje (Gassman *et al.* 2007; Neitsch *et al.* 2011; Carvajal 2017).

Para la aplicación del modelo SWAT se han identificado dos dificultades: la escasez de datos y la desconfianza en modelos desarrollados en diferentes latitudes (Barrios y Urribarri 2010). Como requisito, se debe ingresar información obligatoria para correr el modelo, como modelo de elevación digital, mapa de uso de suelo y mapa de tipo de suelos (Winchel *et al.* 2013).

Según Carvajal (2017), el modelo SWAT hace simulación en tres pasos:

- 1) Delimitación de la cuenca, con la utilización del modelo de elevación digital (MED) y de manera adicional se puede agregar la red hídrica;
- 2) Conformación de Unidad de Respuesta Hidrológica (HRUs), para lo cual emplea capas en formato ráster de tipos de suelos y usos de suelos y la pendiente generada a partir del MED;
- 3) Simulación, y para esto es necesario incorporar información climática por día. A partir de ello se puede calibrar el modelo con datos de salidas de la cuenca lo cual servirá como línea base.

SWAT se utiliza para conocer la dinámica del recurso hídrico de una cuenca en relación con inundaciones o sequías. Este modelo simula el ciclo hidrológico basado en la ecuación de balance hídrico siguiente (Arnold *et al.* 1998, Uribe 2010; Neitsch *et al.* 2011):

<sup>7</sup> Two-dimensional Runoff, Erosion, and eXport model

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - Ea - W_{seep} - Q_{gw})$$

Donde:

- $SW_t$  = contenido final de agua en el suelo medida en mmH<sub>2</sub>O;
- $SW_0$  = contenido inicial de agua en el suelo para el periodo de un día i (mmH<sub>2</sub>O);
- t = tiempo en días;
- $R_{day}$  = cantidad de precipitación en un día i (mmH<sub>2</sub>O);
- $Q_{surf}$  = cantidad de escorrentía en un día i (mmH<sub>2</sub>O);
- $Ea$  = cantidad de evapotranspiración en un día i (mmH<sub>2</sub>O);
- $W_{seep}$  = cantidad de agua que percola en el perfil del suelo en un día i (mmH<sub>2</sub>O);
- $Q_{gw}$  = cantidad de flujo de retorno en un día i (mmH<sub>2</sub>O).

Adicional al ciclo hidrológico, SWAT también modela la pérdida de suelos basándose en la producción de sedimentos por unidad de superficie. La erosión hídrica es un proceso de disgregación y transporte de partículas del suelo por acción del agua (Mintegui y López 1990). Para este proceso SWAT emplea la ecuación universal de pérdida de suelos modificada (Williams y Berndt 1977; Da Silva *et al.* 2016).

$$Y = 11,8 (QQRW + qWZ`a + AreaeSR):,gh * K * LS * C * P * CFRG$$

Donde:

- Y = producción de sedimento después de un evento de lluvia (ton);
- QQRW = escorrentía superficial (mm);
- $qWZ`a$  = caudal pico (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>);
- AreaeSR = área de la unidad de respuesta hidrológica (ha);
- K = factor de erodabilidad del suelo ((0,013ton<sup>-1</sup> m<sup>2</sup> h) / (m<sup>3</sup> ton cm));
- LS = factor topográfico (adimensional);
- C = factor de uso del suelo (adimensional);
- P = factor de prácticas de conservación de suelos (adimensional)
- CFRG = factor de fragmentación de la tierra (adimensional)

## 2.4 Erosión

La erosión es el movimiento del suelo superficial por factores tanto hídricos como eólicos (Christensen y Mcelyea 1988). Dentro de las variables influyentes en la tasa de erosión se destacan las siguientes: clima, vegetación, hojarasca, tipo de suelo, topografía, velocidad de flujo y uso de la tierra (Brea y Balochi 2010).

Los efectos negativos de la erosión pueden provocar disminución de la profundidad apta para cultivos y fertilidad, intensificado de dependencia de fertilizantes y provoca abandono de terrenos agrícolas, además puede alterar el funcionamiento de los ríos, la capacidad de retención de zonas inundables y eutrofización de los embalses y masas de agua (Alatorre y Beguería 2009). La modelación de la erosión resulta un buen insumo para la realización de planes de manejo de suelo (Angima *et al.* 2003).



### 3. PRINCIPALES RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se realizó una línea base en producción de agua y erosión en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte para el período 1982-2014. A pesar de los resultados insatisfactorios del proceso de calibración, empleando el algoritmo SUFI-2, se continuó con la elaboración de la línea base. Los resultados insatisfactorios se deben a que la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte es muy intervenida y dicha intervención no ha sido considerada en la modelación debido a la falta de información precisa sobre el impacto de dichas modificaciones en la producción de agua de la cuenca. Esto significa que más del 50% del agua generada no llega al punto de aforo empleado en la calibración (Hato Viejo, microcuenca Jimenoa). En el Cuadro 5 se pueden apreciar los diferentes componentes de producción de agua y erosión por microcuenca.

Cuadro 5. Componentes de producción de agua y erosión para el periodo 1982-2014 en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana

Microcuenca	PRECIP (mm)	ET (mm)	SURQ (mm)	LAT Q (mm)	GW Q (mm)	WYLD (mm)	SYLD (t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
Alta del río Yaque del Norte	3128	1247	84	1281	422	1813	55
Arroyo Los Tablones	2997	1188	12	1465	287	1781	8
Arroyo Arraiján	2997	1187	20	1400	337	1777	9
Arroyo Los Guanos	2997	1181	9	1505	260	1790	5
Arroyo Frío	3000	1200	10	1338	391	1762	4
Arroyo Sigua	3000	1203	9	1342	385	1759	9
Arroyo Grande	2997	1179	15	1332	405	1777	11
Arroyo Los Dajaos	4073	1178	30	2001	736	2811	14
Arroyo El Cercado	3122	1245	11	1494	304	1828	7
Río Yujo	3125	1274	49	1148	534	1764	37
Río Guanajuma	3125	1260	60	1275	434	1796	36
Río Jimenoa	3128	1252	103	1267	413	1809	28
Río Baiguate	3128	1255	41	1359	387	1811	24
Río Las Palmas	4069	1188	157	1793	793	2790	40
Río Arenosito	4061	1171	170	2092	537	2831	68

La producción de agua en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte es alrededor del 60% de las precipitaciones. La erosión promedio es moderada (24 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), a pesar de que el 30% del territorio tiene un alto nivel de erosión.

Se realizó una modelación hidrológica futura para el año 2030 para los RCPs 4.5 y 8.5 y bajo 5 MCG: GISS-E2-R, MRI-CGCM3, HadGEM2-ES, NORESM-1 y MIROC5. Con el RCP 4.5, la producción de agua podría disminuir en un 1%, mientras que con el RCP 8.5 disminuirá en un 19%. El grado de sensibilidad en producción de agua del área de estudio es baja con el escenario 4.5 y alta con el escenario 8.5. En términos de producción de erosión la sensibilidad es alta positiva para el 75% del territorio y es baja negativa en el 25% restante; esto es en ambos escenarios de RCP.

#### 4. LITERATURA CITADA

- Abbott, M; Bathurst, J; Cunge, J; O'Connell, P; Rasmussen, J. 1986. An introduction to the European Hydrological System: Systeme Hydrologique Européen "SHE". J. Hydrol. No. 87. Pp 45-77.
- Acevedo-Osorio, A; Angarita, A; León, M; Franco, K. 2017. Sustentabilidad climática: acciones agroecológicas participativas de adaptación y resiliencia socioecológica en la región alto-Andina colombiana (en línea). Luna azul. Universidad de Caldas. Colombia. No. 44. Pp 6-26. Consultado 19 de ago. 2018. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/-n44/n44a02.pdf>.
- AEMET (Agencia Española de Meteorología). 2018. Anomalía climática (en línea). Meteoglosario visual. España. Consultado 19 de ago. 2018. Disponible en <https://meteoglosario.aemet.es/index.php?pag=termino&ter=422>.
- Alatorre, L; Beguería, S. 2009. Los modelos de erosión: una revisión. Cuaternario y Geomorfología. Vol. 23. Pp 43-62.
- Allen MR, Ingram WJ. 2002. Constraints on future changes in climate and the hydrological cycle. Nature. No. 419. Pp 224-232.
- Angima S; Stott, D; O'Neill M; Weesies G. 2003. Soil erosion prediction using RUSLE for central Kenya highland conditions. Agr Ecosyst Environ. Pp 295-308.
- Arnold, JG; Srinivasan, R; Muttiah, RS; Williams, JR. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment Part I: Model Development. Journal of the American Water Resources Association. Vol. 34. No. 1. Pp 73-89.
- Ávila, P. 2008. Vulnerabilidad socioambiental, seguridad hídrica y escenarios de crisis por el agua (en línea). Universidad Autónoma de México. Ciencias. No. 90. Pp 46-57. Consultado 2 de jun. 2018. Disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/644/644-11395008.pdf>.
- Barrios, A; Urribarri, L. 2010. Aplicación del modelo SWAT en los Andes venezolanos: cuenca alta del río Chama. Revista Geográfica Venezolana. Vol. 5. No. 1. Consultado 2 de jun. 2018. Disponible <http://www.redalyc.org/pdf/3477/347730384002.pdf>.
- Bateman, A. 2007. Hidrología básica y aplicada (en línea). GITS (Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos). 70 p. Consultado 30 de jul. 2018. Disponible en <https://www.upct.es/~minaees/hidrologia.pdf>.
- Bates, B; Kundzewicz, Z; Wu, S; Palutikof, J. 2008. Climate change and water (online). IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). IPCC Technical Paper VI. WMO. Consulted on aug. 20 2018. Available at <https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-change-water-en.pdf>.
- Benavides, H; León, G. 2007. Gases de efecto invernadero y cambio climático (en línea). IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). Nota técnica. Colombia. 102 p. Consultado 19 de ago. 2018. Disponible en <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf/7fabbbd2-9300-4280-befe-c11cf15f06dd>.
- BID (Banco Interamericano de Desarrollo). 2015b. Modelos de circulación general (GCM) (en línea). Ideas sobre adaptación al cambio climático. Consultado 21 de ago. 2018. Disponible en <https://sector.iadb.org/es/adaptacion/pages/modelosclim%C3%A1-ticos>.
- BID (Banco Interamericano de Desarrollo). 2015a. Trayectorias de concentración representativas (RCP) (en línea). Ideas sobre adaptación al cambio climático. Consultado 21 de ago. 2018. Disponible en <https://sector.iadb.org/es/adap-tacion/pages/trayectorias-de-concentraci%C3%B3n-representativas-rcp>.

- Birkinshaw, S; Ewen, J. 2000, Modelling nitrate transport in the Slapton Wood catchment using SHETRAN. *Journal of Hydrology*, 230(1-2), 18–33.
- Bueno, R y Herzfeld, C. 2008. Caribbean and inaction cost (online). Consulted on jul 25. Available at [http://www.sei-us.org/climateandenergy/Caribbean\\_Inaction\\_Cost.-htm](http://www.sei-us.org/climateandenergy/Caribbean_Inaction_Cost.-htm).
- Brea, J; Balochi, F. 2010. Procesos de erosión-sedimentación en cauces y cuencas (en línea). Vol. 1. No. 22. 138 p. Consultado 1 de ago. 2018. Disponible en <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002163/216338s.pdf>.
- CAF (Banco de Desarrollo de América Latina). 2014. Índice de vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en la región de América Latina y el Caribe (en línea). 212 p. Consultado 31 de jul. 2018. Disponible en <http://www20.iadb.org/-intal/catalogo/PE/2014/15019es.pdf>.
- CARD (Center for Agricultural and Rural Development). 2018. SWAT literature database for peer-reviewed journal articles (online). Iowa state university. Iowa, United State. Consulted on jul. 31 2018. Available at [https://www.card.iastate.edu/swat-\\_articles/index.aspx](https://www.card.iastate.edu/swat-_articles/index.aspx).
- Carvajal, D. 2017. Dinámica hídrica bajo condiciones climáticas cambiantes en la subcuenca del río Tempisque, cuenca del Tempisque, Guanacaste, Costa Rica. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). Turrialba, Costa Rica. 88 p.
- Caro, C. 2015. Modelación hidrológica distribuida en esquemas de volúmenes finitos. Universidad Politécnica de Catalunya. Doctorado en Ingeniería Civil. Barcelona, España. 205 p.
- Castro, M. 2007. Los modelos climáticos globales: proyección regional de escenarios de cambio climático, técnicas y proyecciones en curso (en línea). ICAM-UCLM, Toledo. Universidad de Cantabria. 33 p. Consultado 21 de ago. 2018. Disponible en [http://www.meteo.unican.es/courses/2007\\_cursoRegionalizacion\\_files/2\\_1\\_Castro.pdf](http://www.meteo.unican.es/courses/2007_cursoRegionalizacion_files/2_1_Castro.pdf).
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2004. República Dominicana: evaluación de los daños ocasionados por las inundaciones en las cuencas Yaque del Norte y Yuna, 2003. s.p.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2009. Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe (en línea). Reseña. Naciones Unidas. Santiago de Chile. 161 p. Consultado 1 de ago. 2018. Disponible en <https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/2975/1/lcl3140.pdf>.
- CNCCMDL (Consejo Nacional de Cambio Climático y Mecanismo de Desarrollo Limpio); MIMARENA (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales); PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2016. Plan nacional de adaptación al cambio climático de la República Dominicana 2015-2030 (en línea). Santo Domingo, República Dominicana. 81 p. Consultado 31 de jul. 2018. Disponible en <http://www.fundacionplenitud.org/files/PNACC.pdf>.
- Corrales, L. 2010. Efectos del cambio climático para Centroamérica (en línea). Cuarto informe estado de la región. 55 p. Consultado 31 de jul. 2018. Disponible en [https://www.estadonacion.or.cr/files/biblioteca\\_virtual/otras\\_publicaciones/Pobreza%20ruralCA/Informes/Informe%20Regional%20CAMBIO%20CLIMATICO.pdf](https://www.estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/otras_publicaciones/Pobreza%20ruralCA/Informes/Informe%20Regional%20CAMBIO%20CLIMATICO.pdf).
- Costello, J; Imbar, M. 2016. Anomalías climáticas, aluviones y crecidas, eventos catastróficos de impacto mundial, regional y local. RAGF (Red Argentina de Geografía Física). Universidad Nacional de Catamarca. Argentina. 15 p.
- Christensen, L; Mcelyea, D. 1988. Toward a general method of estimating productivity–soil depth response relationships. *J. Soil and Water Cons.* 43:199–202.
- Crevenna, A. 2016. Diagnósticos de la vulnerabilidad ante el cambio climático del destino turístico de Moreloa, Michoacán (en línea). México. 286 p. Consultado 20 jun. 2019. Disponible en [http://www.sectur.gob.mx/wpcontent/uploads/2018/01/7\\_-Morelia.pdf](http://www.sectur.gob.mx/wpcontent/uploads/2018/01/7_-Morelia.pdf).

- Da Silva, R; Vieira, E; Carvalho, C; Oliveira, M; Amorim, C; Nasralla, E. 2016. Age-related differences on low back pain and postural control during one-leg stance: a case-control study (online). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Consulted on 5 sept. 2018. Available at [https://www.researchgate.net/publication/299514200\\_Da\\_Silva\\_et-\\_al\\_2016\\_ESJ](https://www.researchgate.net/publication/299514200_Da_Silva_et-_al_2016_ESJ).
- De León, M. 2007. 2.5% es dulce y 97.5% es agua salada en el mundo (en línea). Burica Press. Panamá. Consultado 6 de sept. 2018. Disponible en <https://burica.wordpress.com/2007/03/22/25-es-dulce-y-975-es-agua-salada-en-el-mundo/>.
- Duque Yaguache, Luis Felipe; Vázquez Zambrano, RF. 2015. Modelación de la oferta hídrica en una cuenca de montaña tropical en función de su cobertura del suelo. No. 7. Pp. 63-76.
- Easton, Z; Bock, E. 2015. Hydrology basics and the hydrologic cycle (online). Virginia Cooperative Extension. Virginia State University. Publication BSE-191P. 9 p. Consulted on sept. 6 2018. Available at [https://ext.vt.edu/content/dam/ext\\_vt\\_edu/topics/agriculture/water/-documents/Hydrology-Basics-and-the-Hydrologic-Cycle.pdf](https://ext.vt.edu/content/dam/ext_vt_edu/topics/agriculture/water/-documents/Hydrology-Basics-and-the-Hydrologic-Cycle.pdf).
- Echeverría, J. 2011. Evaluación de la vulnerabilidad futura del sistema hídrico al cambio climático (en línea). Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Instituto Meteorológico Nacional. San José, Costa Rica. 88 p. Consultado 2 de jun. 2018. Disponible en [https://www.preventionweb.net/files/28416\\_evaluaciondelavulnerabilidadfuturad.pdf](https://www.preventionweb.net/files/28416_evaluaciondelavulnerabilidadfuturad.pdf).
- Espinoza, H. 2016. Integración de la adaptación al cambio climático en el manejo de cuencas; el caso de la cuenca del río Acomé, Guatemala (en línea). CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). Turrialba, Costa Rica. 87 p. Consultado 21 de ago. 2018. Disponible en [http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8499/-Integracion\\_de\\_la\\_adaptacion\\_al\\_cambio.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8499/-Integracion_de_la_adaptacion_al_cambio.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Familiar, J. 2014. Impacto del cambio climático en América Latina y el Caribe: cómo hacer frente a la nueva realidad climática (en línea). BM (Banco Mundial). Washington, D.C., Estados Unidos. Consultado 19 de ago. 2018. Disponible en <http://www.bancomundial.org/es/news/speech/2014/12/02/climatechangeimpactsinlatinamericaandthecaribbeanconfronting-the-new-climate-normal>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2015. El suelo es un recurso no renovable: su conservación es esencial para la seguridad alimentaria y nuestro futuro sostenible (en línea). 4 p. Consultado 30 de jun. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-i4373s.pdf>.
- Fernández, A. 2012. El agua: un recurso esencial (en línea). CETA (Instituto Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua). Revista Química Viva. No. 3. Buenos Aires. 25 p. Consultado 2 de jun. 2018. Disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/-/863/86325-090002.pdf>.
- Fondo Agua. 2017. Fondo Agua Yaque del Norte (video). Santo Domingo, República Dominicana. 1 video, 15 min. 32 seg. son., color. Consultado 23 de ago. 2018. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=NPJv6OWBSu8&t=354s>.
- Fondo Agua. 2018. Cuenca del río Yaque del Norte (en línea). Consultado 23 de ago. 2018. Disponible en <http://fondoaguayaque.org/cuenca-yaque-del-norte/>.
- García, M; Sánchez, FD; Marín, R; Guzmán, H; Verdugo, N; Dominguez, E; Vargas, O; Panizzo, L; Sánchez, N; Gómez, J; Cortés, G. 1998. El agua. El medio ambiente en Colombia. Pp 35-189.
- García, M; Piñeros, A; Bernal, F; Ardila, E. 2012. Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia 8 en línea). Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia. No. 36. Pp 60-64. Consultado 8 de sept. 2018. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n36/n36a12.pdf>.
- García, M; Paniagua, L; Coletto J. 2013. Anomalías climáticas en extremadura en los últimos 40

- años: irregularidades pluviométricas. La agricultura y la ganadería extremeñas. Pp 171-184.
- García, Y. 2016. Índice de vulnerabilidad del recurso hídrico con fines de riego en la cuenca hidrográfica del río Naranjo (en línea). Agencia del medio ambiente. No. 31. 9 p. Consultado 2 de jun. 2018. Disponible en <http://ama.redciencia.cu/articulos/-31.07.pdf>.
- Gassman, P; Reyes, M; Green, C; Arnold, J. 2007. The soil and water assessment tool: historical development, applications and future research direction (online). Invited review series. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Vol. 50. No. 4. Pp 1211-1250. Consulted on jun. 2 2018. Available at [https://www.card.iastate.edu/research/-resourceandenvironmental/items/asabe\\_swat.pdf](https://www.card.iastate.edu/research/-resourceandenvironmental/items/asabe_swat.pdf).
- Herrera, A; Orrego, JC. 2011. Revisión del estado de la situación de riesgo climático y su gestión en República Dominicana. s.p.
- Hoyos, F. 2016. La ciencia de restaurar cuencas (en línea). Cenicaña. Programa de Agronomía. Carta informativa. Cali, Colombia. No. 2. Pp 5-7. Consultado 23 de ago. 2018. Disponible en [http://www.cenicana.org/pdf\\_privado/carta\\_informativa/-2016\\_n2/2016\\_n2.pdf](http://www.cenicana.org/pdf_privado/carta_informativa/-2016_n2/2016_n2.pdf).
- INDC-RD (Interneted Nationally Determinated Contribution-República Dominicana). 2015. Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional INDC-RD (en línea). República Dominicana, s.e. 1-4 p. Consultado 2 de jun. 2018. Disponible en [http://www4.unfccc.int/Submissions/INDC/PublishedDocuments/DominicanRepublic/1/INDC-RD Agosto 2015 \(español\).pdf](http://www4.unfccc.int/Submissions/INDC/PublishedDocuments/DominicanRepublic/1/INDC-RD Agosto 2015 (español).pdf).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability (online). Contribution of working group II to the fourth assesment report of the Interguvernamental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 976 p. Consulted on jun. 2 2018. Availailable at [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4\\_wg2\\_full\\_report.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4_wg2_full_report.pdf).
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2013a: Glosario (en línea). Planton, S. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. Consultado 30 de jul. 2018. Disponible en [https://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/wg1/WGI\\_AR5\\_glossary\\_-ES.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/wg1/WGI_AR5_glossary_-ES.pdf).
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático). 2013 b. ¿Qué es un GCM (en línea)? Centro de distribución de datos. Consultado 21 de ago. 2018. Disponible en [http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm\\_guide.html](http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html).
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático). 2014. Cambio climático 2014: informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza. 157 p.
- ITESM (Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey). 2010. Elementos técnicos para la elaboración de programas estatales de acción ante el cambio climático (en línea). Instituto Nacional de Ecología. Monterrey, México. 38 p. Consulado 30 de jul. 2018. Disponible en [http://www.cca.org.mx/lideres/cursos/cambio\\_climatico1/pdfs/m1/m1\\_vi.pdf](http://www.cca.org.mx/lideres/cursos/cambio_climatico1/pdfs/m1/m1_vi.pdf).
- Izzo, M; Rathe, L; Arias, D. 2013. Informe Reporte Final Puntos Críticos para la Vulnerabilidad a la Variabilidad y Cambio Climático en la República Dominicana y su Adaptación al mismo. (en línea). Santo Domingo, República Dominicana. 1 ed. 392 p. Consultado 2 de jun. 2018. Disponible en [http://pdf.usaid.gov/-pdf\\_docs/PA00JJ3J.pdf](http://pdf.usaid.gov/-pdf_docs/PA00JJ3J.pdf).

- Jiménez, R; Amit, R; Vindas, R. 2011. Políticas de cambio climático en Costa Rica, integrando esfuerzos para asumir los retos (en línea). cide (centro de investigación en cultura y desarrollo). 154 p. Consultado 20 jun. 2019. Disponible en <https://investiga.uned.ac.cr/cicde/images/polcam.pdf>.
- Kreft, S; Eckstein, D; Dorsch, L; Fische, L. 2016. Global climate risk index (online). Briefing paper. 32 p. Available at <https://germanwatch.org/fr/download/13503.pdf>.
- Khalidou, B; Díaz-Delgado, C; Quentin, E; Guerra-Cobián, V; Ojeda-Chihuahua, J; Cârsteanu, A; Franco-Plata, R. 2013. Modelado hidrológico de grandes cuencas: caso de estudio del Río Senegal, África Occidental. *Tecnologías y Ciencias del Agua*. México. Vol. 4. No. 2. Pp 129-136. Consultado 2 de jun. 2018. Disponible en <http://www.redalyc.org/-pdf/3535/353531982008.pdf>.
- Llorens, P. 2003. La evaluación y modelización del balance hidrológico a escala de cuenca (en línea). *Ecosistemas*. No. 1. 5 p. Consultado 2 de jun. 2018. Disponible en <http://www.redalyc.org/-pdf/540/54012111.pdf>.
- Mansilla, E. 2012. Análisis de vulnerabilidades frente al cambio climático (en línea). Distrito de Challabamba, Cusco, Perú. 98 p. Consultado 1 de ago. 2018. Disponible en <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002259/225959S.pdf>.
- Mardones, G. 2009. Implementación y uso del modelo WEAP en cuencas nivales de la IV región para el análisis climático. Universidad de Chile. Departamento de Ingeniería Civil. Santiago de Chile. 84 p.
- Massobrio, M; Castiglioni, M; Chagas, C; Santanotoglia, O. 1998. Análisis de sensibilidad de un modelo predictivo distribuido de producción de sedimentos y nutrimentos asociados (AGNPS), en una microcuenca del arroyo del Tala, Argentina (en línea). *Terra Latinoamérica*. Argentina. Consultado 22 de ago. 2018. Disponible en <http://www.redalyc.org/html/573/57316410/>.
- Mendoza, M; Jiménez, F. 2008. Metodología para el análisis de la vulnerabilidad del recurso hídrico para consumo humano: validación en tres acueductos de la subcuenca del río Copán, Honduras. *Recursos naturales y ambiente*. No. 56-57. Consultado 2 de jun. 2018. Disponible en [http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6568/-Metodologia\\_para\\_el\\_analisis\\_de\\_la\\_vulnerabilidad.pdf;jsessionid=CB93C008FFFE09273D83E7509365E509?sequence=1](http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6568/-Metodologia_para_el_analisis_de_la_vulnerabilidad.pdf;jsessionid=CB93C008FFFE09273D83E7509365E509?sequence=1).
- MEPyD (Ministerio de Economía Planificación y Desarrollo). 2009. Documento base de la propuesta de Estrategia Nacional de Desarrollo 2010-2030: un viaje de transformación hacia un país mejor (en línea). 153 p. Consultado 23 de ago. 2018. Disponible en [https://www.unicef.org/republicadominicana/Documento\\_base-\\_propuesta\\_END\\_2010\\_2030.pdf](https://www.unicef.org/republicadominicana/Documento_base-_propuesta_END_2010_2030.pdf).
- Meza, L; Corso, S; Soza, S. 2010. Gestión del riesgo de sequía y otros eventos climáticos extremos en Chile (en línea). FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). Chile. Consultado 20 de ago. 2018. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-as447s.pdf>.
- MIMARENA (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2018. Cuencas hidrográficas (en línea). Santo Domingo, República Dominicana. Consultado 23 de ago. 2018. Disponible en <http://ambiente.gob.do/cuencas-hidrograficas/>.
- Mintegui, J; López F. 1990. La Ordenación Agrohidrológica en la planificación. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 306 p.
- Miranda, J. 2008. Cambio climático y patrones de precipitación: efecto sobre las comunidades vegetales semiáridas (en línea). *Revista Ecosistema*. Almería, España. Pp 161-165.

- Consultado 1 de ago. 2018. Disponible en <https://core.ac.uk/download/pdf/16362087.pdf>.
- Mociño, K. 2015. La cobertura y uso del suelo en la producción de sedimentos y escurrimiento superficial en la cuenca Tejote, México, mediante el modelo hidrológico SWAT. Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Química. Maestría en Ciencias Ambientales. Toluca, México. 277 p.
- Neitsch, S; Arnold, J; Kiniry, J; Williams, J; King, K. 2002. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation (online). Version 2000. GSWRL Report 02-01; BRC Report 02-05; TWRI Report TR-191. College Station, Texas. Available at <http://www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swat2000theory.pdf>.
- Neitsch, S; Arnold, J; Kiniry, J; Srinivasan, R; Williams, J. 2005. Soil and Water Assessment Tool. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service. Theoretical Documentation, Texas, 475 pp.
- Neitsch, SL; Williams, JR; Arnold, JG; Kiniry, JR. 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute. 618 p.
- Noriega, O; Gutiérrez, Y; Rodríguez J. 2011. Análisis de vulnerabilidad y el riesgo a inundaciones en la cuenca baja del río Gaira, en el Distrito de Santa Marta. Prospect. Vol. 9. Núm. 2. Pp 93-102.
- Ocampo, O; Vélez, J. 2013. Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del Río Chinchiná (en línea). Revista Ingenierías. Universidad de Medellín, Colombia. Vol. 13. No. 24. 16 p. Consultado 2 de jun. 2018. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v13n24/v13n-24a04.pdf>.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial). 2011. Guía de prácticas climatológicas (en línea). No. 100. 128 p. Consultado 24 de jul. 2018. Disponible en [https://library.wmo.int/pmb\\_ged/wmo\\_100\\_es.pdf](https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_100_es.pdf).
- OMS (Organización Mundial de la Salud). 2018. Cambio climático y salud (en línea). Nota descriptiva. Consultado 8 de sept. 2018. Disponible en <http://www.who.int/-es/news-room/fact-sheets/detail/cambio-clim%C3%A1tico-y-salud>.
- Ordoñez, J. 2011. Ciclo hidrológico (en línea). Cartilla técnica. Sociedad geográfica de Lima. Perú. 44 p. Consultado 6 de jun. 2018. Disponible en [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwpsam\\_files/publicaciones/varios/ciclo\\_hidrologico.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwpsam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrologico.pdf).
- Oswaldo, H; León, G. 2007. Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio global (en línea). IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). Nota técnica. Colombia. Consultado 19 de sept. 2018. Disponible en <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf/7fabbbd2-9300-4280-befe-c11cf15f06dd>.
- Pacheco, S; Valdés, C. 2012. Efecto ambiental del derretimiento del Ártico y su impacto en el territorio. RIAT (Revista Interamericana de Ambiente y Turismo). Vol. 8. No. 1. Pp 8-16.
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2017. Tercera comunicación nacional. Santo Domingo, Republica Dominicana. 348 p.
- Pladeyra, S; Escolero, O; Dominguez, E; Martínez, S. 2008. Ciclo hridrológico (en línea). Atlas de la cuenca Lerma-Chapala. Consultado 2 de jun. 2018. Disponible en [http://www.emapas.inecc.gob.mx/download/lch\\_ciclo\\_hidrologico.pdf](http://www.emapas.inecc.gob.mx/download/lch_ciclo_hidrologico.pdf).
- Plan Yaque. 2018. Programa para la restauración hídrica de la porción Este de la cuenca media del río Yaque del Norte (PRO-YAQUE I): Conjunto de medidas de intervención y de gobernanza para la restauración y manejo sostenible de las 15 microcuencas del territorio comprendido entre Manabao-Jarabacoa-Taveras y Jimenoa, período 2018 al 2023. 32 p.

- PLENITUD (Fundación Plenitud); CCCCC (Caribbean Community Climate Change Centre); CNCCMDL (Consejo Nacional para el Cambio Climático y Mecanismo de Desarrollo Limpio); MA (Ministerio de Agricultura). 2014. Estrategia Nacional de Adaptación al Cambio Climático en el Sector Agropecuario de la República Dominicana 2014-2020 (en línea). Santo Domingo, República Dominicana. 122 p. Consultado 23 de ago. 2018. Disponible en <http://fundacionplenitud.org/files/NASAP%20%20esp%20-final%20pdf.pdf>.
- Quesada, M; Marsik, M. 2007. Indicadores físico-geográficos en el análisis de cuencas hidrográficas y su aplicación a la microcuenca Estero, Costa Rica (en línea). Bdigital. No. 15. Consultado 22 de ago. 2018. Disponible en <https://revistas.unal.edu.co/-index.php/arh/article/view/9322/9965>.
- Rathe, L. 2008. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático en la República Dominicana (en línea). Santo Domingo, República Dominicana. 114 p. Consultado 23 de ago. 2018. Disponible en <http://www.fundacionplenitud.org/-files/Plan%20Nacional%20de%20Adaptaci%C3%B3n%20PANA.pdf>.
- Reynoso, D. 2015. Contraste de la disponibilidad y demanda de agua por provincia. República Dominicana, s.e. 57 p.
- Rodríguez, D; Pérez, P. 2014. Determinación de la recarga hídrica potencial en la cuenca hidrográfica Guara, de Cuba (en línea). Cuba. Aqua-LAC - Vol. 6. Num. 2. Pp. 58 – 70. Consultado 19 de sept. 2018. Disponible en <http://www.unesco.org/-new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/06-RodriguezLugo.pdf>.
- Rojas, P. 2017. ¿Qué es un Modelo GCM: Modelos de Circulación General? (en línea). INGECIV (Blog de Ingeniería Civil). Consultado 21 de ago. 2018. Disponible en <https://www.ingeciv.com/que-es-un-modelo-gcm-modelos-de-circulacion-general/>
- Ruiz-Álvarez, O; Artega Ramírez, R; Vásquez-Peña, MA; Ontiveros, RE; López-López, R. 2012. Balance hídrico y clasificación climática del estado de Tabasco, México (en línea). Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA). UACH (Universidad Autónoma Chapingo). México. 14 p. Consultado 2 de jun. Disponible en <http://www.scielo.org.mx/pdf/uc/v28n1/v28n1a1.pdf>.
- Sabas, C; Paredes, D. 2009. Estudio De oferta y demanda hídrica en la cuenca del río Barbas. (en línea). Scientia et Technica Año XV, No 42. Pp 405-410. Consultado 2 de jun. 2018. Disponible en <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Estudio+de+oferta+y+demanda+hídrica+en+la+cuenca+del+río+barbas.#1>.
- Samaniego, J. 2009. Cambio climático y desarrollo en América Latina y El Caribe: una reseña (en línea). CEPAL (Comisión Económica para América Latina y El Caribe). Naciones Unidas. Santiago de Chile. No. 28. Consultado 19 de ago. 2018. Disponible en [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3640/1/S2009028\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3640/1/S2009028_es.pdf).
- Santillán, E; Davila-Vásquez, G; Sánchez, A; Díaz, J. 2013. Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas en la cuenca del río Cazonos, Veracruz, México (en línea). Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Ambiente y Agua. Vol. 8. Núm. 3. Pp 104-117. Consultado 2 de jun. del 2018. Disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/928/92829234009.pdf>.
- SEMARENAT (Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales); PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2004. Primera comunicación nacional de cambio climático (en línea). Santo Domingo, República Dominicana. 163 p. Consultado 8 de sept. 2018. Disponible en <https://unfccc.int/resource-/docs/natc/domrepnc1.pdf>.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2006. El cambio climático en



- América Latina y El Caribe. PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). La Habana, Cuba. ISBN 968-817-677-X. 140 p.
- SEMARENAT (Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales); PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2009. Segunda comunicación nacional de cambio climático (en línea). Santo Domingo, República Dominicana. 318 p. Consultado 8 de sept. 2018. Disponible en <http://dipecholac.net/docs/files/529-domrepnc2.pdf>.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2010. Cambio climático: ciencia, evidencia y acciones (en línea). Tlalpan, México. 93 p. Consultado 30 de jul. 2018. Disponible en [http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/cambio\\_climatico\\_09-web.pdf](http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/cambio_climatico_09-web.pdf).
- Stehli, P; Weber, J; Vestena, L. 2016. Aplicación de un modelo hidrológico distribuido en una cuenca urbana (en línea). IFRH (Encuentro de Investigadores en Formación en REcursos Hídricos). Paraná, Brasil. No. 3. 15 p. Consultado 24 de ago. 2018. Disponible en [https://www.ina.gob.ar/ifrh-2016/trabajos/IFRH\\_2016\\_paper\\_26.pdf](https://www.ina.gob.ar/ifrh-2016/trabajos/IFRH_2016_paper_26.pdf)
- Stehr, A; Debels P; Arumi; JL; Alcayaga, H; Romero, F. 2010. Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático: experiencias de dos cuencas de la zona centro-sur de Chile (en línea). Tecnología y ciencias del agua. Vol. 1. No. 4. Consultado 23 de ago. 2018. Disponible en [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222010000400002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222010000400002).
- TNC (The Nature Conservancy). 2013. SWAT hydrological modeling and the impact of climate and land use change on the Yaque del Norte, Ozama, Haina, and Nizao watersheds. Environmental protection program. Reverside technology. Colorado, United State. No. 51. 190 p.
- TNG (The National Geographic). 2018. Así afecta el cambio climático al agua del planeta (en línea). Naturaleza. España. Consultado 6 de sept. 2018. Disponible en [https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/asi-afecta-el-cambio-climatico-al-agua-del-planeta\\_9947/1](https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/asi-afecta-el-cambio-climatico-al-agua-del-planeta_9947/1).
- Torres-Benites, E; Fernández-Reynoso, D; Oropeza-Mota, J; Mejía-Saens, E. 2004. Calibración del modelo SWAT en la cuenca El Tejote, Atlacomulco, Estado de México (en línea). Terra Latinoamericana. Chapingo, México. Vol. 22. No. 4. Pp 437-444. Consultado 2 de jun. 2018. Disponible en <http://www.redalyc.org/-pdf/573/57311096007.pdf>.
- Tuesca, R; Ávila, H; Sisa, A; Pardo, D. 2013. Fuentes de abastecimiento de agua para consumo humano: análisis de abastecimiento de agua para consumo humano (en línea). IDEHA (Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales. Universidad del Norte. Barranquilla. Colombia. 190 p.
- Ulloa, D. 2014. El aporte de las zonas ribereñas al control de las inundaciones: estudio de caso de la cuenca Cahoacán, Chiapas, México. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). Tesis de Maestría en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas. Turrialba, Costa Rica. 72 p.
- UPV (Universidad Politécnica de Valencia). 2004. Desarrollo del módulo geomorfológico para el modelo hidrológico distribuido TETIS. Informe I+D+I. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Valencia, España. 77 p.
- Uribe, N. 2010. SWAT (Soil and Water Assessment Tool): conceptos básicos y guiarápida para el usuario. 47 p. Consultado 2 de jun. 2018. Disponible en <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- USAID (United States Agency for International Development). 2017. Climate risk profile Dominican Republic. Pp 1-5.
- Vichis-Mata, I; Khalioudou, M; Franco-Plata, R; Díaz-Delgado, C. 2015. Modelación hidrológica con

- base en estimaciones de precipitación con sensores hidrometeorológicos (en línea). Tecnologías y ciencia del agua. Morelos, México. Vol. 6. No. 4. Pp 45-60. Consultado 2 de jun. de 2018. Disponible en <http://www.redalyc.org/pdf/3535/353543299003.pdf>
- Villarroel, A. 2003. Aplicación del sistema hidrológico Europeo (SHETRAN) en una microcuenca cordillerana a problemas de inundación. Universidad de Chile, Ciencias Ecológicas. Santiago, Chile. 46 p.
- Villón, M. 2004. Hidrología. 1 ed. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica. 476 p.
- WB (World Bank). 2018. World Development Indicators: total population (online). Consulted on jun. 2. Available at <http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=2&series=-SP.POP.TOTL>.
- Winchel, M; Srinivasan, R; Di Luzio, M; Arnold, J. 2013. ArcSWAT Interface for SWAT 2012: User's Guide. Texas AgriLife Research, USDA Agricultural Research Service. Texas, USA. 464 p.
- Williams, JR; Berndt, HD. 1977. Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology. Transactions of the ASAE. Pp 1100-1104.

## CAPÍTULO II

### Artículo 1. Línea base de producción de agua y erosión hídrica en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana

#### RESUMEN

Un modelo hidrológico representa de manera simplificada un sistema complejo. La modelación hidrológica es una herramienta importante en el estudio de dinámica hídrica. Con los modelos pueden hacerse diferentes análisis y tomar medidas para enfrentar problemas de origen hídrico. El objetivo de este trabajo fue estimar mediante modelación hidrológica la producción de agua y erosión en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana. Este trabajo se hizo con QSWAT 1.8. El modelo se calibró con SWAT-CUP. La parametrización, el análisis de sensibilidad y la calibración se realizó con el algoritmo SUFI-2. El coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE) varió de -78 a -8, permaneciendo como insuficiente porque no se incluyeron las extracciones de agua en el área de estudio. La producción promedio de agua fue de  $1,993 \text{ mm}^{-1}$ , 61% de las precipitaciones. El mayor pico de producción de agua se presenta en la microcuenca Arroyo Los Dajaos ( $2,811 \text{ mm}^{-1}$ ) y el pico más bajo fue el de Arroyo Sigua ( $1,759 \text{ mm}^{-1}$ ). La erosión media en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte es de  $24 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , considerada moderada. Finalmente, el 30% del área mostró un alto grado de erosión, 56% moderado y el 14% baja.

**Palabras claves:** SWAT, SWAT-CUP, SUFI-2, precipitaciones, caudales, descarga de sedimentos, producción de agua, erosión.

#### ABSTRACT

A hydrological model represents in a simplified way a complex system. Hydrological modeling is an important tool in the study of water dynamics. With the models you can make different analyzes and take measures to face problems of water origin. The objective of this work was to estimate hydrological modeling of water production and erosion in the upper section of the Yaque del Norte river basin, Dominican Republic. This work was done with QSWAT 1.8. The model was calibrated with SWAT-CUP. Parameterization, sensitivity analysis and calibration were performed with the SUFI-2 algorithm. The Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) varied from -78 to -8, remaining insufficient because the water extractions were not included in the study area. The average water production was  $1,993 \text{ mm}^{-1}$ , 61% of the rainfall. The largest peak of water production occurs in the Arroyo Los Dajaos micro-basin ( $2,811 \text{ mm}^{-1}$ ) and the lowest peak was that of Arroyo Sigua ( $1,759 \text{ mm}^{-1}$ ). The average erosion in the upper section of the Yaque del Norte river basin is  $24 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ , considered moderate. Finally, 30% of the area showed a high degree of erosion, 56% moderate and 14% low.

**Key words:** SWAT, SWAT-CUP, SUFI-2, rainfall, discharge, sediment discharge, water production, erosion.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Un modelo hidrológico es una representación simplificada de un sistema real complejo (IDEAM 2014). La modelación se basa en mayor o menor grado en que los diversos factores ambientales interactúan cercana y causalmente en tiempo y espacio (IDEAM 2018). Esta es una herramienta importante para el estudio de la dinámica hídrica (Carvajal 2017), ya que con ellos es posible hacer análisis y tomar medidas ante posibles problemas de origen hídrico (sequías, inundaciones, erosión hídrica, etc) (Muñoz *et al.* 2007; Estrada y Pacheco 2012). En consecuencia, actualmente es más exigente la preparación de aquellos que se basan en la modelación para la toma de decisiones (IDEAM 2018).

Existen diversas formas de clasificar los modelos, como la propuesta por Vélez (2008): descriptivos, gráficos, experimentales, análogos, a escala o modelos físicos y matemáticos. Un ejemplo de modelo matemático es el modelo hidrológico SWAT (SEDPA 2010; Oñate-Valdivieso *et al.* 2015). SWAT, por sus siglas en inglés, es una herramienta para la evaluación del suelo y agua en cuencas hidrográficas (Uribe *et al.* 2010). Este modelo es bastante predictivo, pero tiene como limitante la enorme cantidad de parámetros de entrada que requiere (Arroyo *et al.* 2010; Rivera-Toral 2012).

SWAT permite estimar la producción de agua y erosión en el nivel de cuencas (Uribe *et al.* 2010; Carvajal 2017). Según evidencias en la cuenca más importante de la República Dominicana, la del río Yaque del Norte, existe escasez de agua (Caraballo 2019; Molina 2019<sup>a</sup>). Un estudio plantea que al año 2025 cinco de seis provincias ubicadas en la parte media y baja de esta cuenca tendrán problemas importantes por la escasez de agua Reynoso (2015).

Otra problemática muy discutida en el área de estudio es la de erosión (Fondo Agua 2017; Plan Yaque 2018). La erosión hídrica es un problema de degradación de suelos que provoca impactos ambientales, efectos sobre la producción agrícola y alteración de la calidad del agua (Nájera *et al.* 2016).

Actualmente se carece de una cuantificación por secciones de la cuenca en términos de producción de agua y la erosión. En el presente estudio se analizaron ambas variables en cada una de las microcuencas que componen la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte. Esto se realiza con la finalidad de tener una línea base en producción de agua y erosión que permita dar un panorama general de la situación actual de las microcuencas y que esto sirva de base para los tomadores de decisiones.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1 Área de estudio**

El estudio fue realizado en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte, ubicada en las coordenadas 18 55' hasta 19 17' Latitud Norte y 70 31' a 70 50' Longitud Oeste entre la presa de Taveras en Santiago de Los Caballeros y el Parque Nacional Armando Bermúdez en La Vega. La sección alta de la cuenca abarca 15 microcuencas entre las comunidades Manabao, Jarabacoa, Taveras y Jimenoa (Figura 2). El área de estudio tiene una superficie de 898.3 km<sup>2</sup>,

aproximadamente el 13% de la cuenca del río Yaque del Norte. La altitud de la zona va desde los 315 msnm hasta los 3,052 msnm (Díaz 2010).

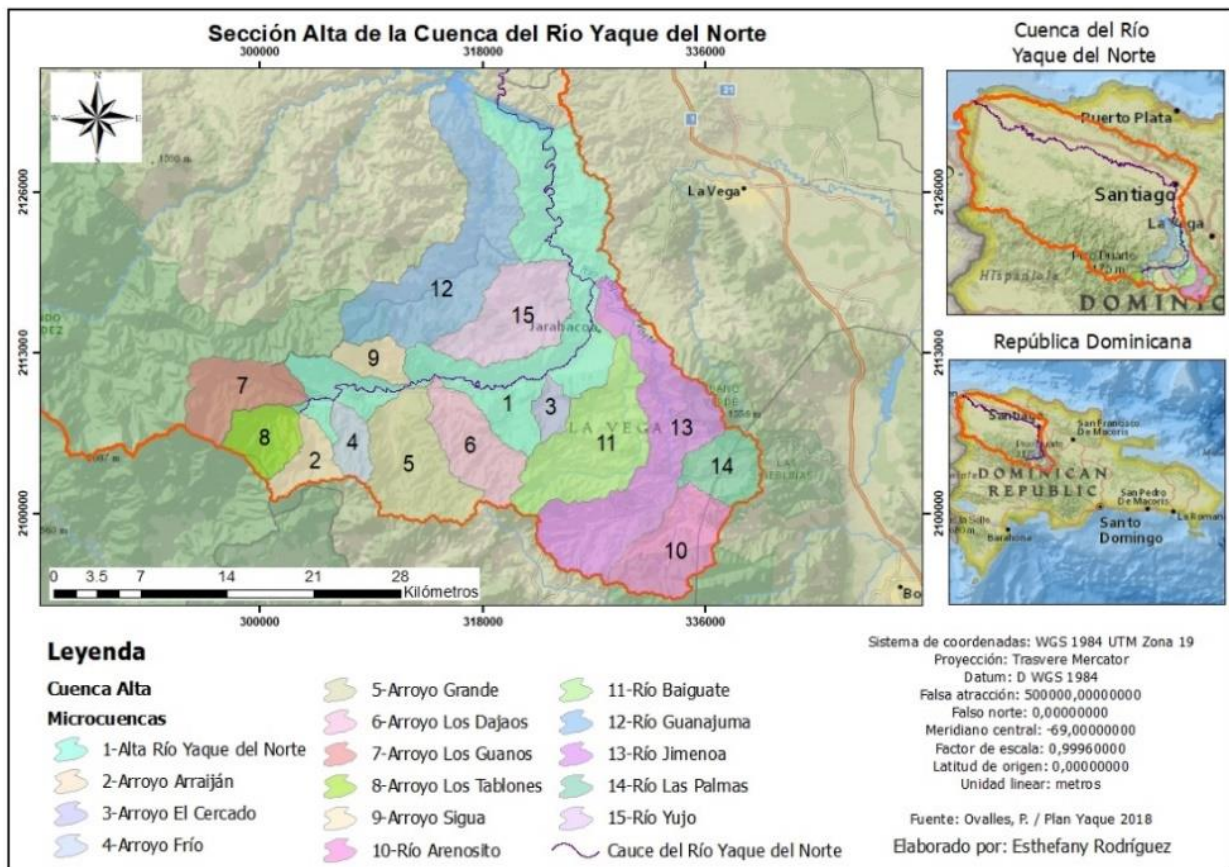


Figura 2. Ubicación de área de estudio

### 2.1.1 Clima en el área de estudio

El clima predominante de la República Dominicana es el subtropical, con una temperatura media anual de 25 °C. La precipitación media anual varía entre 455 mm y 2,743 mm. Las estaciones de lluvia son dos: una más intensa (abril-junio) y otra moderada (septiembre-noviembre), y el periodo diciembre-marzo es el menos lluvioso (SEA *et al.* 1993). En la cuenca del río Yaque del Norte la precipitación varía entre 500 y 2,000 mm (Marcano 2016). En la sección alta de la cuenca la precipitación puede variar entre 800 mm en la parte más baja y 4,000 mm en el parque nacional J. Armando Bermúdez (GIZ 2014; BLI 2019).

De acuerdo con los datos facilitados por la Oficina Nacional de Meteorología (ONAMET), del período 1970-1982, en la estación climática de Jarabacoa la precipitación promedio es de 1,549.48 mm. Los extremos ocurren en los siguientes meses: mayo el mes más lluvioso (2,328.6 mm) y junio el menos lluvioso (863.3 mm). Por otro lado, las temperaturas promedio mensuales están entre 16.28 °C la mínima y 26.81 °C la máxima (Figura 3).

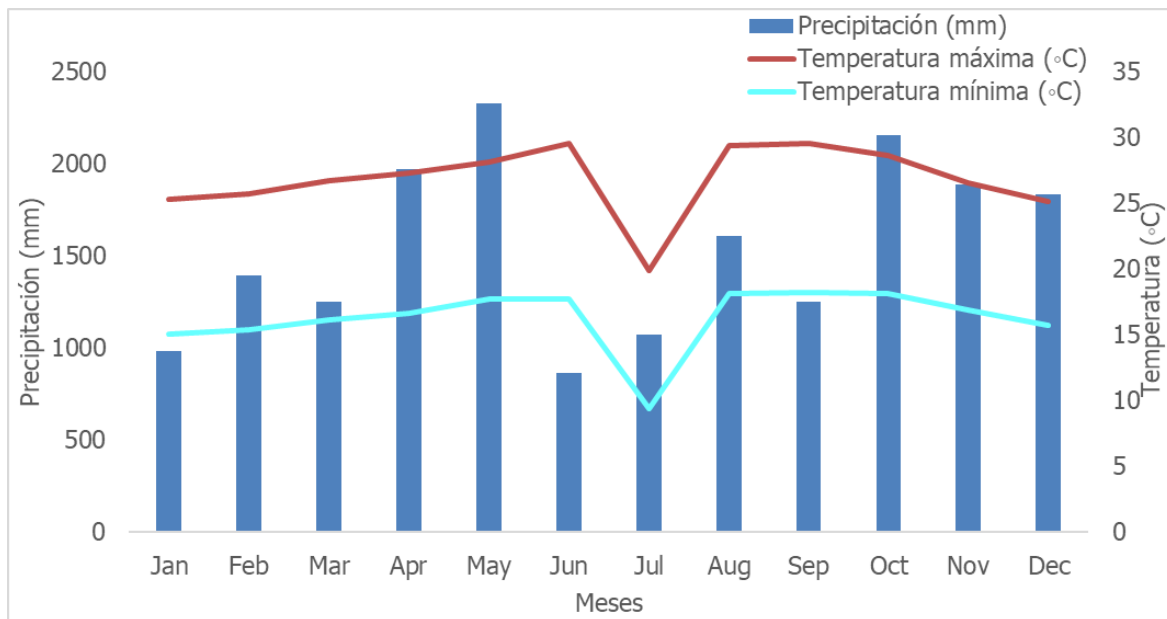


Figura 3. Comportamiento mensual de la precipitación y temperatura en Jarabacoa, La Vega, República Dominicana.

### 2.1.2 Áreas protegidas en el área de estudio

El 22.7 % del área de estudio está conformada por áreas protegidas. Estas áreas protegidas son Armando Bermúdez, Baiguate, Carretera Bayacanes-Jarabacoa, Carretera El Abanico-Constanza, Ébano Verde, José del Carmen Ramírez, Salto de Jimenoa y Valle Nuevo. La distribución de dichas áreas en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte se puede observar en la Figura 4.

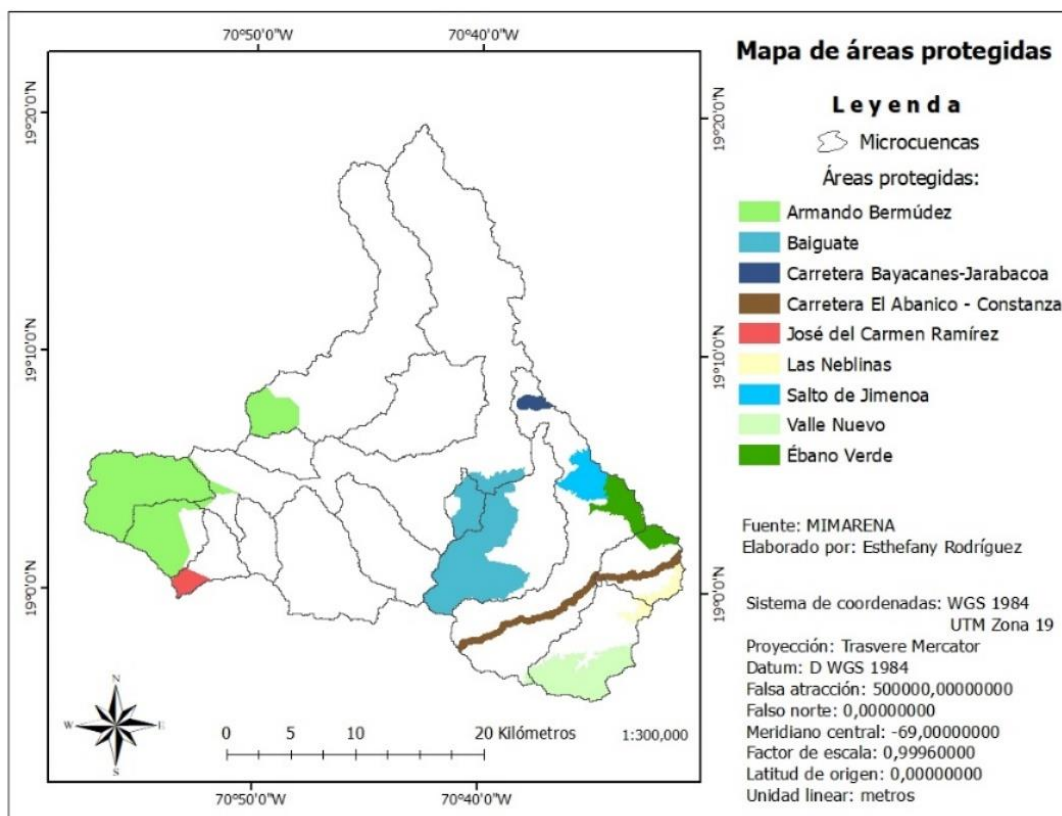


Figura 4. Áreas protegidas en el área de estudio

Las ocho áreas protegidas se dividen en las siguientes categorías: Parque Nacional, Paisaje Protegido, Área de Protección Estricta y Monumento Natural. Las microcuencas de las cuales forman parte cada área protegida se pueden observar en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Categorías de áreas protegidas y microcuencas de las que forman parte dichas áreas

Nombre de área protegida	Categoría	Microcuenca de la que forma parte
Armando Bermúdez	Parque Nacional	Arroyo Los Guanos, Arroyo Los Tablones, Río Guanajuma y Alta del río Yaque del Norte
Baiguatè	Parque Nacional	Río Baiguatè, Arroyo El Cercado y Alta del río Yaque del Norte
Carretera Bayacanes-Jarabacoa	Paisaje Protegido	Jimenoa
Carretera El Abanico – Constanza	Paisaje Protegido	Jimenoa y Las Palmas
Ébano Verde	Área de Protección Estricta	Jimenoa y Las Palmas
José del Carmen Ramírez	Parque Nacional	Arroyo Arraiján
Salto de Jimenoa	Monumento Natural	Jimenoa
Valle Nuevo	Parque Nacional	Río Arenosito y Jimenoa

## 2.2 Línea Base de producción de Agua y Erosión Hídrica

Se estimó la producción de agua y erosión hídrica mensual del periodo de enero de 1982 hasta julio del 2014 en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte. Esto se realizó empleando la extensión QSWAT 1.8, versión más reciente de SWAT para el programa QGIS 2.6.1. La línea base de producción de agua y erosión se realizó con el procedimiento presentado en la Figura 5.

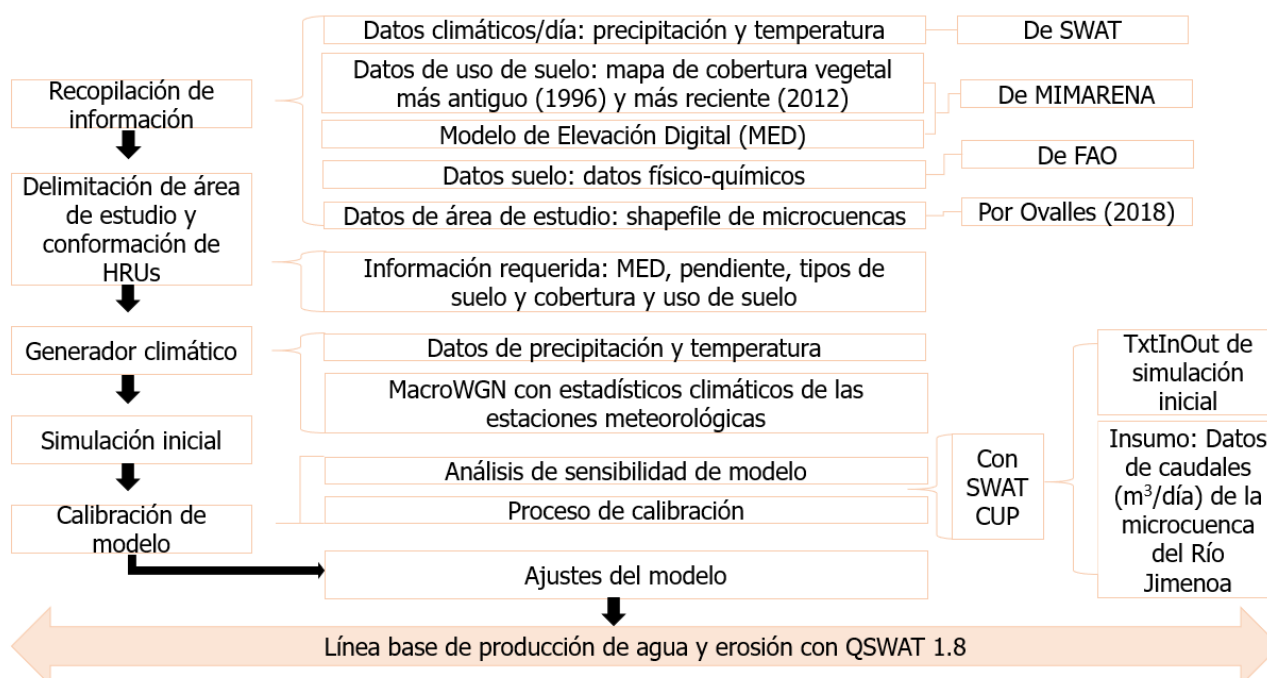


Figura 5. Procedimiento metodológico general

## 2.2.1 Datos de entrada al modelo SWAT

Para la modelación hidrológica fueron necesarios datos climáticos, un MED (mismo empleado para la delimitación del área), datos de uso y cobertura de suelo y datos de tipos de suelo (Figura 6). Los datos fueron facilitados por instituciones nacionales o descargados de plataformas virtuales.

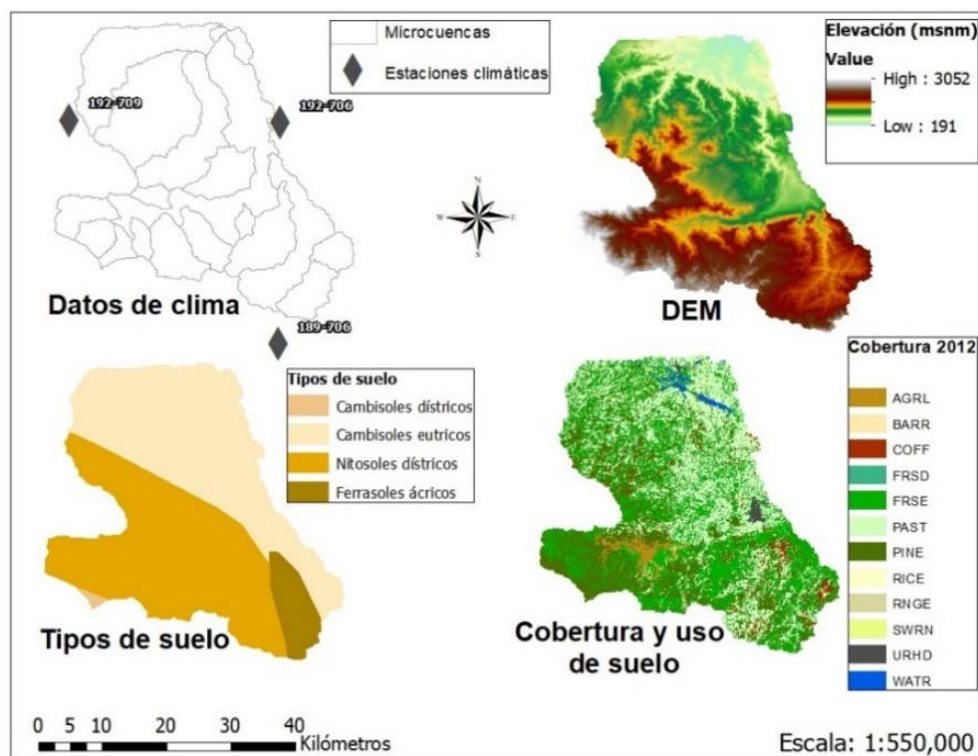


Figura 6. Datos de entrada del modelo SWAT

### 2.2.1.1 Modelo de elevación digital

El MED empleado en este trabajo fue facilitado por el MIMARENA (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales). Dicho modelo de elevación digital cuenta con tamaños de cedas de 30 m. Se agregaron 7 bandas de elevación de 400 m. Además, como se muestra en el Cuadro 7, se realizó una clasificación de pendiente de 5 clases (FAO 2009; Choque 2015).

Cuadro 7. Clases de pendiente, según FAO

Clases	Pendiente (%)	Descripción
1	0-3	Plano
2	3-15	Suavemente ondulado
3	15-30	Moderadamente ondulado
4	30-60	Fuertemente escarpado
5	>60	Escarpado

### 2.2.1.2 Datos de uso y cobertura de suelo

El mapa de uso y cobertura para este trabajo fue facilitado por el MIMARENA. Este mapa corresponde al año 2012. En el Cuadro 8 se muestra la clasificación inicial de usos y coberturas empleados por la institución y los códigos de SWAT asignados a cada uso.



Cuadro 8. Código SWAT asignado a los usos de suelo

Uso de suelo	Código SWAT	Descripción	% del área total
Cultivos intensivos	AGRL	Agricultura genérica	3.08
Escasa vegetación/ área erosionada	BARR	Suelo desnudo	0.01
Café y cacao	COFF	Café	4.68
Bosque seco	FRSD	Bosque caducifolio	0.11
Bosque latifoliado húmedo	FRSE	Bosque siempre verde	38.29
Bosque latifoliado nublado			
Bosque latifoliado semi-húmedo			
Agricultura de subsistencia y pasto	PAST	Pasturas	31.94
Bosque conífero abierto	PINE	Pino	20.14
Bosque conífero denso			
Arroz	RICE	Arroz	0.02
Matorral latifoliado	RNGE	Matorral latifoliado	0.22
Matorral seco	SWRN	Pasto del suroeste de los Estados Unidos	0.17
Áreas pobladas	URHD	Residencial de alta densidad	0.71
Lagos y lagunas	WATR	Agua	0.63

### 2.2.1.3 Datos de suelo

La información de suelo se obtuvo del mapa mundial de suelos creado por FAO en el año 1976 a escala de 1:5.000.000 (FAO y Unesco 1976). Para SWAT es necesaria información adicional la cual fue generada a partir de la información de la FAO empleando los programas SPAW Hydrology 6.02.75 y NumCur. El método de obtención de cada parámetro se puede ver en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Parámetros fisicoquímicos de suelos requeridos por el modelo SWAT

Parámetros	Descripción	Método de obtención
HYDGRP	Grupo hidrológico	Del programa NumCur a partir de los datos de textura.
ANION_EXCL	Fracción de porosidad desde donde los aniones son excluidos	Se utilizó la constante 0.5. Estos valores son opcionales.
SOL_CRK	Fracción del volumen de rompimiento potencial o máximo del perfil del suelo	
SOL_BD	Densidad aparente por horizonte (Mg/m <sup>3</sup> org/cm <sup>3</sup> )	Del programa SPAW Hydrology con datos de textura y porcentaje de materia orgánica
SOL_AWC	Capacidad de disponibilidad del agua del horizonte de suelo (mm H <sub>2</sub> O/mm de suelo)	
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada (mm/hr)	

TEXTURE	Textura del suelo	
SOL_CBN	Contenido de carbono orgánico (% del peso del suelo)	Se obtuvo a partir de la materia orgánica. SOL_CBN=Mo/1.724
SOL_ALB	Albedo del suelo húmedo	Albedo = 0,069 * color v - 0,0114
USLE_K	Factor USLE de erodabilidad del suelo (Carvajal 2017)	USLE_K= $\frac{0,00021 * M0.14 * (12-OM) + 3,25 * (C_{soilstr} - 2) + 2,5 * (C_{perm} - 3)}{100}$ Donde: USLE_K= factor de erodabilidad del suelo M= parámetro del tamaño de las partículas OM= porcentaje de materia orgánica C <sub>soilstr</sub> = código de la estructura de suelo en la clasificación del suelo C <sub>perm</sub> = perfil de las clases de permeabilidad
SNAM	Nombre del tipo de suelo	De la base de datos de la FAO
NLAYER	Cantidad de horizontes de suelo	
SOL_ZMX	Máxima profundidad del perfil del suelo con presencia de raíces (mm)	
SOL_Z	Profundidad desde la superficie del suelo hasta el fondo del horizonte (mm)	
CLAY	Contenido de arcilla (% del peso del suelo)	
SILT	Contenido de limo (% del peso del suelo)	
SAND	Contenido de arena (% del peso del suelo)	
SOL_CAL	Contenido de carbonato de calcio por horizonte de suelo	
SOL_PH	PH por horizonte de suelo	

#### 2.2.1.4 Datos climáticos

Los datos de precipitación y temperatura de orden diario fueron obtenidos de estaciones climáticas virtuales disponibles para SWAT<sup>8</sup> debido a que los datos facilitados por la Oficina Nacional de Meteorología (ONAMET) no coincidieron con los datos de uso y cobertura de suelo. Fueron seleccionadas tres estaciones climáticas (Cuadro 10).

Cuadro 10. Ubicación de las estaciones climáticas

Estación	Ubicación	Altitud
189-706	Lat.: 18.890; Long.: -70.625	1172 msnm
192-706	Lat.: 19.202; Long.: -70.625	409 msnm
192-709	Lat.: 19.202; Long.: -70.938	811 msnm

<sup>8</sup> <https://globalweather.tamu.edu/>

SWAT trabaja con estadísticos de los registros de las variables climáticas. Los parámetros (Cuadro 11) empleados en esta modelación son los elaborados por el Sistema de Pronóstico Climático (CFSR por sus siglas en inglés). Se adaptó la base de datos en formato Acces de ArcSWAT a QSWAT.

Cuadro 11. Parámetros climáticos requeridos por el modelo SWAT

Parámetros	Descripción
TMPMX	Promedio/mes de la temperatura máxima/día ( $^{\circ}\text{C}$ )
TMPMN	Promedio/mes de la temperatura mínima/día ( $^{\circ}\text{C}$ )
TMPSTDMX	Desviación estándar/mes de la temperatura máxima/ día ( $^{\circ}\text{C}$ )
TMPSTDMN	Desviación estándar/mes de la temperatura mínima/día ( $^{\circ}\text{C}$ )
PCPMM	Promedio/mes de la precipitación/día (mm $\text{H}_2\text{O}$ /día)
PCPSTD	Desviación estándar/mes de la precipitación/día (mm $\text{H}_2\text{O}$ /día)
PCPSKW	Coeficiente de asimetría/mes de la precipitación/día
PR_W1	Probabilidad/mes de ocurrencia de 1 día húmedo luego de 1 día seco
PR_W2	Probabilidad de ocurrencia de 1 día húmedo luego de 1 día húmedo
PCPD	Promedio/mes del número de días de lluvia
RAINHHMX	Máxima lluvia de media hora/mes (mm $\text{H}_2\text{O}$ )
SOLARAV	Promedio/mes de la radiación solar/día ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$ )
DEWPPT	Promedio/mes de la temperatura del punto de rocío ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$ )
WDAV	Promedio/mes de la velocidad del viento (m/s)

Fuente: Orbando *et al.* 2013

## 2.2.2 Delimitación de microcuencas

La delimitación de las microcuencas fue realizada con QSWAT 1.8, y para esto se usó un Modelo de Elevación Digital (MED) que ocupaba un área superior al área de estudio. Esto fue necesario para colocar el punto de salida donde se une el río Guanajuma con el río Yaque del Norte y de esta manera cubrir todas las microcuencas de la sección alta de la cuenca. El umbral de escurrimiento fue de  $10 \text{ km}^2$ , área mínima aproximada de las microcuencas. Las microcuencas fueron delimitadas a partir de un mapa base (Ovalles 2018). Posteriormente se verificó que las capas de entrada del modelo coincidieran con la delimitación para la modelación y las salidas de reporte con base en la nueva delimitación del área de estudio (Figura 7).

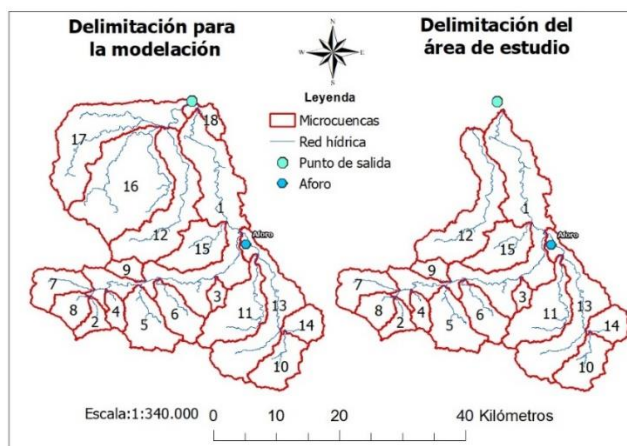


Figura 7. Delimitación para la modelación y delimitación del área de estudio con QSWAT 1.8.

### 2.2.3 Ajustes para la modelación

Se modificó el método de evapotranspiración potencial. Se sustituyó el método de Penman-Monteith por el de Hargreaves, debido a que sólo se contaba con datos de precipitación y temperatura (Hargreaves y Samani 1985; Santiago *et al.* 2012; Maffei 2012). Además, se modificó el almacenamiento inicial de agua en el suelo (FFCB). Este valor va de 0 a 1; mientras más cercano a 0 más seco es el suelo. En este caso se empleó un FFCB igual 0.5.

Además, como sugieren algunos autores, luego de hacer una primera simulación y obtener importantes diferencias entre caudales observados y simulados, se ajustaron los parámetros siguientes: el valor "n" de la dotación para los canales tributarios requeridos (CH\_N1=10), coeficiente de Manning del canal (CH\_N2=0.075), el valor "n" de la dotación para el flujo total (OV-N=0.3), y el factor de compensación de la evaporación de suelo (ESCO=1) (Neitch *et al.* 2002; Bracmort *et al.* 2006; Szcesniak y Piniewski 2015). Por último, a pesar de que los datos ingresados fueron de carácter diario, las salidas se obtuvieron en el nivel mensual debido a la poca capacidad del equipo empleado para la modelación.

### 2.2.4 Proceso de calibración del modelo

El proceso de calibración consiste en un ajuste de parámetros iniciales del modelo optimizando los criterios de desempeño (Roche *et al.* 2012). El período de calibración fue del año 1982 a 1995. La fecha inicial se basó en la salida de SWAT y la final corresponde al último año con datos disponibles de caudal. Los datos mensuales de caudal observado fueron facilitados por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI) y corresponden a la estación Hato Viejo (502 msnm). Esta estación se encuentra ubicada en la Latitud Norte 19° 8'1.00" y Longitud Oeste 70°37'60.00"O, dentro de la microcuenca del Río Jimenoa.

La calibración se realizó empleando el programa SWAT Cup 2019, ya que este programa facilita el proceso de manera automatizada (Arnold *et al.* 2012). Se realizó una parametrización, análisis de sensibilidad y calibración del modelo mediante la técnica de ajuste de incertidumbre secuencial SUFI-2. Los criterios estadísticos seleccionados para evaluar la eficiencia del modelo fueron los utilizados por Carvajal (2017): factores p y r, el coeficiente de eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE), el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), el porcentaje de sesgo (PBIAS) y el coeficiente de Kling-Gupta (KGE).

Inicialmente se realizaron más de 10 iteraciones con más de 8.000 simulaciones en grupos de 100, 200, 500 y 1.000. En estos primeros intentos fueron usados alrededor de 25 parámetros, seleccionados a partir de la revisión de información secundaria (Torres-Benites *et al.* 2004; Tag *et al.* 2011; Méndez-Morales 2012; Choque 2015; Fernández 2016; Carvajal 2017; Sánchez *et al.* 2017; Valverde 2018). Finalmente, se calibró el modelo con 10 parámetros propuestos por Abbaspour (2013) (Cuadro 13). Con estos últimos parámetros se realizó un total de 3 iteraciones de 500 simulaciones cada una.

### 2.2.5 Comparación de medias de datos de caudal antes y después de la calibración

Posterior al proceso de calibración, se procedió a la realización de una prueba T apareada, empleando el software InfoStat (Molinero 2003; García *et al.* 2016). En dicha prueba se

compararon las diferencias de las medias de los datos de caudal obtenidos antes y después de la calibración respecto de los datos observados.

### 2.2.6 Línea base de producción de agua y erosión

Una vez calibrado el modelo se incorporaron los valores ajustados de los parámetros seleccionados. De la simulación se escogieron las variables siguientes: precipitación (PRECIP mm), evapotranspiración (ET (mm), flujo lateral, (LAT\_Q mm), percolación (PERC mm), agua subterránea (GW\_Q mm), escorrentía superficial (SURQ mm) y producción de agua (WYLD mm). Esta última variable se compone por la sumatoria de LAT\_Q, GW\_Q y SURQ.

De igual forma fue seleccionado el parámetro de pérdida de suelo por erosión hídrica (SYLD tn/ha). Los modelos de erosión se fundamentan en el fenómeno erosivo para determinar la producción de sedimentos (Morgan y Quinton 2001). La categorización de la erosión se realizó según los criterios de FAO (1980): menor de 10 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> baja, de 10 a 50 moderada, entre 50 y 200 severa y mayos de 200 muy severa.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Nueva delimitación de Área de Estudio

Al realizar la delimitación de la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte con QSWAT 1.8 varió respecto de la delimitación realizada por Ovalles (2018). Con la delimitación anterior el área total (Área 1) de la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte era de 898,3 km<sup>2</sup>, sin embargo, con la utilización de QSWAT el área (Área 2) aumentó un 1,12% (Cuadro 12).

Cuadro 12. Cambio en por ciento de la delimitación de las microcuencas

No.	Nombre de la microcuenca	Área 1 (km <sup>2</sup> )	Área 2 (km <sup>2</sup> )	Cambio (%)
1	Alta del río Yaque del Norte	202,39	227,01	12,16
2	Arroyo Arraiján	18,73	17,78	-5,08
3	Arroyo El Cercado	10,37	10,42	0,49
4	Arroyo Frío	15,74	15,78	0,27
5	Arroyo Grande	63,57	58,51	-7,95
6	Arroyo Los Dajaos	42,88	42,42	-1,09
7	Arroyo Los Guanos	42,39	41,51	-2,07
8	Arroyo Los Tablones	26,61	26,45	-0,62
9	Arroyo Sigua	16,17	15,80	-2,29
10	Río Arenosito	49,35	47,08	-4,6
11	Río Baiguata	79,96	79,21	-0,93
12	Río Guanajuma	12,48	124,07	-1,12
13	Río Jimenoa	117,11	117,65	0,46
14	Río Las Palmas	29,05	28,31	-2,56
15	Río Yujo	58,5	56,4	-3,6
<b>Total</b>		898,31	908,41	1,12

De las 15 microcuencas del sitio de estudio, en 4 aumentó el área y en el resto disminuyó. La microcuenca cuyo aumento de terreno fue inferior es la Alta del río Yaque del Norte (12,16%), donde desembocan las demás microcuencas excepto la del Río Guanajuma. Este aumento ocurrió

principalmente en la parte baja. Por otro lado, donde ocurrió mayor cambio negativo fue en Arroyo Arraiján, ubicada en el límite superior. De todas las microcuencas, el área cuya variación fue menor es Arroyo Frío (0,27%).

### 3.2 Simulación inicial

En la simulación inicial con QSWAT se subdividió la sección alta del Yaque del Norte en 18 microcuencas, de las cuales 15 conforman el área de estudio. En un área inferior en un 39% respecto de la zona en estudio se conformaron 919 HRUs. En el área de la modelación la precipitación media del periodo de simulación fue de 3.196,1 mm, la evapotranspiración fue de 1.051 mm y la escorrentía superficial de 104,75 mm (Figura 8).

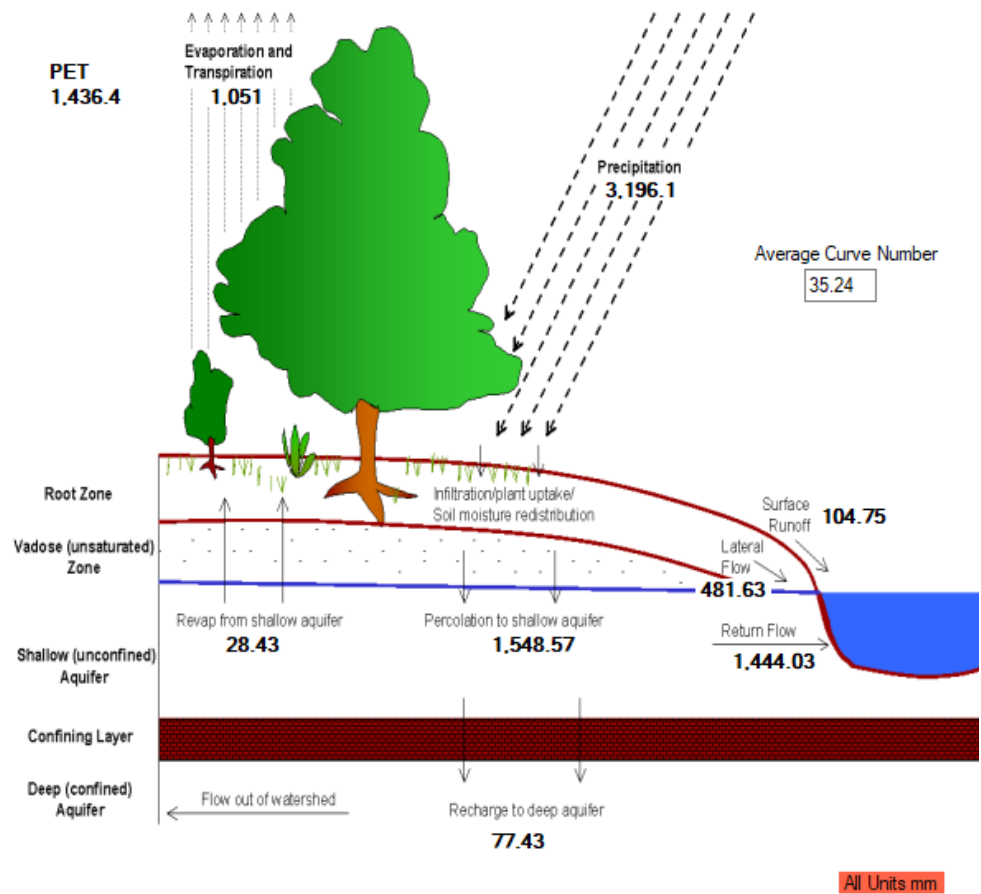


Figura 8. Componentes del balance hídrico del área de estudio según la simulación inicial con QSWAT

Los resultados de precipitación y evapotranspiración se mantienen dentro de los rangos establecidos en el nivel local. La precipitación máxima de la zona puede llegar a ser 4,000 mm (BirdLife International 2019) y como se mencionó anteriormente, el resultado fue inferior. Por otra parte, la evapotranspiración puede llegar a superar el 60% de la precipitación en algunos puntos de la cuenca del río Yaque del Norte (MIMARENA 2016) y los resultados obtenidos en la simulación antes del proceso de calibración corresponde al 33% de la precipitación.

En la Figura 9 se muestra el caudal simulado en contraste con el observado en la microcuenca del río Jimenoa. Los caudales observados han sido sobreestimados en más de un 220%. Esto probablemente es debido a que la cuenca del río Yaque del Norte es muy intervenida a una posible inexactitud en los datos hidrometeorológico, como lo plantean Sánchez *et al.* 2017.

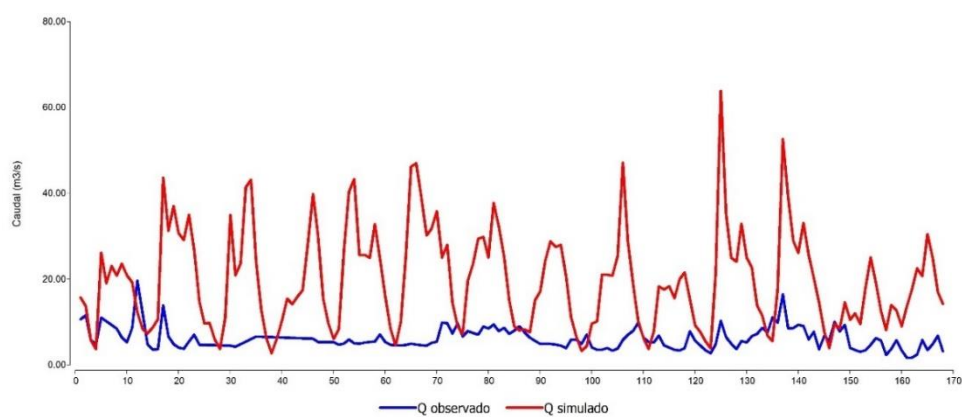


Figura 9. Caudal simulado vs. observado en la microcuenca del río Jimenoa

### 3.3 Calibración del Modelo

La calibración se realizó con datos de caudal de la microcuenca antes mencionada. Se usaron los datos mensuales de la estación Hato Viejo. Según dichos datos el caudal promedio en este punto es de  $6,15 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $0,69 \text{ m}^3/\text{s}$  menos que los presentados por el INDRHI (2017) y  $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$  menos que los reportados por Febrillet *et al.* (2014). La calibración de los sedimentos resultó imposible debido a la falta de observaciones de este tipo.

De un total de 25 parámetros seleccionados de manera inicial, se utilizaron 10. Dichos parámetros coinciden con los propuestos por Abbaspour (2013). Este último grupo de parámetros (Cuadro 13) mostró un p-valor inferior al 0.3, lo cual indica que existe una alta probabilidad de que la modificación de estos parámetros altere el caudal (Khalid *et al.* 2016). A continuación, se muestra el valor ajustado, rangos máximos y mínimos y una breve descripción de cada parámetro utilizado en la calibración.

Cuadro 13. Parámetros utilizados para la calibración del caudal en el modelo SWAT

Nombre	Descripción	Valor ajustado	Mínimo	Máximo
1:V_SOL_K(...).sol	Conductividad hidráulica saturada	876.870544	369,220825	1.108,15783
2:V_ESCO.hru	Factor de compensación de la evaporación de suelo	0.338541	0,158881	0,476863
3:R_CN2.mgt	Número de curva de escorrentía para condiciones de humedad II	0,72936	-0,171898	0,043308
4:V_ALPHA_BF.gw	Factor alfa de flujo base	0,000253	0,000000	0,252622
5:V_SLSUBBSN.hru	Pendiente media	117,687607	55,193077	145,633789
6:SOL_AWC(..).sol	Capacidad de agua disponible en la capa de suelo	0,103932	0,000000	0,544146
7:V_GW_DELAY.gw	Tiempo de demora de agua subterránea	35,193703	0,000000	159,247513
8:V_CH_K2.rte	Conductividad hidráulica efectiva en el canal principal	59,650703	14,114307	242,940414
9:V_EPCO.hru	Factor de compensación	0,069902	0,000000	0,319186

	de la absorción de la planta			
10:V_OV_N.hru	Valor "n" de la dotación para el flujo total	19,207422	13,992051	25,818289

Posterior a la realización de más de 8.000 simulaciones en SWAT-CUP, ajustando cada vez los rangos de los parámetros sin exceder los límites de los valores absolutos de la salida de SWAT, se obtuvieron los estadísticos de la modelación. El resultado de cada estadístico<sup>9</sup> se presenta en el Cuadro 14, además, se adicionan una breve descripción y los valores óptimos de cada uno (Cabrera 2012; Hernán *et al.* 2015; Abbaspour *et al.* 2017).

Cuadro 14. Estadísticos de ajuste para el punto de aforo de la microcuenca del Río Jimenoa, Jarabacoa, La Vega, República Dominicana

<b>Estadístico</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor óptimo</b>	<b>Resultado</b>
p-factor	Porcentaje de observaciones dentro de los límites de incertidumbres dados.	1	0.29
r-factor	Medida de grosor de la banda del 95ppu.	0	4.28
R <sup>2</sup>	Medida de bondad de ajuste del modelo.	1	0.03
Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)	Medida de variabilidad de observaciones explicada por las simulaciones.	1	-8.49
Porcentaje de sesgo (PBIAS)	Medida de tendencia promedio de que los datos simulados sean mayores o menores a los observados	0	-71.0
Eficiencia de Kling-Gupta (KGE)	Coefficiente de regresión lineal entre variable observada y medida.	1	-0.91

Los factores p y r indican el grado en el que se alejan los valores simulados de los observados (Tang *et al.* 2011; Vervoort 2017). El mejor resultado de esta calibración determinó un factor p de 0,29 y el r de 4,28, lo que indica un bajo por ciento de las observaciones dentro de los límites de incertidumbre del modelo. Por la razón anterior, el ajuste del modelo es bajo (R<sup>2</sup>=0,03).

Por otro lado, el coeficiente NSE varía de  $-\infty$  hasta 1 y mientras más alejado de 1 es menos predictor. Este coeficiente varió de -78,2 hasta -8,49 durante el proceso de calibración, manteniéndose como insuficiente (Moriasi *et al.* 2007; Molnar 2011).

El resultado negativo de PBIAS (-71) y de KGE (-0,91) evidencia que existe una sobreestimación de caudal (Gupta *et al.* 2009), tal como se observa en la Figura 9. En simulaciones con resultados similares explican que la gran diferencia entre los valores observados y simulados puede ser debido a la falta de calidad de los datos de entrada (Orbando *et al.* 2013; Behrends *et al.* 2011). Para esta modelación han sido utilizadas estaciones climáticas virtuales y datos globales de suelo, lo cual hace que los resultados sean menos precisos.

<sup>9</sup> <https://www.hydrotest.org.uk/HTMain.html>



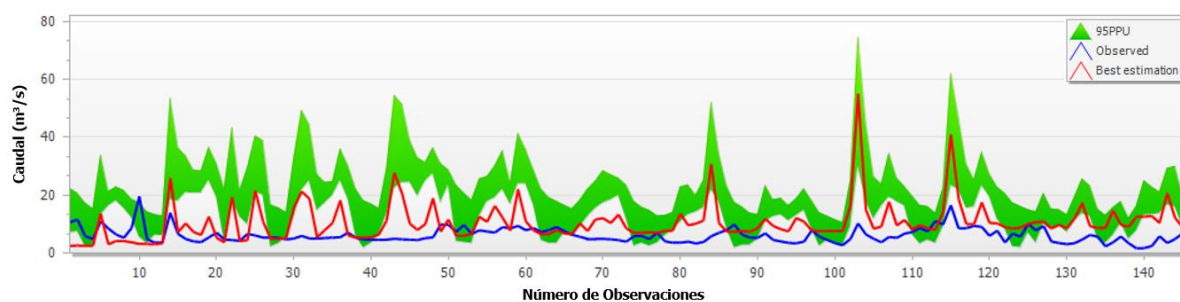


Figura 10. Caudal observado, simulado y banda de predicción PPU95% para la microcuenca del río Jimenoa, cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana.

### 3.4 Implicaciones del proceso de calibración del Modelo

Un ajuste del modelo depende de los datos de entrada y en cuencas muy intervenidas los procesos naturales son secundarios al realizar simulaciones (García 2006; Velez 2008; Quezada 2010; Vargas 2010; Vargas 2011). Una variable importante que interviene en los procesos de generación de caudales son los usos del agua, ya que esto supone que haya una disminución del total de agua producida previo a la llegada al cauce principal (Cabrera 2012). Este elemento no ha sido considerado para esta modelación, por lo que existe una omisión de procesos relevantes (Mook 2002).

La cuenca del río Yaque del Norte es una de las más intervenidas de la República Dominicana. En esta zona se encuentran importantes sistemas de presas para producción energética y suministro de agua para consumo humano, uso agrícola, ganadero, industrial, entre otros (Fondo Agua 2015). Una de estas presas es la del río Jimenoa (ARQHYS 2012; INDRHI 2017), la cual está dentro de la microcuenca empleada para la calibración, pero que por falta de registros y de disponibilidad de información no ha sido incorporada al modelo. Esta es probablemente otra de las razones por las cuales el agua producida en la zona no es reflejada en el punto de aforo (Castro 2005; García 2008).

Un caso en el cual la calibración del modelo pasó de insuficiente a aceptable luego de considerar las tomas de agua para uso agrícola y consumo humano fue un estudio realizado por Ríos *et al.* (2014). El proceso de calibración en dicha investigación duró varios meses y mejoró después de incorporados elementos adicionales.

En la modelación de la sección alta de la cuenca del río Yaque tampoco se consideró la extracción de agua para riego o uso ganadero, información de gran relevancia de acuerdo con Abbaspour *et al.* (2007). Luego de la revisión de información secundaria y observaciones simples en campo se identificó un alto uso de agua para los fines antes expuestos, lo cual evidencia que, del total de agua producida en la zona, gran parte es extraída y por lo tanto no registrada en el punto de aforo empleado para esta calibración. Debido al bajo caudal de la microcuenca del Río Jimenoa (6.15 m<sup>3</sup>/s), cualquier extracción es importante. El caudal simulado del río Jimenoa es 2.3 veces más que el observado (14 m<sup>3</sup>/s).

En varios estudios empleando el modelo SWAT se sobreestiman los caudales (Grassman *et al.* 2007; Tufford *et al.* 2013). Uno de estos casos es el de Ulloa (2014). Ulloa utilizó una subcuenca relativamente grande para el proceso de calibración con un caudal promedio igual a 16.73 m<sup>3</sup>/s, casi tres veces más que el caudal de la microcuenca usada en la calibración de esta investigación.

En este análisis no se consideraron extracciones de agua; sin embargo, por ser un área de estudio grande las extracciones de agua debido a la intervención existente en la zona no resultaron importantes y se logró un ajuste bueno de caudales modelados en función de los medidos.

Por otro lado, en una simulación realizada en la cuenca del río Yaque del Norte con la utilización del modelo WEAP<sup>10</sup> los caudales simulados fueron mayores que los observados en la sección alta de la cuenca (Febrillet *et al.* 2014). En este estudio se emplearon datos de 6 estaciones hidrométricas (incluyendo la Hato Viejo) y se consideraron los caudales luego de embalses, el nivel de agua almacenado en el embalse y caudales en puntos de descarga de agua a canales de regadío. La diferencia entre los caudales simulados vs. los observados luego de incorporados dichos datos fue de apenas 0.12 m<sup>3</sup>/s, lo cual indica un buen ajuste del modelo.

Debido a lo anterior y a la buena capacidad predictiva del modelo hidrológico SWAT expuesta en diversas investigaciones (Torres-Benites *et al.* 2004; Fuentes 2015; Sánchez *et al.* 2017; Montecelos 2018), se consideran aceptables los datos resultantes del proceso de calibración. Esto implica que probablemente más del 50% del agua producida en el área es extraída antes de pasar a las secciones media y baja de la cuenca del río Yaque del Norte, área donde han ocurrido diversos conflictos dejando incluso víctimas mortales debido a la escasez del recurso hídrico (Ponce 2018; Santana 2018; Caraballo 2019; Molina 2019a; Molina 2019b).

### 3.5 Comparación de las medias de datos de caudal

Al culminar el proceso de calibración y obtener la línea base de producción de agua se realizó una Prueba T a los datos de caudal, la cual permite probar hipótesis de igualdad de medias (Balzarini *et al.* 2008). Los resultados de la comparación se pueden observar en la Figura 11. La sobrestimación del caudal luego del proceso de calibración (simulación 2) es menor que antes del calibrado (simulación 1).

La diferencia de las medias del caudal simulado 2 es inferior al 1, respecto del caudal observado. En la simulación 1 se sobreestiman alrededor de 9,06 m<sup>3</sup>/s más que en la simulación 2. Por otro lado, existe diferencia significativa de los caudales simulados en contraste con los observados ( $p < 0.0001$ ); sin embargo, no existe tal diferencia entre las simulaciones ( $p > 0.9999$ ).

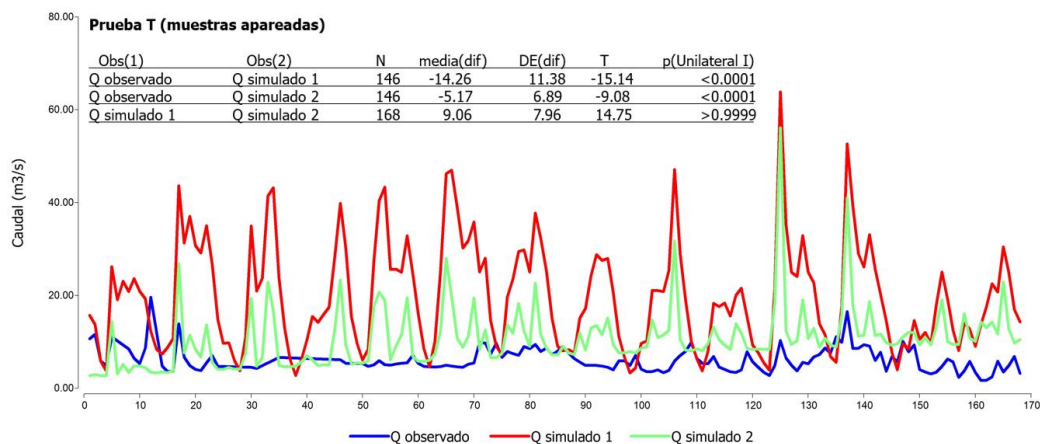


Figura 11. Comparación de medias de los datos de caudal de la microcuenca del río Jimenoa antes y después de calibrado el modelo respecto del caudal observado.

<sup>10</sup> Water Evaluation and Planning

### 3.6 Precipitación y caudales por microcuenca

Posterior al proceso de calibración se procedió a realizar la simulación con QSWAT y se obtuvieron diferentes variables, entre las cuales se encuentran la precipitación y los caudales mensuales. En la Figura 12 se presentan los promedios mensuales de precipitaciones y caudales por cada una de las microcuencas, que a su vez se dividen en orden.

La microcuenca de orden 1 es la del cauce principal del Yaque del Norte y las de orden 2 son las que ingresan al cauce principal. Un caso excepcional es el de la microcuenca del río Guanajuma. A pesar de que esta microcuenca es de orden 2 y está dentro del área de estudio no ingresa al río Yaque en su sección alta, sino que ingresa aguas abajo luego de la presa de Taveras. Por su parte, la microcuenca del río Baiguatue y del río Las Palmas, ambas de orden 3, alimentan al río Jimenoa que es de orden 2. A su vez el río Las Palmas cuenta con el ingreso del río Arenosito en la sección baja.

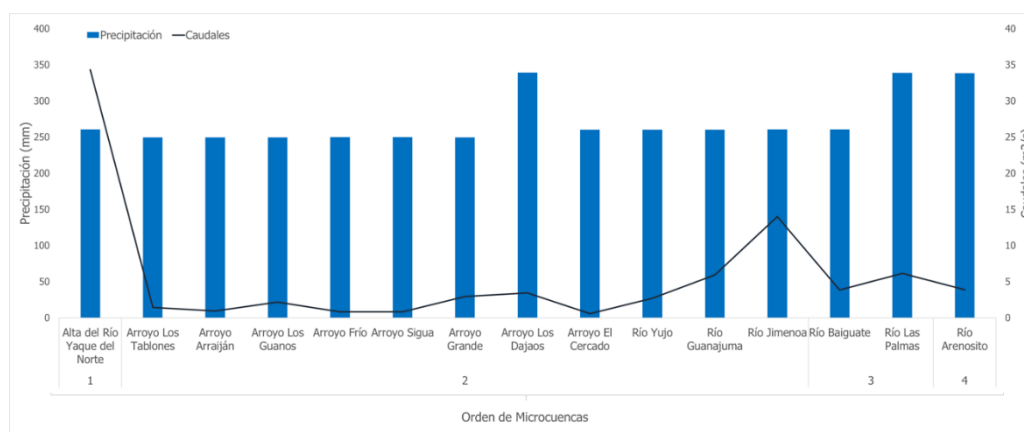


Figura 12. Precipitación y caudales de las microcuencas de la sección alta del río Yaque del Norte, República Dominicana.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la precipitación media mensual en el área de estudio es de 272 mm. Es notorio que el caudal aumenta conforme aumenta el número de tributarios y no según acrecienta la precipitación. La microcuenca Alta del río Yaque del Norte es la de mayor caudal, con un promedio mensual de 34 m<sup>3</sup>/s.

El segundo pico de caudal se observa en la microcuenca con río Jimenoa, con un promedio mensual de 14 m<sup>3</sup>/s. La microcuenca del Arroyo el Cercado es la más pequeña de todas (10 km<sup>2</sup>) y es la que tiene menor caudal (0.5 m<sup>3</sup>/s). Estos caudales son considerados la producción total de agua, sin tomar en cuenta las extracciones clandestinas, sistemas de riego, pozos tubulares ni los diferentes embalses que se encuentran en el área.

### 3.7 Descarga de sedimentos y caudales por microcuenca

El mayor promedio mensual de descarga de sedimentos a la salida del cauce por unidad de superficie ocurre en la microcuenca del río Guanajuma, la cual desemboca al río Yaque más abajo del área de estudio. Esto explica que en esta área la descarga de sedimentos sea alrededor de 1.3 veces más que en la principal. Esta importante descarga de sedimentos de la microcuenca del río

Guanajuma se ha evidenciado en estudios anteriores poniendo en riesgo la vida útil del embalse Bejucal e incluso afectando la presa Tavera (Cuello 2003).

Las microcuencas Alta del río Yaque del Norte, Río Arenosito, Río Yujo, Río Baiguate y la del río Jimenoa también presentan importantes cantidades de descarga de sedimentos. Lo contrario ocurre en las microcuencas Arroyo Frío, Arroyo El Cercado y Arroyo Sigua, donde la cantidad de sedimentos es menor (Figura 13).

Lo anterior evidencia que la descarga de sedimentos no depende de los caudales ni del número de tributarios de las microcuencas. Esto debido a que no en todas las microcuencas donde los caudales son mayores existe más cantidad de sedimentos y no en todas las que tienen más microcuencas secundarias aumenta el promedio mensual de la descarga de sedimentos.



Figura 13. Carga de sedimentos (SED OUT) y caudal medio a la salida de cada microcuenca de la sección Alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana.

### 3.8 Producción de agua y sus componentes por microcuenca

La estimación realizada por SWAT sobre la producción de agua simula el ciclo hidrológico basándose en la ecuación de balance hídrico (Netsch *et al.* 2011). Esta se halla compuesta principalmente por la sumatoria del flujo lateral, flujo de retorno y escorrentía superficial. El flujo lateral fluye subsuperficialmente hasta alimentar canales de drenaje, quebradas y ríos (Méndez-Morales 2016), el flujo de retorno es el agua subterránea originada en el manto freático (Uribe 2010; Rodríguez 2016) y la escorrentía superficial es aquella que fluye sobre las laderas hasta llegar al cauce (Ordoñez 2011).

Como se observa en la Figura 14, las microcuencas cuya producción de agua es superior son la del Río Arenosito, Arroyo Los Dajaos y Río Las Palmas, con 2,831, 2,811 y 2,790 mm en promedio anual. Caso contrario ocurre en las microcuencas arroyo Sigua, arroyo Frío y río Yujo, donde la producción de agua es 1,759, 1,762 y 1,764 mm. En la misma figura se puede apreciar que el flujo lateral es el mayor, seguido por el flujo lateral y el menor valor es la escorrentía superficial.

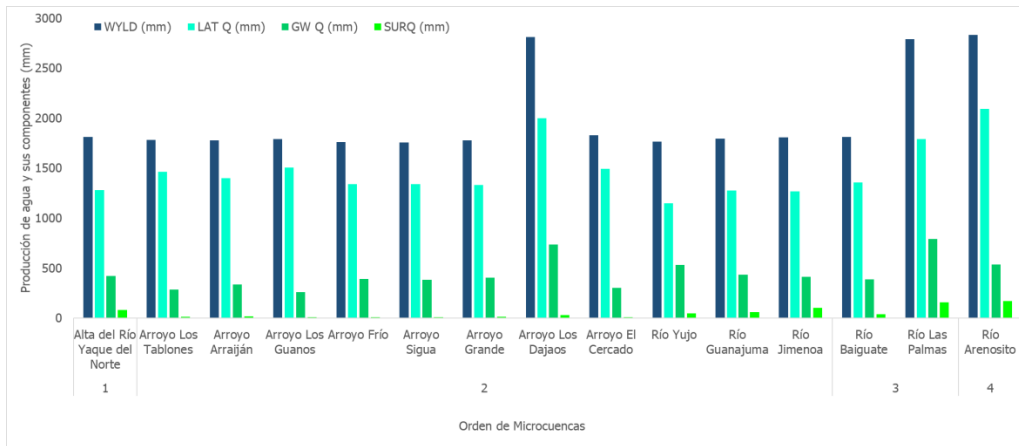


Figura 14. Producción de agua (WYLD) y sus componentes (flujo lateral-LAT Q, flujo de retorno-GW Q y escorrentía superficial-SURQ) en las microcuencas de la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana.

### 3.8.1 Línea base de producción de agua

La producción de agua en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte se obtuvo a partir de los promedios anuales de cada microcuenca. En la sección se producen 1,993 mm de agua, un 61% del promedio anual de las precipitaciones de las microcuencas. Esta producción de agua se divide de la siguiente manera: el flujo lateral (1,473 mm) y el flujo de retorno (442 mm) y escorrentía superficial (52 mm). El flujo de retorno y el flujo lateral tienen un comportamiento similar en todas las microcuencas. Sin embargo, la escorrentía superficial es mayor al este del área de estudio (río Arenosito (no. 10), arroyo Los Dajaos (no. 6) y río Las Palmas (no. 14)) (Figura 15).

La escorrentía superficial promedio en la microcuenca del Alta del río Yaque del Norte obtenida en esta simulación (84 mm), es alrededor de 15 veces menos que la obtenida en una modelación previa con SWAT (Cuello 2003). En esta investigación se utilizó un mapa de uso de suelo del año 2002 que contaba con 6 tipos de uso y cobertura, la mitad de los definidos en la presente modelación, lo cual pudo influir de manera relevante en el resultado de escorrentía (Abbaspour *et al.* 2004).

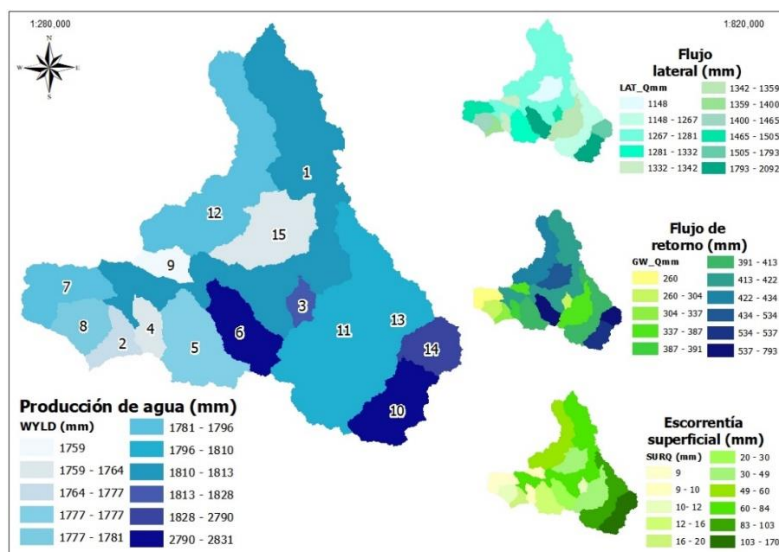


Figura 15. Producción de agua y sus componentes en el área de estudio

SWAT es una herramienta muy utilizada debido a su gran potencial predictivo y la facilitación del proceso de análisis espacial territorial de variables físicas relevantes que aportan información a los tomadores de decisiones (Arroyo *et al.* 2010; FAN 2016). Sin embargo, es evidente que como modelo tiene limitantes y una de ellas es la cantidad de información requerida para obtener simulaciones con menor incertidumbre (Rivera-Toral 2012; Harvrylenko 2014; Iroumé 2014).

En varios estudios SWAT sobreestima la producción de agua (Silva 2009; Torres-Benites 2012; Sánchez *et al.* 2017), lo que es probable que ocurra en este trabajo por causa de la sobreestimación de caudales de la microcuenca del río Jimenoa. La sobreestimación es positiva cuando el objetivo del trabajo se orienta hacia el control de inundaciones o de erosión por aumento de escorrentía superficial, pero desfavorece cuando el enfoque está más vinculado con la escasez del recurso hídrico (WB 2012; Zuleta 2013; Ulloa 2014; BID 2017).

Considerando lo anterior y que el área de estudio está en la sección alta de la cuenca y por tanto no se han encontrado registros de problemas por inundaciones, los resultados de producción de agua serán más valiosos interpretando el componente de escorrentía superficial. Según los resultados, es necesario implementar y/o fortalecer iniciativas de prevención y control de erosión hídrica en las microcuencas río Arenosito y río Las Palmas.

### **3.9 Escorrentía superficial y erosión por microcuencas**

La escorrentía ocurre cuando la intensidad de las lluvias es mayor que la tasa de infiltración, y depende de la intensidad de las lluvias, tipo de suelo y estado en el que se encuentre; de la cobertura vegetal y de la pendiente (Chow 1994; Scherrer y Naef 2003). La escorrentía superficial es la principal causante de la erosión hídrica (FAO 1992; Cervantes 1999; Buscuñán 2010). Cuanto más negativas prácticas y más desprotección tenga el suelo el área será más sensible a erosión (Cartes *et al.* 2009).

En la Figura 16 se evidencia que la erosión está directamente relacionada con el escurrimiento superficial. La microcuenca en donde existe mayor escorrentía superficial (170 mm) y erosión ( $68 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  es en Río Arenosito) y donde existe menos afectación por escorrentía superficial y erosión en arroyo Frío. Una razón por la cual pudiera estar pasando esto es que mientras Arroyo Frío tiene el 97% de su territorio cubierto de bosque, Río Arenosito tiene 44%. En la Microcuenca del Río Las Palmas existe alta escorrentía superficial (sólo 8% menos que en Arenosito), sin embargo, la erosión no tiene un pico tan alto. Esto probablemente se debe a que parte del territorio de esta microcuenca se encuentra en la Reserva Científica Ébano Verde y el manejo de los suelos es distinto.

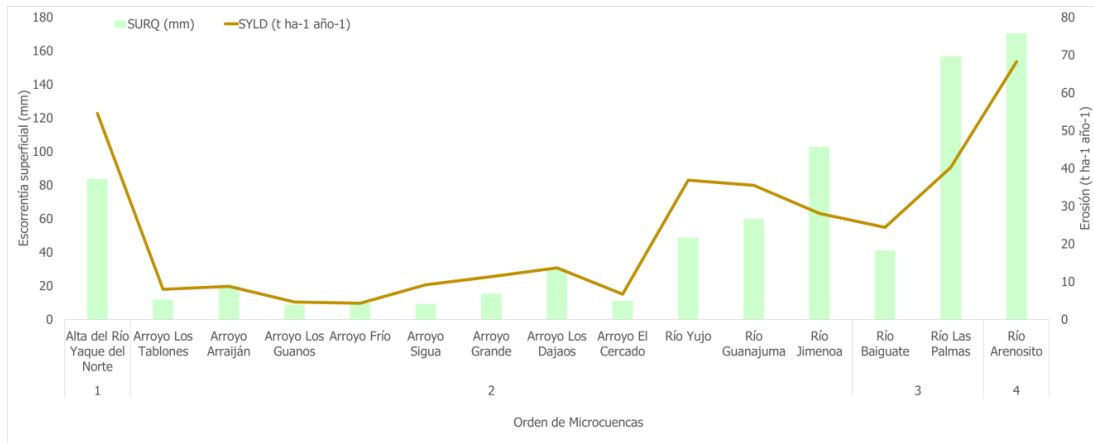


Figura 16. Escorrentía superficial (SURQ) y erosión (SYLD) en el área de estudio

### 3.9.1 Línea base de erosión

La erosión promedio anual en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte es de  $24 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , y esta es moderada (FAO *et al.* 1980). De acuerdo con la categorización de FAO se identificaron rangos de pendiente baja, moderada y alta. En el área dos microcuencas tienen condición alta de erosión (30% del área total), siete condiciones moderadas (56% del área total) y seis ligera (14% del área total). Este último grupo de microcuencas se encuentra en la parte más alta del área de estudio. La mayor pérdida de suelo se presenta en la microcuenca del río Arenosito y la menor en Arroyo Los Guanos (Figura 17).

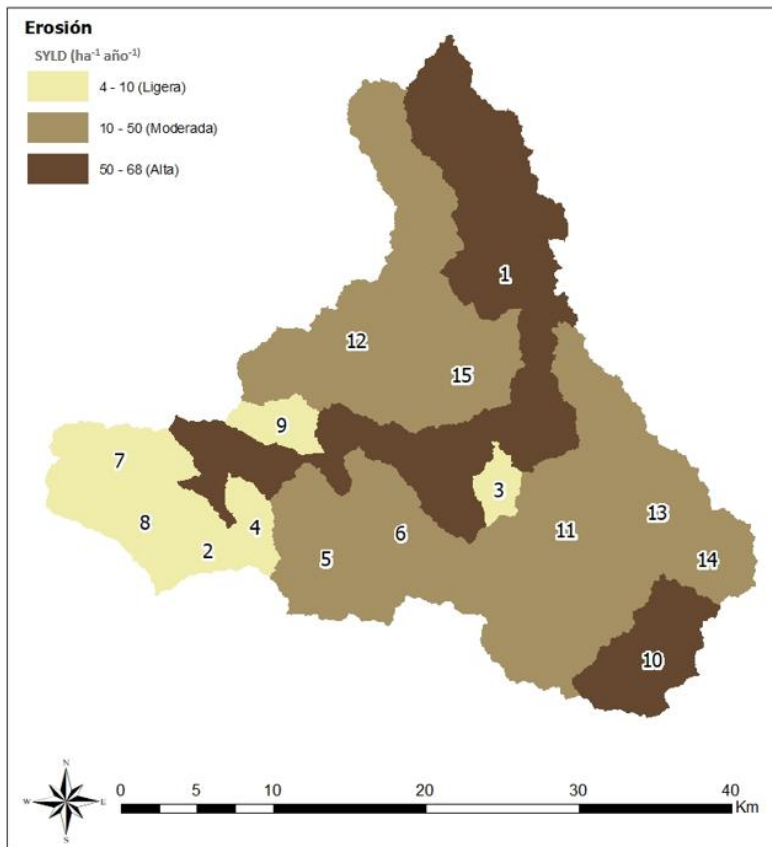


Figura 17. Erosión en el área de estudio

Estudios evidencian que la vegetación, el grado de pendiente y el manejo de un sistema cumplen una función de suma importancia en lo referente a la producción de sedimentos y a la erosión (FAO 1967; Valladeres 2004; Lianes *et al.* 2009; Ríos *et al.* 2012). En algunos estudios SWAT ha subestimado la producción de sedimentos. Según explican los autores esto puede estar relacionado con la subestimación por parte del software del factor topográfico de las subcuencas (Torres-Benites *et al.* 2004; Rivera-Toral *et al.* 2012). En este estudio existe una sobreestimación de caudales y basado en lo expuesto anteriormente se espera una estimación aproximada de la erosión.

En bosques tropicales la pérdida de suelo por erosión hídrica es baja (Mozo 1967), sin embargo, en este caso se obtuvo en promedio un grado de erosión moderado. Considerando que la sexta parte de los suelos del planeta se encuentran afectados por erosión hídrica (Alatorre y Beguería 2009), es recomendable implementar medidas que mejoren la situación en varias de las microcuencas que conforman el área de estudio de la presente investigación.

Las medidas por implementar para combatir la problemática de erosión de suelos dependerán de la situación económica, la importancia que le den las autoridades y el nivel de desarrollo del país (Morales 2014). Bigi (2012) recomienda técnicas tradicionales para la prevención y control de erosión en el hermano país de Haití. Estas técnicas se resumen en jardines manejados dentro del hogar, prácticas de conservación agronómica y técnicas de conservación hidráulica.

#### **4. CONCLUSIONES**

- El modelo SWAT permite tener una idea general de cuál es el estado actual en el que se encuentra una determinada zona y priorizar por áreas más afectadas, contribuyendo esto con la facilitación de información a los tomadores de decisiones.
- En esta modelación no han sido consideradas las extracciones de agua, consecuencia de ello los caudales simulados son mayores a los observados por lo que existe probabilidad de que la producción de agua y erosión también se esté sobreestimando.
- La producción de agua en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte es el alrededor del 60% de las precipitaciones. Esto refleja que, sin considerar las extracciones de agua, la producción de agua no es un problema en esa parte de la cuenca del río Yaque del Norte, lo cual resulta beneficioso para las hidroeléctricas y micro hidroeléctricas que se encuentran en el área.
- El 30% de la sección alta de la cuenca presenta un alto grado de erosión y 56% presenta un grado moderado. Esto significa que es necesario implementar prácticas de conservación de suelo en varios puntos del área de estudio.
- El hecho de que exista una sobreestimación de erosión es positivo porque va de la mano con el principio de precaución. Implementar prácticas de conservación de suelo en las microcuencas que presentan mayor grado de erosión podría estar relacionado con la prevención.



## 5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda repetir la modelación con estaciones climáticas locales y comparar con los resultados de la presente investigación.
- En el área de estudio es requerido un estudio más profundo de suelos que cuente con las características físico-químicas de los mismos por horizonte. Esta información haría más confiable el resultado puesto que la información utilizada en esta modelación se encuentra en muy grande escala (1:5 000 000).
- Es necesaria la implementación de estaciones permanentes de monitoreo de sedimentación y caudales de carácter diario con el fin de tener datos más robustos para el proceso de calibración. De igual forma, es precisa una modelación posterior incorporando las extracciones de agua, si es posible por uso.
- Se recomienda extender el estudio a toda la cuenca del río Yaque del Norte, pero haciendo los debidos ajustes para de esta forma tener información útil y más confiable para la adecuada gestión del agua de la cuenca. Sería más indicado modelar cada una de las microcuencas y a partir de ello hacer la predicción para toda la cuenca.

## 6. LITERATURA CITADA

- Abbaspour, K; Johnson, C; Van-Genuchten, M. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone*. Vol. 3. No. 4. Pp 1340-1352.
- Abbaspour, K. 2013. SWAT-CUP: SWAT-Calibration and Uncertainty analysis Procedures. SWAT-CUP workshop, Toulouse. Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.
- Abbaspour, K; Vaghefi, S; Srinivasan, R. 2017. A guideline for successful calibration and uncertainty analysis for soil and water assessment: a review of papers from the 2016 international SWAT conference. Ed. Water. 18 p.
- Alatorre, L; Beguería, S. 2009. Los modelos de erosión: una revisión (en línea). Zaragoza, España. Pp 29-48. Consultado 18 de jun. 2019. Disponible en [http://tierra.rediris.es/Cuaternarioy-Geomorfologia/images/vol23\\_1\\_2/Cuater%2023\(1-2\)\\_\(02\)Alatorre.pdf](http://tierra.rediris.es/Cuaternarioy-Geomorfologia/images/vol23_1_2/Cuater%2023(1-2)_(02)Alatorre.pdf).
- Arnold, JG; Moriasi, DN; Gassman, PW; Abbaspour, KC; White, MJ; Srinivasan, R; Snthi, C; Harmel, RD; van Griensven, A; Van Liew, MW; Kannan, N; Jha, MK. 2012. SWAT: model use, calibration, and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. Pp 1491-1508.
- Arroyo, L; Heidinger, H; Araya, E. 2012. Modelo hidrológico SWAT como herramienta para procesos de toma de decisión (en línea). No. 14. 31 p. Consultado 18 de jun. 2019. Disponible en <http://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/08/00398folletomodelohidrologicoswat.pdf>.
- ARQHYS. 2012. Hidroeléctrica de Jimenoa. Equipo de colaboradores y profesionales de la revista ARQHYS. Disponible en <https://www.arqhys.com/construccion/hidroe-lectricajimenoa.html>
- Balzarini, M; Gonzáles, M; Tablada, M; Casanoves, F; Di Rienzo, J; Robledo, J. 2008. Infostat: manual de usuario. Ed. Brujas. 335 p. Consultado 7 de jun. 2019. Disponible en

<https://www.researchgate.net/publication/283491340>.

- Behrends, K; Chagas, C; Vázquez, A; Palacín, E; Santanatoglia, O; Castiglioni, M; Massobrio, M. 2011. Aplicación del modelo hidrológico SWAT en una microcuenca agrícola de la Pampa Ondulada. Argentina. SCIELO. Vol. 29. Consultado el 7 de jun. 2019. Disponible en [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S185020672011000100008&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S185020672011000100008&lng=es&nrm=iso).
- BID (Banco Interamericano de Desarrollo). 2017. Estudio de impacto ambiental y social: proyecto de ampliación del cauce del Río Areco aguas debajo de la RN8 y la ampliación de puentes RN8 y RP41 (en línea). Buenos Aires, Argentina. 318 p. Consultado 18 de jun. 2019. Disponible en [http://www.mosp.gba.gov.ar/sitios/hidraulica/informacion/EIAS\\_Proyecto\\_-\\_Ampliacion\\_CauceRioAreco\\_AguasAbajo\\_RN8\\_RP41.pdf](http://www.mosp.gba.gov.ar/sitios/hidraulica/informacion/EIAS_Proyecto_-_Ampliacion_CauceRioAreco_AguasAbajo_RN8_RP41.pdf).
- BLI (BirdLife International). 2019. Important Bird Areas factsheet: Armando Bermudez National Park (en línea). Consulted on jun. 20 2019. Disponible en <http://datazone.birdlife.org/site/factsheet/armando-bermudez-national-park-iba-dominican-republic>.
- Bracmort, K; Arabi, M; Frankenberger, J; Engel, B; Arnold, J. 2006. Modeling long-term water quality impact of structural BMPs (online). Vol. 49. No. 2. Pp 367-374. Consulted on jun. 20 2019. Available at <https://swat.tamu.edu/media/90119/bracmort2006.pdf>.
- Brandizi, L; Labraga, JC. 2012. Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del Río Salado, provincia de Buenos Aires (en línea). Argentina. 9 p. Consultado 18 de jun. 2019. Disponible en <http://www.congremet.prmarg.org/upload/brandizilaura.pdf>.
- Buscuñán, S. 2010. Relación entre la erosión producida por un flujo superficial en suelos finos y algunas propiedades de estos (en línea). Universidad de Chile. 222 p. Consultado 20 de jun. 2019. Disponible en [http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2010/cfbascunan\\_sc/pdf-Amont/cf-bascunan\\_sc.pdf](http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2010/cfbascunan_sc/pdf-Amont/cf-bascunan_sc.pdf).
- Cabrera, J. 2012. Calibración de modelos hidrológicos. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil. Perú. 7 p. Consultado 7 de junio 2019. Disponible en [http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_2.pdf](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf).
- Caraballo, J. 2019. Sequía impacta sector ganadero en la línea noroeste de República Dominicana (en línea). Diario Libre. Consultado 17 de jun. 2019. Disponible en <https://www.diariolibre.com/economia/sequia-impacta-sector-ganadero-en-lalineanoroeste-de-republica-dominicana-LL11920193>.
- Cartes, E.; Rubilar, R. y Mardones, O. 2009. Comparación de erosión hídrica en plantaciones forestales y bosque nativo, en suelo granítico de la región del Bío-Bío, Chile (en línea). XIII Congreso Forestal Mundial. Buenos Aires, AR. pp. 18-23. Consultado 20 de jun. 2019. Disponible en [http://www.cfm2009.org/es/programapost/resumenes/uploads/Erosion\\_hidrica\\_FD.pdf](http://www.cfm2009.org/es/programapost/resumenes/uploads/Erosion_hidrica_FD.pdf).
- Castro, G. 2005. Impactos y consecuencias de las represas (en línea). CIEPAC, A.C. (Centro de Investigaciones Económicas y Políticas de Acción Comunitaria). Consultado 20 de jun. 2019. Disponible en [https://www.ecoportal.net/temasespeciales/agua/impacto\\_y\\_consecuencias\\_de\\_las\\_represas/](https://www.ecoportal.net/temasespeciales/agua/impacto_y_consecuencias_de_las_represas/).
- Cervantes, R. 1999. Disminución en la escorrentía superficial debido a variaciones en el uso del suelo (en línea). UCR (Universidad de Costa Rica). 69 p. Consultado 20 de jun. 2019. Disponible en <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/914/1-/18693.pdf>.
- Choque, B. Identificación de factores determinantes en la producción de agua y sedimentos en la subcuenca del río Birrís, cuenca del río Reventazón, Costa Rica. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). Turrialba, Costa Rica. 67 p.

- Chow, V.; Maidment D.; Mays, L. 1994. Hidrología aplicada. McGraw-Hill Interamericana, S.A. Santafé de Bogotá. CO. 299 p.
- Díaz, R. 2010. Mecanismo de pago por servicios ambientales en la cuenca del río Yaque de Norte en la República Dominicana. SEMARENA (Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales). Caso de estudio. 11 p. Consultado 16 de ago. 2018. Disponible en <http://www.fao.org/forestry/19399088fc1002c11aea5c4a6d38d181-d8f696.pdf>
- Di Luzio, M; Arnold, JG; Srinivasan, R. 2005. Effect of GIS data quality on small watershed stream flow and sediment simulations. Hydrological Processes. Vol. 19. No. 3. Pp 629-650. Consulted on jun. 20 2019. Available at <https://doi.org/10.1002/hyp.5612>.
- Estrada, V; Pacheco, R. 2012. Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba (en línea). Vol. 33. No. 1. Consultado 20 de jun. 2019. Disponible en [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382012000100008](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382012000100008).
- FAN (Fundación Amigos de la Naturaleza). 2016. Disponibilidad hídrica y demanda de agua en la cuenca Piraí: situación actual y escenarios de cambio climático (en línea). 63 p. Consultado 18 de jun. 2019. Disponible en [www.fan-bo.org/wpcontent/files/Oferta\\_y\\_Demanda\\_de\\_agua\\_p.pdf](http://www.fan-bo.org/wpcontent/files/Oferta_y_Demanda_de_agua_p.pdf).
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2009. Guía para la descripción de suelos (en línea). Consultado 6 de jun. 2016. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>.
- FAO. (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1967. La erosión del suelo por el agua. Colección FAO: Fomento de tierras y aguas N°7 FAO, Roma, 207 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) – PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente – UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos (en línea). París, Francia. Consultado 20 de jun. 2019. Disponible en <https://books.google.co.cr/books?id=9stIPAAACAAJ>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación); Unesco. 1976. Mapa mundial de suelos (en línea). México y América Central. París. V.III. 120 p. Consultado 01 de marzo 2019. Disponible en <http://www.fao.org/3/as358s-/as358s.pdf>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). Predicción de la erosión hídrica y eólica (en línea). Santiago, Chile. Consultado 20 de jun. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/3/t2351s/T2351S00.htm#Contents>.
- Febrillet, J; Clases S; Bello, L; Chalas, J. 2014. 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. Aqua-LAC. Vol. 6. No. 2. Pp 21-36. Consultado 13 de jun. 2019. Disponible en <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/03Ferbilliet.pdf>.
- Fernández, C. 2016. Asimilación y evaluación de datos de precipitación en base a satélite en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota. Senamhi (Servicio nacional de meteorología e hidrología). Perú. 68 p. Consultado 6 de junio 2019. Disponible en <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-32.pdf>.
- Fondo Agua. 2015. Plan de conservación (en línea). Santiago, República Dominicana. 13 p. Consultado 20 de jun. 2019. Disponible en [http://fondoaguayaque.org/wpcontent/uploads/2017/02/Plandeconservacion\\_FondoaguaYaque-del-Norte\\_18-Jun-2015-2.pdf](http://fondoaguayaque.org/wpcontent/uploads/2017/02/Plandeconservacion_FondoaguaYaque-del-Norte_18-Jun-2015-2.pdf).
- Fondo Agua. 2018. Cuenca del río Yaque del Norte (en línea). Consultado 23 de ago. 2018. Disponible en <http://fondoaguayaque.org/cuenca-yaque-del-norte/>.
- Fuentes, A. 2015. Aplicación del modelo hidrológico SWAT para simular los efectos del caudal de

- diferentes escenarios del uso del suelo en dos cuencas experimentales Andinas en la región del Bío-bío, Chile (en línea). Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 19 p. Consultado 17 de jun. 2019. Disponible en <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2015/bmfcif9541a/doc/-bmfcif9541a.pdf>.
- García, D. 2008. La regulación de los caudales y su efecto en la biodiversidad (en línea). Universidad Politécnica de Madrid. España. 19 p. Consultado 20 de jun. 2019. Disponible en [https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/6BS2P1\\_Diego%20G-%20JalonACC.pdf](https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/6BS2P1_Diego%20G-%20JalonACC.pdf).
- García, S; Guzmán, R; De Urioste, JL; García, C; Morón, J. 2016. Prueba t de Student para comparación del peso de semillas (*Dipteryx alata* Vogel) de 7 procedencias conocidas, producida en los años 2014 y 2015 (en línea). Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. 7 p. Consultado 17 de jun. 2019. Disponible en <http://www.fonabosque.gob.bo/wpcontent/uploads/2016/-05/Prueba-de-T-de-Student-para-comparacion-de-semillas-de-Dipterix-alata-de-7-procedencias-2014-y-2015.pdf>.
- García, W. 2006. El Sistema complejo de la cuenca hidrológica (en línea). 22 p. Consultado el 8 de jun. 2019. Disponible en [http://www.medellin.unal.edu.co/~poboyca/documentos/-documentos1/documentosJuan%20Diego/Plnaifi\\_Cuencas\\_Pregrado/Sistema%20CuencaHidrogr%E1fica.pdf](http://www.medellin.unal.edu.co/~poboyca/documentos/-documentos1/documentosJuan%20Diego/Plnaifi_Cuencas_Pregrado/Sistema%20CuencaHidrogr%E1fica.pdf).
- GIZ (Cooperación alemana). 2014. Ejercicio en base a piloto de cuenca Yaque del Norte: modelos demostrativos de manejo forestal sustentable (en línea). Consultado 20 de jun. 2019. Disponible en [www.reddccadgiz.org/mecanismos/docs/mrv\\_1567-127450](http://www.reddccadgiz.org/mecanismos/docs/mrv_1567-127450).
- Hargreaves, G; Samani, Z. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Appl. Eng. Agric. Vol. 1. No. 2. Pp 96-99.
- Harvrylenko, S; Bodoque, JM; Zucarelli, V; Mercuri, P. 2014. Aplicación del modelo SWAT para evaluar sequías agropecuarias en la cuenca del río ACrrecifes (prov. Buenos Aires) (en línea). Argentina. 13 p. Consultado 18 de jun. 2019. Disponible en <https://www.ina.gob.ar/legacy/-ifrh-2014/Eje3/3.20.pdf>.
- Hernán, S; Ricardo, G; Basile, P. 2015. Modelación distribuida del escurrimiento superficial en la cuenca del río Tercero-Carcaña (en línea). Agua-LAC. Vol. 8. No. 1. Pp 44-57. Consultado 7 de junio 2019. Disponible en [https://rephip.unr.edu.ar/bitstream/handle/2133/9725/Rio\\_Tercero\\_Carcara%C3%B1a\\_Stenta\\_modelacion.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://rephip.unr.edu.ar/bitstream/handle/2133/9725/Rio_Tercero_Carcara%C3%B1a_Stenta_modelacion.pdf?sequence=3&isAllowed=y).
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2014. Modelación hidrológica (en línea). Consultado 20 de jun. 2019. Disponible en <http://www.ideam.gov.co/-web/agua/modelacion-hidrologica>.
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2018. Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica (en línea). Bogotá, Colombia. 59 p. Consultado 20 de jun. 2019. Disponible en [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023833/-Protocolo\\_Modelacion\\_HH.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023833/-Protocolo_Modelacion_HH.pdf).
- INDRI (Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos). 2017. Plan de Manejo y Adecuación Ambiental (PMAA) para las obras de rehabilitación de las presas de Chacuey, Maguaca, Tavera y Mijo, y mejora de los Sistemas de Riego. Proyecto Agricultura Resiliente y Gestión Integral de los Recursos Naturales en las Cuencas de río Yaque del Norte y Ozama-Isabela. República Dominicana. 118 p.
- Iroumé, A. 2014. Uso del modelo SWAT para estudiar los efectos de cambio de uso de suelo en la hidrología, transporte de sedimento fino y en las fuentes de aporte de sedimentos en cuencas experimentales del sur de Chile (en línea). Universidad Austral de Chile. 20 p. Consultado 18 de jun. 2019. Disponible en <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/>

2014/bmfcir684u/doc/-bmfcir684u.pdf.

- Khalid, K; Foz, M; Abd, N; Radzali, M; Haron, S; Othman, Z; Bachok, M. 2016. Sinsivity analysis in watershed model using SUFI-2 algorithm. ScienceDirect. Malaysia. Pp 441-447.
- Marcano, J. 2016. Distritos hidrográficos de la República Dominicana (en línea). Consultado 20 de jun. 2019. Disponible en <https://jmarcano.com/mipais/geografia/-rios/distritos.html>
- Maffei, M. 2012. Desempeño de la ecuación de Hargreaves en la estimación de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) en una zona de páramo en Trujillo, Venezuela (en línea). LUZ. Vol. 29. Pp 378-394. Consultado 17 de jun. 2019. Disponible en [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/31162564/v29n3a2012378394.pdf?responsecontentdisposition=inline%3B%20filename%3DDesempeno\\_de\\_la\\_ecuacion\\_de\\_Hargreaves\\_e.pdf&XAmzAlgorithm=AWS4HMACSHA256&XAmzCredential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20190618%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4\\_request&XAmzDate=20190618T085357Z&XAmzExpires=3600&XAmzSignedHeaders=host&XAmzSignature=8e3df9452631a11bb9b2c824d7686d1651dfb4012b3687ed35864f257864a7c4](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/31162564/v29n3a2012378394.pdf?responsecontentdisposition=inline%3B%20filename%3DDesempeno_de_la_ecuacion_de_Hargreaves_e.pdf&XAmzAlgorithm=AWS4HMACSHA256&XAmzCredential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20190618%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&XAmzDate=20190618T085357Z&XAmzExpires=3600&XAmzSignedHeaders=host&XAmzSignature=8e3df9452631a11bb9b2c824d7686d1651dfb4012b3687ed35864f257864a7c4).
- Me, W; Hamilton, D; Abell, J. 2015. Applying treated municipal wastewater to forested catchment: modeling effects on stream discharge, sediment and nutrient loads (online). 21 p. Consulted on jun. 20 2019. Available at: <https://swat.tamu.edu/media/114742/c1-4-me.pdf>.
- Méndez-Morales, M. 2012. Calibración y validación del modelo hidrológico SWMM en cuencas hidrográficas de alta pendiente en Costa Rica. Tecnología en Marcha. Vol. 26. No. 2. Pp 20-32.
- Méndez-Morales, M. 2016. Evaluación cuantitativa, espacial y temporal de los recursos hídricos de la cuenca del Río Agua Caliente mediante la construcción y análisis de balances hídricos. TEC (Instituto Tecnológico de Costa Rica). 90 p.
- MIMARENA (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2016. Descripción biofísica de la cuenca del río Yaque del Norte (en Línea). Dirección de Información Ambiental. Consultado 20 de jun. 2019. Disponible en <https://ambiente.gob.do/-cuencas-hidrograficas/yaque-del-norte/>.
- Molina, B. 2019a. Hieren a Franklin Marichal luego de una discusión por el control del agua en una finca de Castañuelas (en línea). Hoy Noticias. Consultado 17 de jun. 2019. Disponible en <https://hoynoticias.com.do/hieren-a-franklin-marichal-luego-de-una-discusion-por-elcontrol-del-agua-en-una-finca-de-castanuelas/>.
- Molina, T. 2019b. Escasez de agua inquieta en la Línea Noroeste: arroceros de Montecristi temen perder siembra, y piden declarar en emergencia a Santiago Rodríguez (en línea). Santo Domingo, República Dominicana. Consultado 17 de jun. 2019. Disponible en <https://www.diariolibre.com/actualidad/escasezdeaguainquietaenlalineanoroesteOP11788868>.
- Molinero, L. 2003. Pruebas pareadas (en línea). España. 6 p. Consultado 17 de jun. 2019. Disponible en <https://www.alceingenieria.net/bioestadistica/pareadas.pdf>.
- Molnar, P. (2011). "Calibration". Watershed Modelling, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland
- Montecelo, Y. 2018. Modelación del efecto de la variación climática en el balance hídrico en dos cuencas (México y Cuba) bajo un escenario de cambio climático (en línea). CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada). Baja California, México. 114 p. Consultado 17 de jun. 2019. Disponible en [https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/2531/1/tesis\\_Montecelos%2](https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/2531/1/tesis_Montecelos%2)

0Zamora\_Yalina\_26\_oct\_2018.pdf.

- Mook, W. 2002. Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico: principios y aplicaciones. Instituto Geológico y Minero de Madrid, España. No. 1. 550 p. Consultado 7 de junio 2019. Disponible en [https://books.google.co.cr/books?id=vp8lF9WqjjkC&pg=PA547&lpg=PA547&dq=ineficiente+ajuste+del+modelo+hidrol%C3%B3gico&source=bl&ots=m0YGTyZ1D&sig=ACfU3U16lveAhKlnnaQohMUgiDQDrnJoCw&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwik\\_bG0l dniAhWCzVkkHcUAX4Q6AEwDHoECAkQAQ#v=onepage&q=ineficiente%20ajuste%20del%20modelo%20hidrol%C3%B3gico&f=false](https://books.google.co.cr/books?id=vp8lF9WqjjkC&pg=PA547&lpg=PA547&dq=ineficiente+ajuste+del+modelo+hidrol%C3%B3gico&source=bl&ots=m0YGTyZ1D&sig=ACfU3U16lveAhKlnnaQohMUgiDQDrnJoCw&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwik_bG0l dniAhWCzVkkHcUAX4Q6AEwDHoECAkQAQ#v=onepage&q=ineficiente%20ajuste%20del%20modelo%20hidrol%C3%B3gico&f=false).
- Morales, M. 2014. Estimación de erosión laminar y sedimentación con modelos hidrológicos para la selección de prácticas de conservación de suelos y cambios de cobertura en la Unidad Hidrológica de Aquin/Saint-Louis Du Sud-Haití (en línea). CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 94 p. Consultado 20 de jun. 2019. Disponible en [http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7082/Estimacion\\_de\\_la\\_erosion\\_laminar.pdf?sequence=1](http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/7082/Estimacion_de_la_erosion_laminar.pdf?sequence=1).
- Moriasi, D; Arnold, J; Van, M; Bingner, R; Harmel, R; Veith, T. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, transactions of the ASABE. Pp. 885-900.
- Morgan, R.; Quinton, J. 2001. Erosion modelling: landscape erosion and evolution modeling. Kluwer Academic New York. Pp 117-143.
- Mozo, T. 1967. Conservación del suelo a través del bosque. Revista Nacional de Agricultura. Colombia Vol. 17. Pp 46-47.
- Muñoz, H; García, JL; Arango, D; Parra, D. 2007. Modelación hidrológica e hidráulica aplicada a estudios de inundabilidad en cauces naturales, caso de estudio: urbanización Río Nima (en línea). No. 5. Pp 28-36. Consultado 20 de jun. 2019. Disponible en <https://www.redalyc.org/-html/2311/231117589003/index.html>.
- Nájera, O; Bojórquez, J; Flores, C; Murray, R; González, A. 2016. Riesgo de erosión hídrica y estimación de pérdida de suelo en paisajes geomorfológicos volcánicos en México (en línea). Tepic, Nayarit, México. Vol. 37. No. 2. Consultado 20 de jun. 2019. Disponible en [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362016000200006](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362016000200006).
- Neitsch, S; Arnold, J; Kiniry, R; Srinivasan, R; Williams, J. 2002. Soil and water assessment tool user's manual (online). Version 2000. Texas. 472 p. Consulted on jun. 20 2019. Available at <https://swat.tamu.edu/media/1294/swatuserman.pdf>.
- Neitsch, SL., Williams, JR., Arnold, JG., Kiniry, JR. 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas, United States of America, Texas Water Resources Institute. 618 p.
- Orbando, JC; Morán, JC; Solarte, J. 2013. Modelación del recurso hídrico en la microcuenca Peñas Blancas, municipio de Tangua, Departamento de Nariño. Universidad de Nariño. Colombia. 28 p. Consultado 7 de junio 2017. Disponible en <http://biblioteca.udenar.edu.co:-8085/atenea/biblioteca/89698.pdf>.
- Oñate-Valdivieso, F; Bosque-Sendra, J; Sastre-Merlin, A; Ponce, M. 2015. Calibración, validación y evaluación de un modelo hidrológico concentrado en un área montañosa al sur del ecuador (en línea). Pp 945-963. Consultado 20 de jun. 2019. Disponible en <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v50n8/1405-3195-agro-50-08-945.pdf>.
- Ovalles, P. 2018. Shapefile de microcuencas que componen la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte. Jarabacoa, La Vega, República Dominicana.
- Ordoñez, J. 2011. Ciclo hidrológico (en línea). Cartilla técnica. Sociedad geográfica de Lima. Perú. 44 p. Consultado 6 de jun. 2018. Disponible en <https://www.gwp.org/globalassets/global/>

gwpsam\_files/publicaciones/varios/ciclo\_hidrologico.pdf.

- Plan Yaque. 2018. Programa para la restauración hídrica de la porción Este de la cuenca media del río Yaque del Norte (PRO-YAQUE I): Conjunto de medidas de intervención y de gobernanza para la restauración y manejo sostenible de las 15 microcuencas del territorio comprendido entre Manabao-Jarabacoa-Taveras y Jimenoa, período 2018 al 2023. 32 p.
- Ponce, M. 2018. Se acentúa la escasez de agua en el Cibao (en línea). El Caribe. Santiago, República Dominicana. Consultado 17 de jun. 2019. Disponible en <https://www.elcaribe.com.do/2018/-08/15/panorama/region-norte/se-acentua-la-escasez-de-agua-en-el-cibao/>.
- Reynoso, D. 2015. Contraste de la disponibilidad y demanda de agua por provincia. República Dominicana. 57 p.
- Ríos, N; Ibrahim, M; Faustino, J; FONAFIFO. 2012. Uso Del modelo SWAT para estimar la producción de sedimentos en una cuenca dominada por ganadería. Costa Rica. Pp 761-765.
- Ríos, N; Imbach, P; Argeñal, J. hihuihui. Impacto del cambio climático en la producción de agua para la agricultura y consumo humano en la subcuenca del río Guacerique, Río Choluteca, Honduras. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza).
- Rivera-Toral, F; Pérez-Nieto, S; Ibáñez-Castillo, L; Hernández-Saucedo, F. 2012. Aplicabilidad del modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México (en línea). Vol. 46. No. 2. Consultado 18 jun. 2019. Disponible en [www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S14053195201200020-0001](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S14053195201200020-0001).
- Rodríguez, L. 2016. Servicios ambientales hidrológicos proporcionados por los ecosistemas forestales de la cuenca del río Misantia, Veracruz (en línea). Universidad Veracruzana. México. 147 p. Consultado 20 de jun. 2019. Disponible en [https://www.uv.mx/mcef/files/2018/04/SERVICIOSAMBIENTALES HIDROLOGICOS PROPORCIONADOS POR LOS ECOSISTEMAS FORESTALES DE\\_20161013190021.pdf](https://www.uv.mx/mcef/files/2018/04/SERVICIOSAMBIENTALES HIDROLOGICOS PROPORCIONADOS POR LOS ECOSISTEMAS FORESTALES DE_20161013190021.pdf).
- Roche, P; Gaume, E. 2012. Hydrologie quantitative : processus, modèles et aide à la décision. Springer Science & Business Media. Consulted on jun. 20 2019. Available at <https://www.abebooks.com/book-search/title/hydrologie-quantitative-processus-mod%E8les-aide/author/roche-pierre-alain-miquel-jacques-gaume/>.
- Sánchez, M; Fernández, D; Marínez, M; Granados, R; Ríos, J. 2017. Modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México con SWAT. 27 p. Consultado 6 de junio 2019. Disponible en <https://imta.gob.mx/tyca/descargas/preprint/Vol.VIIINo.5Septiembre-Octubre2017/Art%C3%ADculo%200322NS%20Versi%C3%B3n%20final.pdf>.
- Santana, R. 2018. Emperora escasez de agua en el Cibao Central ante fuerte sequía (en línea). Santo Domingo, República Dominicana. Consultado 17 de jun. 2019. Disponible en <https://listindiario.com/la-republica/2018/08/18/529200/empeora-escasez-de-agua-en-el-cibao-central-ante-fuerte-sequia>.
- Santiago, S; Arteaga, R; Sangerman, D; Cervantes, R; Navarro, A. 2012. Evapotranspiración de referencia estimada con Fao-Penman-Monteith, Priestley-Taylor, Hargreaves y RNA (en línea). Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Vol. 3. No. 8. Pp 1535-1549. Consultado 17 de jun. 2019. Disponible en [https://www.researchgate.net/profile/Sandra\\_Santiago\\_Rodriguez/publication/262442854\\_Evapotranspiracion\\_de\\_referencia\\_estimada\\_con\\_FaoPenmanMonteith\\_PriestleyTaylor\\_Hargreaves\\_y\\_RNA/links/54beb98b0cf28ad7e7194b73.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Sandra_Santiago_Rodriguez/publication/262442854_Evapotranspiracion_de_referencia_estimada_con_FaoPenmanMonteith_PriestleyTaylor_Hargreaves_y_RNA/links/54beb98b0cf28ad7e7194b73.pdf).
- SEDPA (Servicio Documental y de Pronóstico Ambiental). 2010. Aplicación del "SWAT" como modelo para la gestión del agua y el suelo en la cuenca hidrográfica de Jiloca (en línea). España. 50 p. Consultado 20 de jun. 2019. Disponible en <http://xiloca.org/espacio/wpcontent/uploads/2010/09/PROYECTOORIGINALSWAT.pdf>.

- SEA (Secretaría de Estado de Agricultura); JAD (Junta Agroempresarial Dominicana); IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). 1993. Diagnóstico y estrategia del sector agropecuario (en línea). Santo Domingo, República Dominicana. 132 p. Consultado 17 de jun. 2019. Disponible en [https://books.google.co.cr/books?id=wgNAQAIAAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.co.cr/books?id=wgNAQAIAAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false).
- Scherrer, S.; Naef, F. 2003. A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland. *Hydrol. Processes*. Vol. 17. Pp 391–401.
- Silva, S. 2009. Evaluación del modelo de simulación SWAT para la producción de agua en una cuenca hidrográfica prioritaria de la región central de Venezuela, caso: cuenca media del río Pao (en línea). 122 p. Consultado 18 de jun. 2019. Disponible en <https://www.researchgate.net/-publication/48225893>.
- Szczesniak, M; Piniewski, M. 2015. Improvement of hydrological simulations by applying daily precipitation interpolation schemes in meso-scale catchments. *Water*. Vol. 7 (2). Pp 747-779.
- Tang, F.; Xu, H; Xu, Z. 2011. Model calibration and uncertainty analysis for runoff in the Chao River Basin using sequential uncertainty fitting (online). Biennial Conference of International Society for Ecological Modelling. Ed. *Procedia Environmental Sciences*. 11 p. Consulted on jun. 7 2019. Available at. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S18780296120-01715>.
- Torres-Benites, E; Fernández-Reynoso, D; Oropeza-Mota, JL; Mejía-Saenz, E. 2004. Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México *Terra Latinoamericana*. Vol. 22. No 4. Sociedad Mexicana de la ciencia del suelo. Chapingo, México. Pp 437-444.
- Ulloa, D. 2014. El aporte de las zonas ribereñas al control de las inundaciones: estudio de caso de la cuenca Cahoacán, Chiapas, México. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). Turrialba, Costa Rica. 72 p.
- Urrutia, M. (2016). Aplicación del modelo SWAT para la simulación del ciclo hidrológico de la Cuenca Alta del Río San Juan bajo la influencia de la actividad minera. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C. Pp 20-75.
- Valladeres, F. 2004. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante (en línea). Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. Pp 309-334. Consultado 18 de jun. 2019. Disponible en <http://digital.csic.es/bitstream/10261/48695/1/Interacciones%20entre%20la%20vegetaci%C3%B3n%20y%20la%20erosi%C3%B3n%20h%C3%ADdrica.pdf>.
- Valverde, E. 2018. Modelación hidrológica para cuantificar la producción de agua y sedimento actual y futuro a partir de cambios de cobertura forestal, sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú. TEC (Instituto Tecnológico de Costa Rica). Cartago, Costa Rica. 65 p.
- Vargas, LC. 2010. Modelo teórico determinístico para análisis estacional del agua en cuencas hidrográficas con datos discretos de caudales. UNA (Universidad Nacional). Costa Rica. 136 p. Consultado 8 de junio 2019. Disponible en <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/5856/Modelo%20te%C3%B3rico%20determin%C3%ADstico%20para%20an%C3%A1lisis%20de%20la%20disponibilidad%20estacional%20del%20agua%20en%20cuencas%20hidrogr%C3%A1ficas%20con%20datos%20discretos%20de%20caudales.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Vargas, O. 2011. Restauración ecológica, biodiversidad y conservación (en línea). *Acta biológica colombiana*. Vol. 16. No. 2. Pp 221-246. Consultado 8 de junio 2019. Disponible en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol/article/view/19280/-28009>.



- Veervoort, W. 2017. Course notes advanced SWAT: calibrating using SWAT-CUP. The University of SYDNEY. Australia. 27 p.
- Vélez, J. 2008. Modelación en hidrología (en línea). Conference: III Simposio Nacional. Actualidad y tendencias de la Ingeniería Civil en Colombia. Manizales, Colombia. 64 p. Consultado el 8 de junio del 2019. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/271194652-Modelacion\\_en\\_hidrologia](https://www.researchgate.net/publication/271194652-Modelacion_en_hidrologia).
- Quezada, M. 2010. Caracterización de los procesos hidrológicos relevantes en la cuenca del río Juncal mediante un modelo hidrológico distribuido. Universidad de Chile. Santiago de Chile. 106 p. Consultado el 8 de junio 2019. Disponible en [http://repositorio.uchile.cl/bitstream/-handle/2250/103674/cfquezada\\_mp.pdf;sequence=3](http://repositorio.uchile.cl/bitstream/-handle/2250/103674/cfquezada_mp.pdf;sequence=3).
- WB (World Bank). 2012. Ciudades e inundaciones: guía para la gestión integrada del riesgo de inundaciones en ciudades en el siglo 21 (en línea). Resumen para hacedores de políticas. Washington. 61 p. Consultado 18 de jun. 2019. Disponible en <http://documents.worldbank.org/curated/en/950451468148161242/pdf/667990PUB0v20S00Box385314B00PUBLIC0.pdf>.
- Zuleta, C. 2013. Análisis del comportamiento del recurso hídrico ante cambios en el uso del suelo y el cambio climático en la cuenca del río Pejivalle (en línea). CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 79 p. Consultado 18 de jun. 2019. Disponible en [orton.catie.ac.cr/repdoc/A11471e/A11471e.pdf](http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A11471e/A11471e.pdf).

## **Artículo 2. Análisis de sensibilidad en producción de agua y erosión hídrica bajo escenarios de cobertura vegetal y clima en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana**

### **RESUMEN**

El aumento acelerado de estos gases producto de diversas actividades humanas provocan el calentamiento global y aceleran el cambio climático. Lo anterior aunado a la disminución de la calidad de las aguas, la degradación de los suelos, producto de la deforestación y las inadecuadas prácticas agrícolas, afectan el recurso hídrico de las cuencas hidrográficas. El objetivo de este trabajo fue utilizar escenarios de cobertura vegetal y escenarios de clima para realizar un análisis de los panoramas de producción de agua y erosión al año 2030. El estudio se realizó en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte, la cual tiene una extensión de 908.4 km<sup>2</sup> y un perímetro de 241.86 km. Para este trabajo se utilizó la herramienta de análisis de agua y suelo SWAT en la interfase QGIS (QSWAT 1.8). Se utilizaron anomalías en precipitación y temperatura, según cinco modelos de circulación global y dos escenarios de concentraciones de gases de efecto invernadero (RCPs 4.5 y 8.5). En comparación con la línea base la producción de agua disminuirá entre 1% (RCP 4.5) y 11% (RCP 8.5). La erosión también disminuirá entre -8 y -11 t ha<sup>-1</sup>. En relación con la producción de agua, toda el área de estudio presentó sensibilidad baja a partir del RCP 4.5 y sensibilidad media a partir del RCP 8.5. En relación con la erosión, en 25% de área se identificó sensibilidad baja, en las partes más altas del área de estudio. El 75% restante presentó una sensibilidad media positiva en ambos espacios.

**Palabras Claves:** QSWAT, línea base, modelos de circulación global, RCPs, anomalías climáticas, escenarios de cobertura, Dinámica EGO, producción de agua, erosión, sensibilidad.

### **ABSTRACT**

The accelerated increase of these gases resulting from various human activities cause global warming and accelerate climate change. This, together with the decrease in water quality, the degradation of soils as a result of deforestation and inadequate agricultural practices, affect water resources in river basins. The objective of this work was to use scenarios of vegetation cover and climate scenarios to perform an analysis of the scenarios of water production and erosion by 2030. The study was conducted in the upper section of the Yaque del Norte river basin, which has an extension of 908.4 km<sup>2</sup>, a perimeter of 241.86 km. For this work the SWAT soil and water analysis tool was used in the QGIS interface (QSWAT 1.8). Abnormalities in precipitation and temperature were used, according to five models of global circulation and two scenarios of greenhouse gas concentrations (RCPs 4.5 and 8.5). In comparison to the baseline, water production will decrease between 1% (RCP 4.5) and 11% (RCP 8.5). Erosion will also decrease between -8 and -11 t ha<sup>-1</sup>. In relation to water production, the entire area of study presented low sensitivity from RCP 4.5 and medium sensitivity starting in RCP 8.5. In relation to the erosion, in 25% of area, low sensitivity was identified in the highest parts of the study area. The remaining 75% presented a positive average sensitivity in both scenarios.

**Key words:** QSWAT, baseline, global circulation models, RCPs, climatic anomalies, coverage scenarios, EGO dynamics, water production, erosion, sensitivity.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Efecto invernadero es el mecanismo por el cual la delgada capa de gases (atmósfera) que rodea el planeta se calienta (Barry y Chorlye 2003; Caballero *et al.* 2007). El nitrógeno (78.1%), oxígeno (20.9%), Argón (0.9%), Dióxido de Carbono (0.03%) y otros son gases que componen la atmósfera y evitan que la radiación que llega del sol sea reflejada en su totalidad; por tal razón son fundamentales para el desarrollo de la vida en el planeta (Caballero *et al.* 2007; Bernavides y León 2007; Fernández 2018). Sin embargo, el aumento acelerado de estos gases producto de diversas actividades humanas provocan el calentamiento global que se evidencia en la variabilidad climática y aceleran el cambio climático, amenazando diversos ecosistemas (SEMARNAT 2009; Useros 2012).

Hay una gran cantidad de literatura sobre la existencia del cambio climático por el aumento de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) causado por el hombre (Oswaldo y León 2007; Guzmán 2009; BM 2010; ProDUS 2014). De acuerdo con el IPCC (2007a), existen pruebas convincentes de que la mayor parte del calentamiento observado en los últimos 50 años se atribuye a actividades humanas asociadas a la deforestación, quema de combustible fósiles y sobre explotación de los recursos naturales, entre otros.

El cambio de clima afecta a todo el planeta Tierra, consecuencia de ello muchas especies afrontan riesgo de extinción y la seguridad alimentaria se ve afectada (IPS 2019; FAO 2019). Los agroecosistemas dependen de manera directa de los efectos positivos o negativos del clima (WBCSD y IUCN 2008). En algunas zonas de Europa, África, Asia y Centro América los extremos vinculados a la disponibilidad del recurso hídrico aumentarán de forma notoria (MAGRAMA 2015). Lo anterior provoca alta sensibilidad de las regiones, lo cual dificultará el mantenimiento sostenido de la productividad agrícola, la productividad pesquera y otros servicios ecosistémicos (IPCC 2014).

Un análisis de vulnerabilidad es la medida inicial para un proceso de gestión orientado a la adaptación al cambio climático (Metternicht *et al.* 2014). Es por esta razón que se han realizado varios análisis alrededor del mundo (SINAC 2013; USAID *et al.* 2013; ProDUS 2014; Alonso *et al.* 2015; Delgado *et al.* 2016; Mercado 2017).

Ejemplo de ello es el índice de vulnerabilidad al cambio climático en América Latina y el Caribe en el cual se expone la situación de exposición a riesgos relacionados con el clima, como ciclones tropicales, inundaciones, sequías y oleadas de calor que afectan la región. Además, en dicho análisis se explica que una de las islas más expuesta es la Isla La Española debido a que los dos países que la componen presentan vulnerabilidad extrema; Haití ocupa el primer lugar y República Dominicana (RD) el lugar número cinco de 33 países evaluados (CAF 2014).

Alrededor del 40% del territorio de RD (13 de 32 provincias) presenta vulnerabilidad de alta a muy alta (Itzco *et al.* 2013). Entre los sectores más vulnerables del país se encuentran el turismo y recursos hídricos (Vergara y Heaussling 2010). Varias comunidades costeras dominicanas dependen de la salud y estabilidad de los hábitats costeros para mantener su medio de vida principal, el turismo. Sin embargo, las altas temperaturas y aumento del nivel del mar están afectando esta zona (Rosa y Lohmann 2014).

Por otro lado, regiones hidrográficas dominicanas presentan un fuerte grado de presión por el recurso hídrico (Saldana 2008). La disminución de la calidad de las aguas, la degradación de los suelos producto de la deforestación y las inadecuadas prácticas agrícolas y la ineficiencia en el uso del agua aunado a los escenarios de cambio climático con tendencia a sequía, contribuyen a la reducción de la vida útil de los embalses y convierten en vulnerable el sector Recursos Hídricos (PLENITUD *et al.* 2014).

Los problemas antes mencionados se evidencian en la cuenca del río Yaque del Norte, la más importante del país y de la cual se analiza la sección alta en la presente investigación. De acuerdo con un estudio elaborado en el año 2015, más del 80% del territorio que abarca esta cuenca sufrirá escasez de agua en el año 2025 (Reynoso 2015).

Basado en lo anterior, el primer Eje del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático de RD del año 2015 al 2030 trata de la seguridad hídrica y alimentaria (CNCCMDL *et al.* 2016). Es por esta razón que este trabajo se realiza principalmente basado en la producción de agua y erosión hídrica bajo escenarios climáticos y de cobertura vegetal. Según lo expuesto por PLENITUD (2014) para identificar y priorizar zonas es necesario realizar análisis de vulnerabilidad y en el presente trabajo se expone uno de los componentes principales para efectuar dicho análisis, la sensibilidad (IPCC 2007b; Wachenfeld *et al.* 2007; Marshall *et al.* 2010; Mercado 2017).

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1 Descripción del área de estudio**

El estudio se llevó a cabo en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte. La altitud de la zona varía entre los 224 y 3,052 msnm. La precipitación media anual es de 1,549.48 mm, y es mayo el mes más lluvioso y junio el menos lluvioso. En la parte más alta pueden caer alrededor de 4.000 mm anuales de lluvia (BLI 2019). De acuerdo con SEA *et al.* (1993) en el país existen tres estaciones: lluviosa intensa (abril-junio), lluviosa moderada (septiembre-noviembre) y periodo seco (diciembre-marzo). Las temperaturas promedio mensuales varían de 16.28°C la mínima hasta 26.81 la máxima°C.

La sección alta del Yaque del Norte cuenta con 291 barrios o parajes (ONE 2010) distribuidos en 15 microcuencas. Cada una de estas microcuencas se encuentran ubicadas entre las provincias La Vega y Santiago de Los Caballeros (Figura 18).

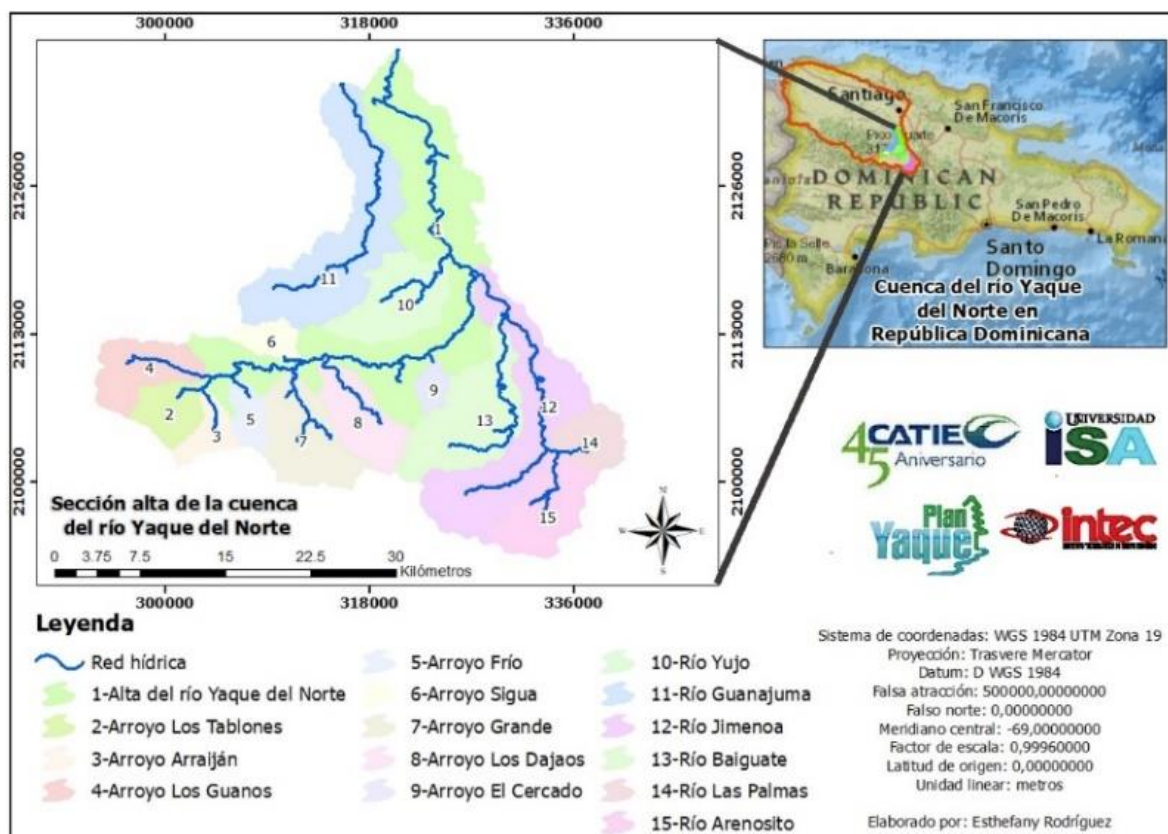


Figura 18. Ubicación de área de estudio

El área total de la sección es de 908.41 km<sup>2</sup>, con un perímetro de 241.86 km. En el Cuadro 15 se pueden apreciar estos últimos valores para cada microcuenca.

Cuadro 15. Parámetros de las microcuencas que componen la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte.

Orden	Nombre de la microcuenca	Ubicación		Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro (Km)	Elevación (msnm)	
		Latitud	Longitud			Mín.	Máx.
1	Alta del río Yaque del Norte	19.302918	-70.712789	227,01	220.2	224	2020
2	Arroyo Los Tablones	19.038917	-70.895997	26,45	29.1	1156	2676
	Arroyo Arraiján	19.022208	-70.863843	17,78	30.78	1156	2363
	Arroyo Los Guanos	19.070856	-70.919452	41,51	41.64	1098	3042
	Arroyo Frío	19.03563	-70.830429	15,78	25.26	1043	1877
	Arroyo Sigua	19.096416	-70.813402	15,80	24.3	846	1818
	Arroyo Grande	19.060496	-70.799388	58,51	49.08	869	1881
	Arroyo Los Dajaos	19.034124	-70.735899	42,42	43.32	788	1741
	Arroyo El Cercado	19.06036	-70.676998	10,42	20.46	603	1704
	Río Yujo	19.141505	-70.674637	56,4	52.5	449	1305
	Río Guanajuma	19.070856	-70.919452	124,07	103.86	304	1688
	Río Jimenoa	19.131034	-70.626516	117,65	11.06	474	1735
3	Río Baiguate	19.084735	-70.624083	79,21	65.52	519	1747
	Río Las Palmas	19.010577	-70.577569	28,31	32.04	997	1451
4	Río Arenosito	18.980908	-70.565442	47,08	44.64	1010	1823

### 2.1.1 Tipos de suelo

Según el mapa en escala 1:5 000 000 de suelo FAO y Unesco (1976), en el área de estudio existen cuatro tipos de suelo. Dichos suelos son cambisol dístico, cambisol eutricto, nitosol dístico y ferrasol ácrico, distribuidos como se muestra en la Figura 19.

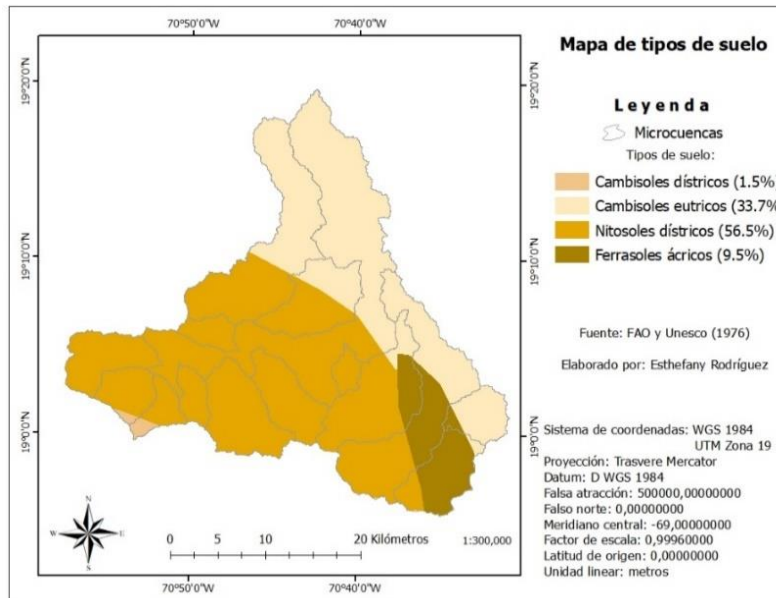


Figura 19. Tipos de suelo en el área de estudio

### 2.1.2 Capacidad productiva de los suelos

Según el mapa disponible actualmente, en la parte alta del río Yaque del Norte existen cinco clases de suelo de acuerdo con su capacidad productiva. Según un estudio realizado por BID *et al.* (2016) estas clases corresponden a los suelos II, IV, V, VI y VII; sin embargo, al observar la Figura 20 las clases de suelos identificadas a partir del mapa facilitado por MIMARENA son las siguientes: II, III, V, VI y VII.

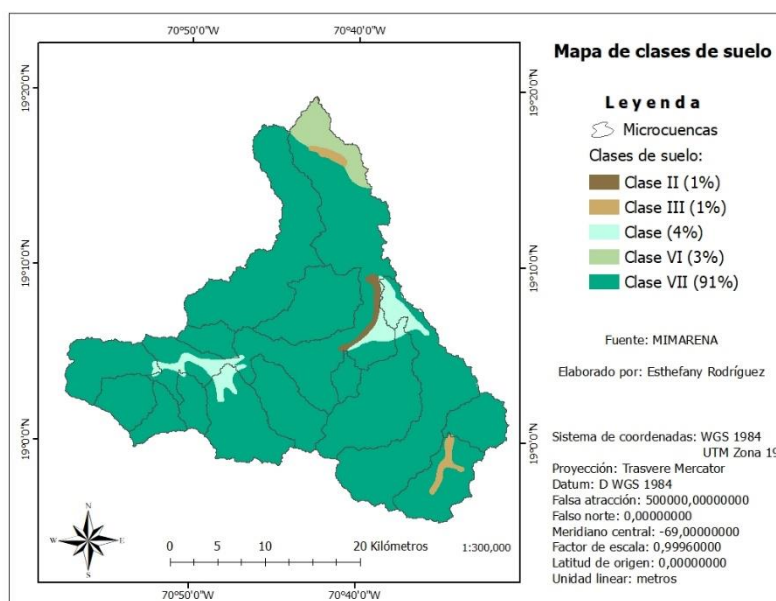


Figura 20. Capacidad productiva de los suelos en el área de estudio

En el cuadro 16 se puede observar que la clase de suelo predominante en el área de estudio es la clase de suelo VII; es decir, suelos aptos para explotación forestal. Esta clase de suelo representa el 91.34% del área total. En segundo lugar, está la clase de suelo V con un 4.08%, seguido de la clase III (0.06%), la II (0.74%) y la VI (2.78%) (Cuadro 16).

Cuadro 16. Descripción de las clases de suelo de la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte.

<b>Clase de suelo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Área (Km2)</b>	<b>Área (%)</b>
Clase II	Suelos aptos para cultivo y riego, que con un adecuado manejo tienen una productividad alta. Su topografía es llana, ondulada o suavemente alomada y con no severos factores limitantes	6.68	0.74
Clase III	Suelos aptos para cultivo y riego con cultivos muy rentables, que con prácticas intensivas de manejo alcanzan una mediana productividad. Su topografía es llana, alomada o suavemente alomada y con alguna severidad en factores limitantes.	9.63	1.06
Clase V	Suelos aptos para pasto y cultivos de arroz, con limitación de drenaje. Para los cultivos de pastos presenta una alta productividad e igual para arroz, pero con prácticas de manejo.	37.08	4.08
Clase VI	Suelos aptos para bosques, pastos y cultivos de montaña. Presentan limitaciones severas de topografía, profundidad y rocosidad.	25.23	2.78
Clase VII	Son suelos no aptos para cultivo, son aptos para fines de explotación forestal. Son terrenos escabrosos de montaña, con topografía accidentada.	829.61	91.34

Fuente: MIMARENA (2019)

## 2.2 Proceso metodológico

Luego de la modelación de escenarios de cobertura vegetal y clima se analizaron los resultados de producción de agua (WYLD mm) y erosión (SYLD t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>). Estos diferentes análisis dieron como resultado final el grado de sensibilidad en producción de agua y erosión por cada microcuenca que compone la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte. El proceso metodológico general se puede observar en la Figura 21.

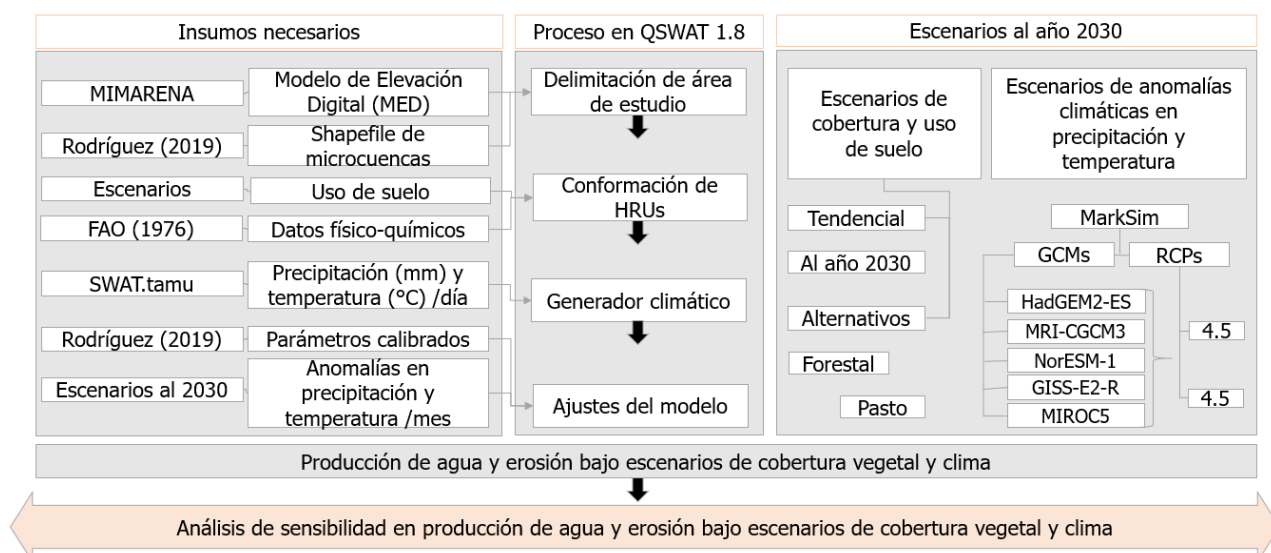


Figura 21. Proceso metodológico general

## 2.2.1 Elaboración de escenarios al año 2030

Los escenarios son descripciones de posibilidades futuras, basados en procesos causales y puntos claves para la toma de decisiones (Kahn 1967; Schwartz 2000). Por tanto, un escenario no es una predicción de un pronóstico específico; sino un retrato de un coherente futuro que describe eventos y tendencias, y cómo estas tendencias pueden evolucionar (Glenn 1999).

Para la presente investigación se realizaron 21 escenarios de producción de agua y erosión al año 2030 utilizando el modelo hidrológico SWAT. Estos escenarios son el resultado de combinaciones de tres escenarios de cobertura vegetal, cinco Modelos de Circulación Global (GCMs) y dos Trayectorias de Concentración Participativa (RCPs). Se presenta la producción de agua y erosión bajo los tres escenarios de cobertura vegetal, bajo doce escenarios climáticos y bajo seis escenarios de cobertura vegetal más anomalías climáticas.

### 2.2.1.1 Escenarios de uso y cobertura vegetal

Analizar trayectorias de cambio de uso de suelo permite mejorar los sistemas de monitoreo, así como también, entender y prevenir los efectos adversos de dichos cambios (Geist y Lambin 2002; Peña 2007; Johnson y Zuleta 2013). Los modelos hidrológicos han sido empleados para simular el impacto de las plantaciones en producción de agua, para determinar efecto en cambio de uso de tierra y para analizar los efectos en la erosión (Buytaert *et al.* 2006; Dos Santos 2018; Pokhrel 2018).

En el presente trabajo se ha analizado la producción de agua y erosión bajo tres escenarios de cobertura y uso de suelo. Dichos escenarios son uno tendencial (proyectado al año 2030) y dos alternativos (forestal y de pasto). El primer escenario se basó en los mapas de uso de suelo de 1996 y del 2012. Para los otros dos escenarios se utilizó el mapa de capacidad productiva de los suelos y el de uso actual disponible (2012). Esta información fue facilitada por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MIMARENA).



### 2.2.1.1.1 Escenario tendencial de uso y cobertura de suelo al año 2030

Se utilizó el software Dinámica EGO para elaborar una proyección de uso y cobertura de suelo a partir de la tendencia (Soares-Filho *et al.* 2009; Mendoza 2016). Además, este software se complementó con el programa FRAGSTATS 4.2.1 para calcular la variedad de métricas de paisajes (McGarigal *et al.* 2005).

Los insumos incorporados a este programa fueron cobertura de suelo del año 1996, cobertura de suelo del año 2012, distancia a caminos, distancia a poblados, áreas protegidas, modelo de elevación digital y pendiente. Todos estos mapas estaban en formato ráster, con tamaños de celda de 30 m, mismo sistema de coordenadas y polígonos que coincidían en su totalidad uno respecto del otro. Esos insumos permitieron hacer una proyección de uso y cobertura de suelo al año 2030. Para la construcción de este escenario tendencial se ejecutaron los primeros cinco pasos propuestos por Soares-Filho *et al.* (2002) (Figura 22).

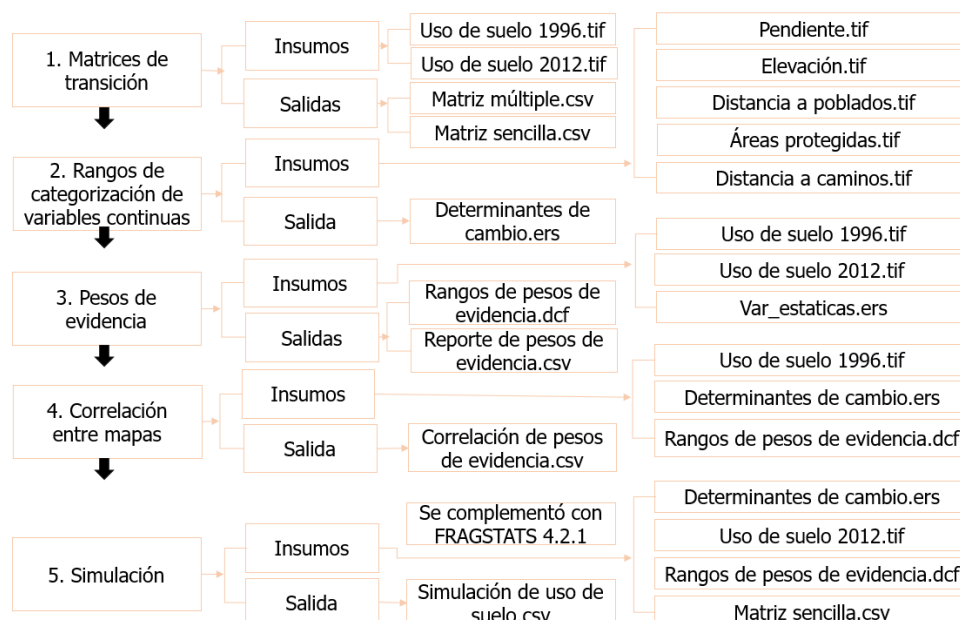


Figura 22. Procedimiento en Dinámica EGO con cada insumo y salida para la construcción del escenario tendencial de uso y cobertura de suelo en el área de estudio.

### 2.2.1.1.2 Escenarios alternativos (forestal y pasto)

#### a) Aumento de cobertura forestal (escenario forestal)

El gobierno dominicano ha realizado varias iniciativas que favorecen el sector forestal (FAO 2004; MIMARENA 2013; FAO 2014). Además, en el área de estudio se cuenta con pagos por servicios ambientales (Heindrichs 2003; Díaz 2010). Considerando lo anterior, se elaboró un posible escenario con más del 85% del territorio de la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte cubierto de bosque, lo cual es 25% de la cobertura actual.

El aumento de la cobertura boscosa se hizo de forma manual utilizando ArcGis 10.3. Los insumos fueron mapa más reciente de uso y cobertura de suelo (del año 2012) y mapa de capacidad productiva de suelos. Aquellos suelos de clase VI y VII que tenían pasto se cambiaron a bosque distribuyendo de manera aleatoria las coberturas de bosque caducifolio (FRSD), bosque siempre verde (FRSE) y bosque de coníferas (PINE).

#### b) Aumento de pasto (escenario pasto)

Se realizó un escenario contrastante al de aumento de cobertura forestal. Dicho escenario se elaboró a partir de la importancia cada vez mayor que tiene el sector ganadero de la República Dominicana (JAD 2009; FAO 2012). El aumento de pasto se hizo de la misma forma que el anterior, pero cambiando casi de forma total los bosques (FRSD, FRSE y PINE) por pasto.

### **2.2.1.2 Escenarios de cambio climático**

El cambio climático es inequívoco (IDEAM 2010). Actualmente el cambio del clima global es una gran preocupación para el hombre por las repercusiones que tiene para la sostenibilidad futura de su desarrollo tanto socioeconómico como ambiental (Arango *et al.* 2012). Los escenarios climáticos son una herramienta que permiten ofrecer información del clima futuro, basados en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas (PNUD 2011; INECC 2017). Debido a su importancia, en este estudio se analizan diversos escenarios climáticos y cómo el comportamiento de éstos afecta los recursos agua y suelo. Esto se hizo a partir de distintos Modelos de Circulación Global y con dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero: intermedio o estable (4.5) y muy alto o extremo (8.5).

#### **2.2.1.2.1 Selección de los Modelos de Circulación Global (GCMs)**

Los Modelos Climáticos Globales son una representación matemática del comportamiento atmosférico que describen principalmente flujo de masas de aire, equilibrio térmico, equilibrio hidrostático, balance energético, continuidad de aire seco y continuidad de humedad (IDEAM 2010; Ruiz 2010). Para esta modelación fueron utilizados cinco GCMs. Estos modelos fueron de los usados en la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (PNUD 2017) y que se encuentran disponibles en la plataforma MarkSim<sup>11</sup>. Los modelos fueron: GISS-E2-R, MRI-CGCM3, HadGEM2-ES, NORESM-1 y MIROC5.

#### **2.2.1.2.2 Obtención de datos de anomalías climáticas**

Los cambios en precipitación y temperatura media son elementos climatológicos que caracterizan el estado del tiempo atmosférico (Montealegre 2009). Considerando esto, se calcularon las anomalías climáticas mensuales de precipitación (mm) y temperatura (°C) para el año 2030, a partir de los cinco GCMs y de los RCPs 4.5 y 8.5. Los datos futuros de los RCPs por cada GCM se obtuvieron de la plataforma MarkSim. De manera inicial se obtuvieron 10 réplicas de cada GCM con cada RCP y 10 réplicas de datos históricos. De estas réplicas se sacó un promedio, lo que dio como resultado el valor final de precipitación y temperatura para cada GCM y para el histórico.

Los cálculos de las anomalías fueron basados en los cálculos de diferencias porcentuales propuestos por diversos autores (Espinell *et al.* 2010; Piñero 2017; Lizardo 2018). La determinación del porcentaje mensual de las variables climáticas se hizo basado en el escenario histórico. Luego de efectuados los cálculos de los GCMs se procedió a realizar un promedio de los GCMs por mes, lo que dio lugar a un sexto escenario. Finalmente, se obtuvieron 12 posibilidades de anomalías

---

<sup>11</sup> <http://gismap.ciat.cgiar.org/MarkSimGCM/>

mensuales por cada variable de clima. Los detalles de este proceso se pueden observar en la Figura 23.

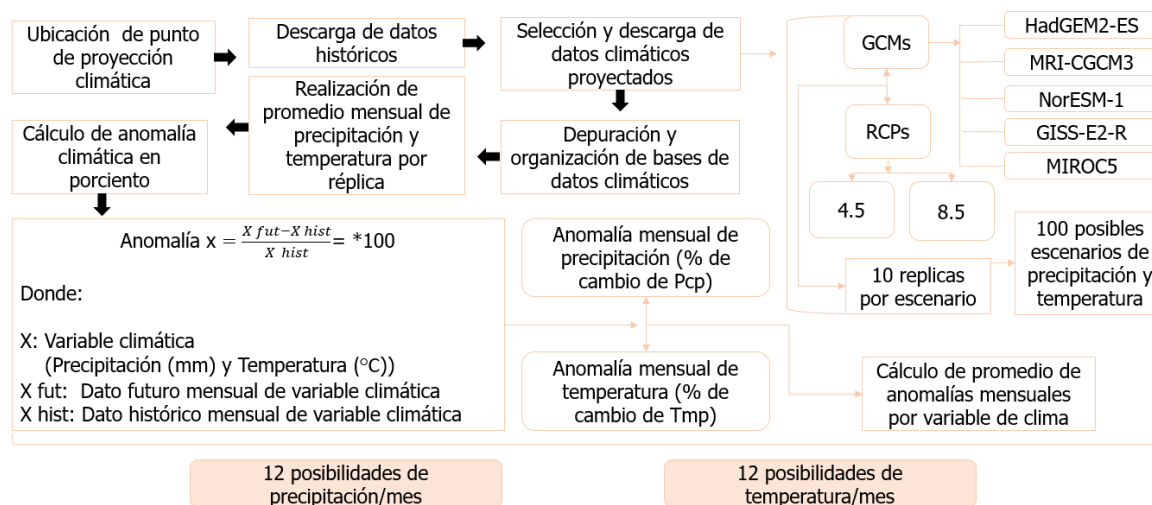


Figura 23. Procedimiento para la obtención de las anomalías mensuales de precipitación y temperatura.

### 2.2.2 Incorporación de insumos al modelo SWAT

Para SWAT se empleó lo siguiente: MED, mapa de uso y cobertura de suelo (el escenario tendencial y los alternativos), información fisicoquímica de suelo (FAO 1976) y datos climáticos diarios (precipitación (mm/día) y temperatura (°C/día)). Se emplearon los ajustes del modelo y los parámetros de calibración propuestos por Rodríguez (2019). De igual forma, se usó un modelo digital de elevación, el mapa de tipo de suelo y los datos de precipitación y temperatura. Además, se utilizaron los mapas de escenarios de uso y cobertura de suelo y se incorporaron los resultados de las anomalías climáticas a las bases de datos de subcuencas de SWAT.

### 2.3 Criterios para la comparación de producción de agua y erosión bajo escenarios de cobertura vegetal

SWAT simula la producción de agua basándose en la ecuación de balance hídrico del ciclo hidrológico. La producción de agua está compuesta principalmente por la sumatoria del flujo lateral, flujo de retorno y escorrentía superficial (Netsch *et al.* 2011). Por otro lado, SWAT modela la pérdida/erosión de suelos basándose en la producción de sedimentos por unidad de superficie (Mintegui y López 1990).

La comparación en producción de agua y erosión bajo los escenarios de cobertura y uso de suelo se realizó a partir de la tendencia al año 2030. Luego de una búsqueda sin resultados para categorizar las diferencias porcentuales en producción de agua se decidió poner como valor base 15%, por encima de ese porcentaje podría existir probabilidad de inundaciones y por debajo de eso probabilidad de sequías. Para la categorización de las diferencias de erosión se utilizó la clasificación de FAO *et al.* (1980).

### 2.3.1 Comparación basada en producción de agua

La categorización fue realizada con base en un posible cambio porcentual en precipitación expuesto por CNCCMDL *et al.* (2016). Dicho valor corresponde al 15%. Sobre el caso en el cual la diferencia porcentual entre el escenario alternativo vs. el tendencial superará el 15%; quiere decir que la microcuenca podría sufrir riesgo de inundaciones, y si por lo contrario, es inferior a -15%, podría tener riesgo de sequía (Stott *et al.* 2004). Ambos resultados quieren indicar que el escenario tendencial es mejor que el alternativo.

Si el resultado de la diferencia entre ambos escenarios (alternativo y tendencial) resultó inferior a 15% y superior -15% se consideró riesgo moderado en producción de agua bajo los escenarios de cobertura vegetal (Cuadro 17). El cálculo de la diferencia porcentual se realizó aplicando una fórmula de variación entre dos números propuesta por diversos autores (Espinell *et al.* 2010; Piñero 2017; Lizardo 2018). Esta fórmula se adaptó de la forma siguiente:

$$\text{Cambio porcentual de WYLD}_n = \frac{X \text{ esc. tend.} - X \text{ esc. alt.}}{X \text{ esc. alt.}} = *100$$

Donde:

WYLD= Producción de agua

n= Microcuenca

esc. tend. = Escenario tendencial

esc. alt. = Escenario alternativo (forestal/pasto)

Cuadro 17. Descripción de criterios de categorización de diferencia porcentual en producción de agua bajo escenarios alternativos de cobertura y uso de suelo

Color	Categorización de diferencia porcentual	Descripción
	WYLD esc. alt. >15%	Alto porcentaje de diferencia positiva entre el escenario alternativo vs. escenario tendencial. Esto implica un aumento importante en la producción de agua, lo que podría traducirse en riesgo de inundaciones (Sánchez 2018).
	-15% ≥ WYLD esc. alt. ≤ 15%	Diferencia porcentual negativa o positiva baja o nula entre escenario alternativo vs. escenario tendencial. Esto implica un moderado o inexistente riesgo por producción de agua.
	WYLD esc. alt. <-15%	Alta diferencia negativa entre escenario alternativo vs. tendencial. Esto se traduce en una disminución importante en la producción de agua y consecuentemente en la posibilidad de escasez del recurso hídrico (IDEAM 2012)

### 2.3.2 Comparación basada en erosión

Para la comparación en producción de erosión bajo escenarios de cobertura vegetal se procedió a realizar el cálculo de la diferencia en erosión del escenario alternativo (forestal o pasto)

respecto del tendencial. La categorización de la diferencia de erosión ( $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ) bajo escenarios de cobertura vegetal fue: cambio ligero (0-10), cambio moderado (10-50) y cambio alto (50-200). Esta categorización estuvo basada en la clasificación de niveles de erosión de acuerdo con FAO *et al.* (1980).

El cambio fue positivo o negativo dependiendo del resultado de la diferencia. Un resultado positivo indicó que en términos de prevención de erosión el escenario tendencial sería mejor ya que si se hacen modificaciones había mayor producción de erosión. Si por lo contrario, el resultado de la diferencia era negativo, el escenario alternativo es el más recomendado en comparación con la tendencia debido a la disminución de la erosión. En el Cuadro 18 se muestran los detalles.

Cuadro 18. Descripción de criterios de categorización de diferencia porcentual en erosión bajo escenarios alternativos de cobertura y uso de suelo

Color	Categorización de diferencia en erosión ( $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ )	Descripción
	SYLD esc. alt. $\geq 50$	Diferencia alta negativa
	$10 \geq SYLD$ esc. alt. $< 50$	Diferencia moderada negativa
	$0 \geq SYLD$ esc. alt. $< 10$	Diferencia ligera negativa
	$-10 > SYLD$ esc. alt. $< 0$	Diferencia ligera positiva
	$-50 > SYLD$ esc. alt. $\leq -10$	Diferencia moderada positiva
	SYLD esc. alt. $\leq -50$	Diferencia alta positiva

\*SYLD esc. alt.: resultado de la diferencia de erosión ( $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ) entre el escenario alternativo respecto a la tendencia.

## 2.4 Criterios para la comparación de producción de agua y erosión bajo escenarios climáticos

La comparación de producción de agua y erosión bajo escenarios climáticos se realizó a partir de las anomalías en precipitación y temperatura de cinco GCMs, y la producción de agua y erosión bajo el promedio de estos GCMs. Todas estas anomalías estuvieron bajo dos RCPs (4.5 y 8.5). Se presenta una comparación de los GCMs respecto de una línea base (Rodríguez 2019), respecto al promedio de las anomalías de los cinco GCMs y se comparan entre ellos mismos. Esta comparación fue realizada tanto para la producción de agua como para la erosión.

## 2.5 Criterios para la comparación de producción de agua y erosión bajo escenarios de cobertura vegetal y clima

Se comparó la producción de agua (a) y erosión (b) bajo escenarios de cobertura vegetal a partir de los RCPs 4.5 y 8.5. Esto se realizó ingresando a SWAT la combinación entre los escenarios de cobertura (tendencial, forestal y pasto) y las anomalías promedio en precipitación y temperatura de los cinco GCMs. Los resultados presentados son los datos (de a y b) promediados para toda la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte. Esto se hizo haciendo la sumatoria de los resultados (de a o de b) y dividiéndolos entre el número total de microcuencas (15).

### 2.5.1 Consideraciones para el análisis de sensibilidad en producción de agua

La sensibilidad ambiental es el potencial de afectación, transformación o cambio que pueden sufrir los componentes del ambiente por causa de la alteración de procesos mediante actividades antrópicas o naturales (Sandia y Henao 2008). En este caso se realizó un análisis de sensibilidad basado en los recursos agua y suelo.

El análisis de sensibilidad del recurso agua se efectuó para cada microcuenca. Esto se hizo con base en los resultados de las combinaciones del escenario tendencial de uso y cobertura de suelo con los promedios de anomalías climáticas de cinco GCMs bajo dos RCPs (4.5 y 8.5). Para realizar esta comparación se tomó como referencia una línea base (Rodríguez 2019). Se comparó la producción de agua bajo el RCP 4.5 respecto de la línea base y la producción de agua bajo el RCP 8.5 respecto de la línea base. Las diferencias porcentuales se obtuvieron aplicando la siguiente fórmula (Espinel *et al.* 2010; Piñero 2017; Lizardo 2018):

$$\text{Diferencia porcentual de } x_n = \frac{X_{RCP} - X_{Lb}}{X_{Lb}} * 100$$

Donde:

X= Variable analizada (producción de agua/ erosión)

n= Microcuenca

RCP= escenarios climáticos (4.5/8.5)

LB= Línea base

Luego de obtenidos los resultados se procedió a realizar una categorización con base en la magnitud de las diferencias porcentuales en producción de agua por cada microcuenca. Los criterios para dicha categorización fueron basados en el valor porcentual de disminución de lluvia en algunas provincias del país al 2050 (15%) planteado por CNCCMDL *et al.* (2016).

Resultados mayores o menores a 15% indicaron alta sensibilidad; es decir, que la microcuenca podría sufrir los efectos adversos negativos y presentar eventos de escasez de agua o demasiada producción de agua y posibles inundaciones. Para las categorías media y baja se dividió el máximo (15%) entre dos. Esto indicó que si los valores eran mayores o iguales a -15% y menores -7.5% o eran mayores a 7.5% y menores o iguales a 15% la sensibilidad en esa área resultó moderada. Si de manera contraria, los resultados eran valores mayores o iguales a -7.5% y menores o iguales a 7.5% el área presentó un bajo nivel de sensibilidad (Figura 24).

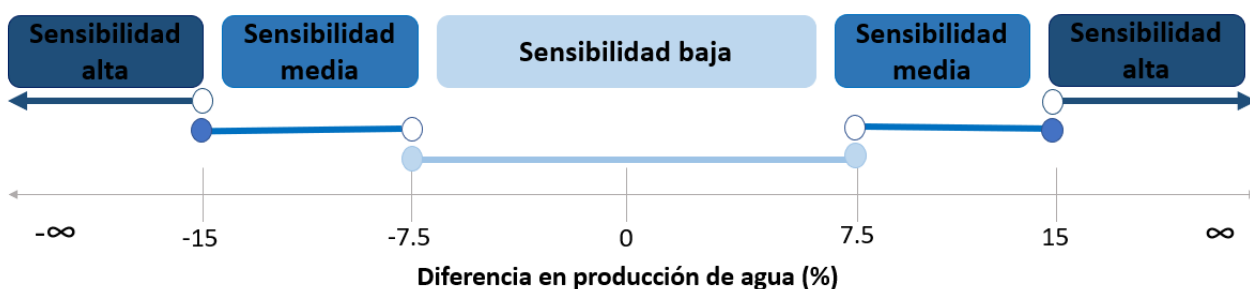


Figura 24. Categorización del grado sensibilidad de las microcuencas a partir de la diferencia porcentual en producción de agua.

En este caso no se tomó en cuenta el resultado positivo o negativo de las diferencias debido a que ambas cosas podrían generar inconvenientes. Un valor negativo indica disminución en producción de agua y por tanto posible escasez del recurso. Por otro lado, un valor positivo indica aumento en producción de agua, lo que podría generar inundaciones.

## 2.5.2 Consideraciones para el análisis de sensibilidad por erosión

Para el análisis de sensibilidad por erosión se realizó un cálculo de la diferencia en producción de erosión ( $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ) bajo los RCPs 4.5 y 8.5 respecto de una línea base. Esto se hizo a partir de los resultados de las combinaciones del escenario tendencial de uso y cobertura de suelo con los promedios de anomalías climáticas de cinco GCMs bajo los RCPs 4.5 y 8.5. La línea base empleada para comparación fue la de Rodríguez (2019).

El grado de sensibilidad de las microcuencas por erosión ( $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ) se determinó a partir de la magnitud de la diferencia entre cada escenario respecto de la línea base. La categorización se realizó a partir de la clasificación de los niveles de erosión de FAO (1980).

En el caso en el que los resultados eran mayores o iguales a -10 y menores o iguales a 10 la sensibilidad se consideró baja. Una variación mayor que 10 y menor o igual que 50 indicó una sensibilidad media negativa; si por lo contrario, era menor que -10 y mayor o igual que 50 la sensibilidad resultante fue media positiva. Por último, si el resultado era superior a 50 la sensibilidad fue alta negativa y si resultó inferior a -50 la sensibilidad fue alta positiva (Figura 25). En este caso se diferencia entre sensibilidad positiva o negativa debido a que mayores producciones de erosión indican mayores problemas con el recurso suelo y si por lo contrario existe una disminución el escenario tiene un efecto positivo sobre el suelo.

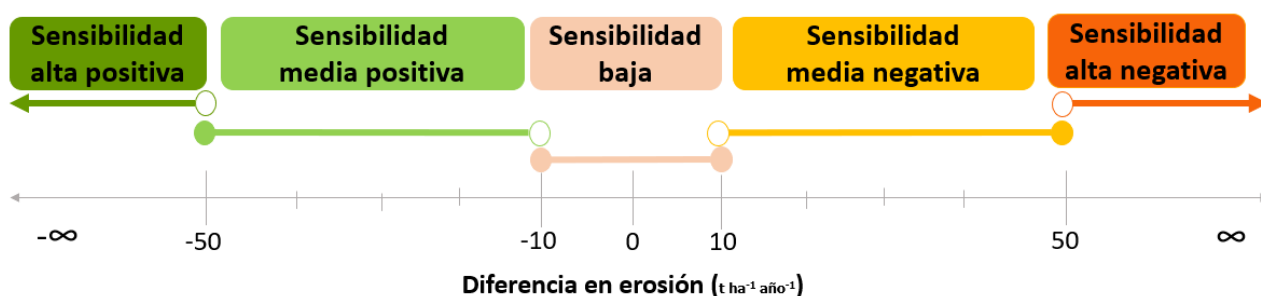


Figura 25. Categorización del grado sensibilidad de las microcuencas a partir de la diferencia en erosión ( $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ).

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Escenarios de uso y cobertura de suelo

En la República Dominicana se están realizando diversas iniciativas que favorecen la cobertura forestal (Geist y Lambin 2002; Peña 2007; Johnson y Zuleta 2013). Al observar los resultados del escenario tendencial de cobertura se evidencia que esas iniciativas podrían dar resultados positivos para dicho sector al año 2030. Por otro lado, la importancia cada vez mayor de los sectores forestal y ganadero podría dar lugar a dos escenarios alternativos contrastantes. Estos escenarios se pueden ver en la Figura 26, donde se muestran el uso actual, el escenario tendencial al año 2030 y los escenarios alternativos forestal o de pasto.

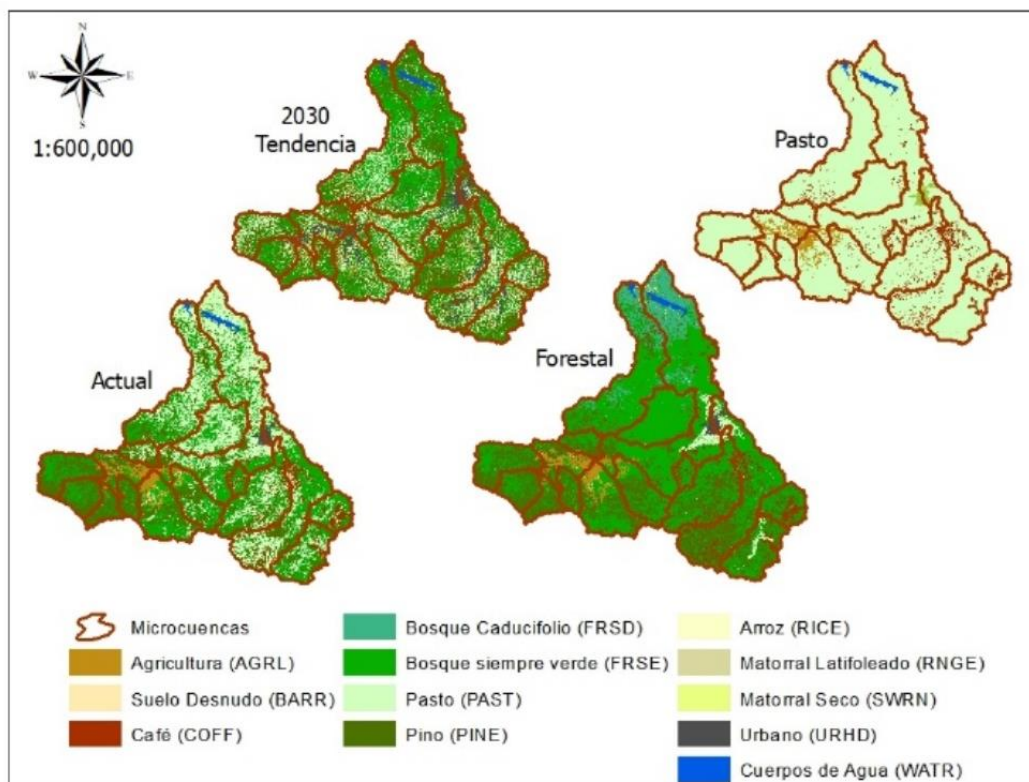


Figura 26. Escenarios de uso y cobertura de suelo en la sección alta de la cuenca del río Yaqué del Norte, República Dominicana

### 3.1.1 Comparación de escenarios de uso y cobertura de suelo

Como se observa en la Figura 27, la sección alta de la cuenca del río Yaqué del Norte cuenta con una importante área de cobertura forestal (FRSD, FRSE y PINE). Esta cobertura de suelo aumenta a un 62.3% con el escenario tendencial y a un 88.6% con el escenario de aumento de cobertura y se convierte en 0.0% con el escenario de aumento de pasto. El segundo uso más importante es el de pasto, el cual pasa de 31.9% a 22.3% en el escenario tendencial, disminuye a 2.0% (18.51 km<sup>2</sup>) en el escenario forestal y aumenta a 90.7% (824.30) en el escenario que favorece este uso de suelo.

Otro uso relevante de suelo en el área de estudio es el café, el cual representa más del 4.5% del área de estudio en todos los escenarios. El cultivo de café se encuentra ampliamente difundido en los países de América Latina y el Caribe (Brasil, México, Perú, República Dominicana, Colombia, Costa Rica, Honduras, El Salvador, Guatemala y Nicaragua) (Magrin *et al.* 2014).

En cuarto lugar, según la cantidad de área que ocupa, se encuentra el uso agrícola el cual se mantiene en aproximadamente 3% en todos los escenarios. Es recomendable una agricultura conservacionista, ya que esta resulta apropiada para enfrentar la variabilidad y el cambio del clima debido a que esta práctica contribuye a la adaptación y a la escasez de agua, especialmente en zonas áridas y semiáridas (Delgado *et al.* 2011; Scopel *et al.* 2013; Alvarez *et al.* 2013). Finalmente, los cuerpos de agua identificados en la zona ocupan apenas un 0.6%, manteniéndose en todos los escenarios. En el 0.4% restante del área (42.5 km<sup>2</sup>) se encuentran distribuidos los demás usos.



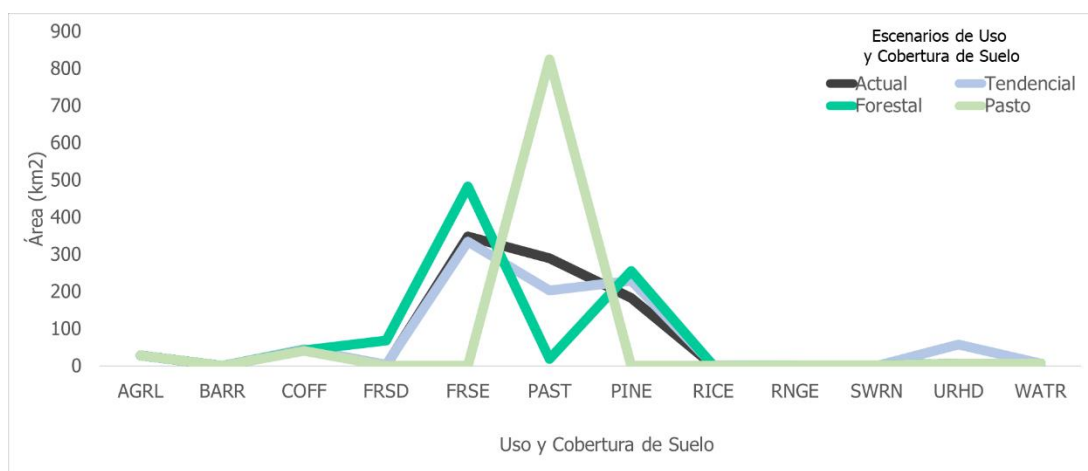


Figura 27. Comparación de la extensión de las principales categorías de uso y cobertura de suelo actual, tendencial y escenarios alternativos.

Entre el 2005 y el 2010 la región de Centroamérica y América del Sur ha tenido un 69% de la deforestación mundial (Brasil, Bolivia, Venezuela, Argentina, Honduras, Nicaragua, y Guatemala) y en otros países (Costa Rica, El Salvador, Panamá, Chile y Uruguay) la cobertura forestal ha aumentado (Magrin *et al.* 2014). La República Dominicana también ha aumentado su cobertura forestal en los últimos años, y tiene actualmente más del 50% de su territorio cubierto de bosque (FUNGLODE 2012; Félix 2019).

En el escenario tendencial el mayor cambio porcentual positivo ocurrió en el uso urbano, el cual aumentó en 785.42%. Este valor representa 8.85 veces más que las áreas urbanas del escenario actual. El uso con menos variación en este escenario fue el de cuerpos de agua (0.22%). Por otro lado, el bosque caducifolio fue el que obtuvo mayor cambio porcentual positivo en el aumento de cobertura forestal, alrededor de 70 veces más que en el uso actual, y el de mayor cambio negativo fue el de pasto que disminuyó en un 93.62% respecto de la actualidad. Finalmente, el cambio porcentual forestal en el escenario a favor de la cobertura de pasto disminuyó en un 100%; mientras que el pasto aumentó en un 184.15% (Cuadro 19).

Cuadro 19. Comparación de la extensión de cada categoría de cobertura y uso de suelo en escenarios tendencial y alternativos respecto del uso actual.

Categoría	Actual (A)	Tendencial (B)	Forestal (C)	Pasto (D)	% de Cambio B vs. A	% de Cambio C vs. A	% de Cambio D vs. A
AGRL	28.02	28.16	27.94	27.75	0.52	-0.26	-0.95
BARR	0.13	0.18	0.12	0.12	39.33	-7.34	-9.96
COFF	42.5	44.52	41.46	40.8	4.74	-2.45	-4.01
FRSD	0.97	2.80	67.96	0.00	190.43	6,942.34	-100.00
FRSE	347.80	334.19	481.97	0.00	-3.91	38.58	-100.00
PAST	290.0	202.45	18.51	824.30	-30.21	-93.62	184.15
PINE	182.90	228.65	254.61	0.00	25.01	39.2	-100.00
RICE	0.19	0.94	0.19	0.17	396.15	-1.69	-10.04
RNGE	2.03	2.26	1.88	1.68	11.73	-7.26	-17.21
SWRN	1.51	0.84	1.46	1.39	-44.70	-3.67	-7.74
URHD	6.43	56.90	6.45	6.43	785.42	0.33	0.08
WATR	5.76	5.78	5.79	5.78	0.22	0.43	0.26

### 3.2 Producción de agua a partir de escenarios de cobertura vegetal

Al estimar la producción de agua bajo diferentes escenarios de cobertura vegetal se identificó una diferencia casi nula en los promedios anuales. Con el escenario tendencial y el aumento de cobertura forestal se obtuvo una ganancia promedio de agua de 0.3% respecto de la línea base, y de manera contraria con el escenario de aumento de pasto se obtuvo una disminución promedio anual de 0.4%.

Con el escenario tendencial la microcuenca que más ganancia de agua obtuvo fue la Jimenoa 28 mm más que en la línea base. Al aumentar la cobertura forestal esta microcuenca resultó beneficiada con apenas un 0.2%, pues donde más aumentó la producción de agua con este escenario fue en la microcuenca Arroyo Frío (67 mm). Al aumentar la cobertura de pasto y reducir de manera drástica la cobertura forestal todas las microcuencas presentaron pérdidas en producción de agua. La microcuenca que resultó más afectada con este cambio fue la del Río Las Palmas y la menos afectada Arroyo El Cercado.

#### 3.2.1 Comparación de producción de agua por microcuenca bajo escenarios de cobertura vegetal

La diferencia en producción de agua se mantiene por debajo del 5% bajo los escenarios forestal y de pasto respecto de la línea base. Lo que coincide con lo expuesto por diversos autores (Villegas 2004; Velásquez y Jaramillo 2009; FAO 2013), la cantidad de agua disponible no depende de la vegetación; sino de la cantidad de agua precipitada. El grado de afectación por la disminución del agua dependerá del uso al que se destina el recurso hídrico y de su gestión (Monforte y Cantú 2009; Fernández 2012; Blázquez 2015; Magi 2017). Para este estudio se consideró una variación baja de producción de agua a partir de escenarios de cobertura vegetal (Cuadro 20).

Cuadro 20. Categorización de la cantidad de agua producida en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte por escenario de uso y cobertura de suelo

O r d e n	Microcuenca	Producción de agua (mm) por escenario de Cobertura Vegetal				
		Escenario tendencial	Escenario forestal	Cambio porcentual respecto del tendencial	Escenario de pasto	Cambio porcentual respecto del tendencial
1	Alta del río Yaque del Norte	1813	1822	-0.42%	1815	-0.88%
2	Arroyo Los Tablones	1787	1781	-0.31	1771	-0.87%
	Arroyo Arraiján	1781	1777	-0.21	1766	-0.83%
	Arroyo Los Guanos	1789	1790	0.04%	1781	-0.46
	Arroyo Frío	1763	1828	3.73%	1751	-0.66
	Arroyo Sigua	1762	1781	1.11	1751	-0.61
	Arroyo Grande	1775	1778	0.19	1771	-0.19
	Arroyo Los Dajaos	2815	2813	-0.06%	2804	-0.38
	Arroyo El Cercado	1842	1762	-4.33%	1825	-0.90
	Río Yujo	1775	1767	-0.48%	1759	-0.91
Río Guanajuma	1803	1799	-0.2%	1790	-0.72	

	Río Jimenoa	1837	1813	-1.31%	1831	-1.94
3	Río Baiguat	1836	1815	-1.18%	1806	-1.68
	Río Las Palmas	2803	2793	-0.36%	2779	-0.85
4	Río Arenosito	2848	2834	-0.29%	2821	-0.97
Existe un bajo cambio porcentual en producción de agua en ambos escenarios alternativos respecto de la tendencia $-15\% \geq \text{WYLD esc. alt.} \leq 15\%$ .						

El aumento de cobertura forestal en algunos casos no fue favorable en relación con la disponibilidad de agua, como es el caso de la microcuenca de Arroyo El Cercado. Los escenarios de aumento de cobertura forestal y de pasto provocaron una disminución en la producción de agua respecto del escenario tendencial (-4% y -1%). Como se aprecia, la disminución en producción de agua es menor en el escenario de pasto que en el forestal.

Lo anterior podría significar que gran cantidad del agua precipitada se encuentra almacenada en la vegetación (78%) (Bruijnzeel 2001; Miligan y Burki 2005; Rojas y Gutiérrez 2012). Esto porque la escorrentía superficial se disminuye en más de un 80%, pero el flujo lateral y agua subterránea aumentan poco (1.82% y 3.16%). Mientras que en esta microcuenca en el escenario tendencial se distribuyen casi de forma equitativa los tipos de bosque. En el escenario forestal el bosque siempre verde es 16 veces más que las áreas cubiertas por pino, lo que supone mayor retención de agua (FAO 2002b; NCYT 2013).

Por otro lado, el cambio de bosque por pasto provocaría una disminución en producción de agua en todas las microcuencas, con bajos porcentos de cambios respecto del tendencial (1% o menos). Cuando se cambia bosque por pasto en un área la disminución de lluvia puede ser hasta de 8% (Bruijnzeel 2004), lo que significa que la producción de agua también puede disminuir.

### 3.3 Erosión a partir de escenarios de cobertura vegetal

Al cubrir de pasto casi por completo la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte, aumentaría la pérdida de suelo por erosión hídrica en aproximadamente un 89% en comparación con la línea base. De igual forma, si se continúan haciendo las cosas como hasta el momento (escenario tendencial), la erosión podría aumentar alrededor de un 73%, probablemente por el aumento en un 785.4% de las zonas urbanas respecto de la actualidad, así como también aumentaría la cantidad de suelos desnudos (39%) y el uso agrícola (1%). Lo contrario ocurriría si se cubre de bosque el 89% del área. La erosión se reduciría en un 13% aproximadamente (Figura 28).

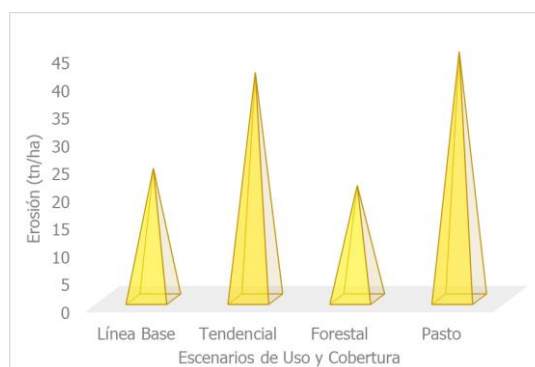


Figura 28. Producción de erosión en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte a partir de diferentes escenarios de cobertura vegetal

Existen varios estudios los cuales evidencian que los bosques disminuyen la erosión de los suelos (Sarrailh 1990; Lal 1990; Villegas 2004; Díaz 2011; FAO 2015), tal como resultó en este estudio. Por otro lado, la deforestación sobre pastoreo e inadecuado uso de la tierra puede causar problemas de erosión y llegar a afectar la economía del lugar (FAO 1993; IGAC 2014). Sin embargo, si a los pastizales se les aplican buenas prácticas la erosión podría reducirse de manera importante (FAO 2002; Senra 2009; Piedra *et al.* 2017).

### 3.3.1 Comparación de erosión bajo escenarios de cobertura vegetal

Al comparar el escenario alternativo forestal con el escenario tendencial existe una disminución en producción de erosión en 14 de 15 microcuencas. Con el escenario forestal el 84% del área de estudio tendría cambio positivo de moderado a alto, un 14% percibiría cambio positivo bajo y apenas en el 2% del área de estudio el cambio sería negativo bajo.

Por otro lado, al contrastar el escenario de pasto con el escenario tendencial, el 65% del territorio sufriría cambios negativos de bajo a moderado. Sin embargo, el 35% tendría cambio positivo de moderado a alto. Es decir, que en algunos casos (Río Guanajuma, Río Jimenoa, Río Arenosito y Río Las Palmas) el escenario de pasto es mejor que la tendencia (Cuadro 21).

Cuadro 21. Categorización de la cantidad de agua producida en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte por escenario de uso y cobertura de suelo

Orden	Microcuenca	Erosión (t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> ) por escenario de Cobertura Vegetal				
		Escenario tendencial	Escenario forestal	Diferencia respecto a tendencial	Escenario de pasto	Diferencia respecto a tendencial
1	Alta del río Yaque del Norte	35	21	-14	41	6
2	Arroyo Los Tablones	23	17	-6	55	32
	Arroyo Arraiján	26	18	-8	39	13
	Arroyo Los Guanos	36	19	-17	62	26
	Arroyo Frío	14	11	-3	36	22
	Arroyo Sigua	15	17	2	37	22
	Arroyo Grande	23	19	-4	43	20
	Arroyo Los Dajaos	51	27	-27	72	21
	Arroyo El Cercado	16	11	-5	43	27
	Río Yujo	23	12	-11	26	3
	Río Guanajuma	49	15	-34	34	-15
3	Río Jimenoa	55	20	-35	28	-27
	Río Baiguatè	33	14	-19	34	1
4	Río Las Palmas	112	35	-77	51	-61
	Río Arenosito	102	52	-50	69	-33
Cambio alto positivo						
Cambio moderado positivo						
Cambio bajo positivo						
Cambio moderado negativo						
Cambio bajo negativo						

Estudios demuestran que la ampliación de zonas urbanas provoca erosión por causa antropogénica (García 2008; Raffino 2019), por lo cual, la principal razón por la que incluso el escenario de pasto es mejor que el tendencial es que en este último las áreas urbanas son 9 veces más que en los escenarios alternativos. En las cuatro microcuencas, donde con el pasto la erosión

es menor que con el escenario tendencial, se distribuye alrededor del 40% de las áreas urbanas del uso y cobertura de suelo al año 2030.

La degradación de suelos compromete grandes extensiones en América Latina: en Paraguay (16,4%), en Perú (15,3%) y en Ecuador (14,2%). Guatemala es el país con mayor proporción de tierras degradadas de Centroamérica (58,9% del territorio), en segundo lugar, se encuentra Honduras (38,4%) y luego le sigue Costa Rica (29,5%) (Magrin *et al.* 2014). Esta tendencia de degradación de suelos podría revertirse si se promueven prácticas de manejo sostenible y uso de tecnologías adecuadas (FAO 2015b).

### **3.4 Anomalías climáticas al año 2030**

A pesar de que se han comparado dos escenarios contrastantes (4.5 y 8.5), las diferencias en precipitación y temperatura no han sido tan notorias. En términos de precipitación se espera un comportamiento que va desde +10% en el escenario optimista (4.5) hasta un -5% en el extremo (8.5). Por otro lado, bajo ambos escenarios se espera que la temperatura aumente. Bajo un RCP 4.5 la tendencia es a aumentar entre 4% y 6%, mientras que bajo el RCP 8.5 se espera que aumente entre 5%-7%.

#### **3.4.1 Anomalías mensuales en precipitación**

Con el escenario de RCP 4.5, bajo cinco GCMs, las precipitaciones aumentarán en promedio un 10% al año 2030 en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte. Basado en los resultados de las anomalías climáticas, el mes en el cual se podría percibir un aumento de lluvias en más de un 65% sería febrero, mientras que en noviembre se percibiría un cambio negativo en precipitaciones disminuyendo éstas en un 12%.

Por otro lado, bajo el escenario de RCP 8.5 se aprecia una variación porcentual negativa respecto del comportamiento histórico del agua precipitada (-5%). El cambio climático existente en algunas zonas hace más extremos eventos de sequía (Campillo 2018). Bajo este escenario climático el mes en el cual se percibiría más esta disminución de lluvia sería julio; sin embargo, para los tres primeros meses del 2030 bajo un escenario de clima extremo se espera una variación porcentual positiva.

Analizando los modelos de circulación global bajo el RCP 4.5 en el que se percibe mayor aumento de las lluvias anuales es en el MRI-CGCM3 con más de un 50% y donde se muestra menos cambio respecto del comportamiento histórico de las lluvias es en el modelo MIROC5 (0.64%). Bajo el escenario 8.5 la precipitación disminuiría más bajo el modelo MRI-CGCM3 (-14%) y aumentaría 9% en promedio anual bajo el modelo HadGEM-ES. El comportamiento de las precipitaciones mensuales para ambos escenarios climáticos se puede observar en la Figura 29.

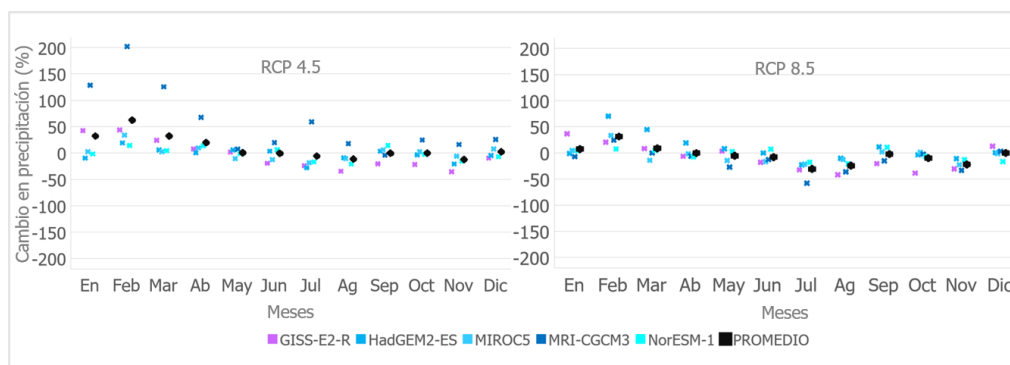


Figura 29. Cambio porcentual de precipitación mensual al año 2030 bajo el RCP 4.5 (izquierda) y 8.5 (derecha) en el área de estudio.

### 3.4.2 Anomalías mensuales en temperatura

En los dos escenarios de aumento de emisiones de gases de efecto invernadero (RCPs 4.5 y 8.5), utilizados en esta investigación, se prevé un aumento de las temperaturas promedio mensuales al año 2030. Bajo el RCP 4.5 las temperaturas aumentarían entre 4% (NorESM-1) y 7% (HadGEM2-ES). El mismo comportamiento, pero con el límite inferior y superior más alto (5%-7%), se presenta bajo el RCP 8.5. En ambos escenarios es probable que en el mes en el cual se perciba más este cambio sea diciembre, y en mayo cuando menos varíe (Figura 30).

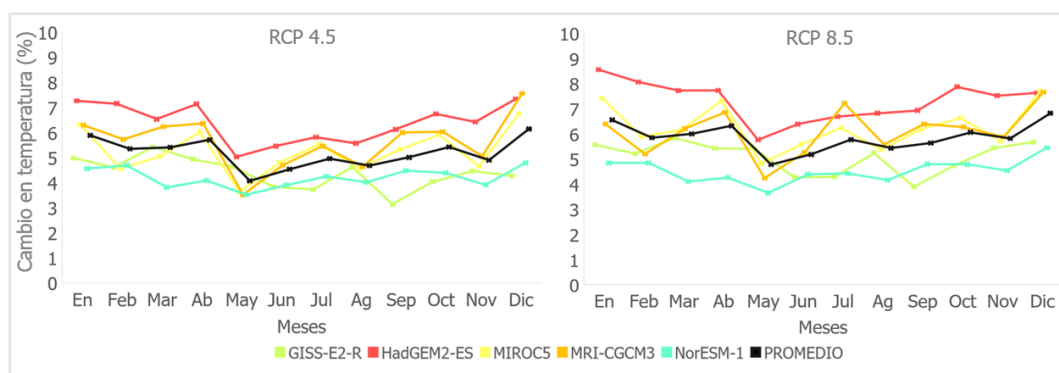


Figura 30. Cambio porcentual de temperatura mensual al año 2030 bajo el RCP 4.5 (izquierda) y 8.5 (derecha) en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana

El incremento de temperatura ha sido un aspecto muy estudiado y comprobado (IPCC 2007c). La temperatura promedio global aumentará entre 1,5 y 4,5 °C (IHoffert y Covey 1992; Bárcena y Scheelje 2003; Chen y Tung 2007). Se espera que en Colombia la temperatura promedio aumente de 1°C al año 2040 (Armenta *et al.* 2014). Por otra parte, los más alarmistas exponen que la temperatura podría llegar hasta más arriba de los 6°C (Díaz 2013), lo cual se evidencia en el presente estudio (RCP 8.5). En ambos escenarios la temperatura promedio podría ser superior a la actual en 5% al año 2030.

## 3.5 Producción de agua y erosión bajo escenarios climáticos

### 3.5.1 Producción de agua bajo escenarios climáticos

Bajo el RCP 4.5 la mayor producción de agua ocurre con el GCM MRI-CGCM3 (3,222 mm), de manera contraria la menor producción de agua ocurre con el GCM NORESM-I (1,640 mm). Por

otro lado, con el RCP 8.5 el modelo con el que se obtuvo mayor producción de agua fue con el GCM HadGEM2-ES (2,256 mm) y la producción más baja ocurrió bajo GCM GISS-E2-R (1,704 mm).

Al ingresar los promedios de las anomalías se observa que sí se recoge la información de todos los modelos, pero como son tan dispersos no queda clara la variabilidad de estos. Bajo el RCP 4.5 la producción promedio anual de agua es 1,993 mm y bajo el RCP 8.5 es de 1,914 mm.

En todos los escenarios se muestra una similitud con el comportamiento de la línea base. Los picos más altos de producción de agua bajo los RCPs 4.5 y 8.5 ocurren en las microcuencas Río Arenosito (3,029 y 2,564 mm), Río Las Palmas (2,973 y 2,510 mm) y Arroyo Grande (2,946 y 1,727 mm). Mientras que los picos más bajos ocurren en las microcuencas Arroyo Frío (2,044 y 1,725 mm) y Arroyo Sigua (1,725 y 1,726 mm) (Figura 31).



Figura 31. Producción de agua en las microcuencas que componen la sección alta de la cuenca del río Yaque de Norte, bajo cinco GCMs y los RCP 4.5 (izquierda) y 8.5 (derecha)

### 3.5.2 Erosión bajo escenarios climáticos

Al analizar el escenario de cambio climático estable (4.5) con el GCM que se obtienen mayores pérdidas de suelo es el MRI-CGCM3 ( $186 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) y con el que menos erosión se estimó fue GISS-E2-R ( $44 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). La producción de erosión bajo el RCP 8.5 es mayor en NORESM-I ( $121 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) y es menor con el escenario GISS-E2-R ( $123 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ).

La erosión promedio en la sección alta del río Yaque del Norte sería  $73 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (RCP 4.5) y  $56 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (RCP 8.5). Los picos más altos de erosión ( $\text{t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) bajo los RCPs 4.5 y 8.5 ocurren en las microcuencas Río Arenosito (218 y 173), Río Las Palmas (144 y 116), Alta del río Yaque del Norte (133 y 93) y Río Guanajuma (125 y 87). Por otro lado, los picos más bajos de erosión se obtuvieron en las microcuencas Arroyo El Cercado (17 y 13) y Arroyo Frío (23 y 19) (Figura 32).



Figura 32. Erosión en las microcuencas que componen la sección alta de la cuenca del río Yaque de Norte, bajo cinco GCMs y los RCPs 4.5 (izquierda) y 8.5 (derecha).

### 3.6 Producción de agua bajo escenarios de cobertura vegetal y clima

En la Figura 33 se evidencia que la producción de agua bajo el escenario 8.5 es menor que bajo el 4.5. En el escenario 4.5 la mayor producción de agua se obtiene bajo los escenarios tendencial y forestal (1,981 mm) y la menor con el escenario de pasto (1,888 mm). Por otro lado, y contrario a lo anterior, bajo el RCP 8.5 la mayor producción de agua ocurre bajo el escenario pasto (1,721 mm). La producción de agua en el escenario forestal es muy parecida al tendencial (1,622 mm y 1,617 mm).

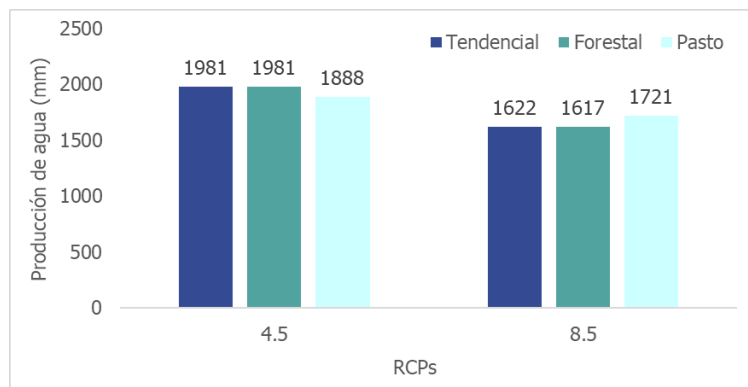


Figura 33. Producción de agua a partir de distintos escenarios de cobertura de suelo y bajo los RCPs 4.5 y 8.5

La disminución en producción de agua se proyecta también en gran parte del territorio de México, pues se prevé una menor disponibilidad de agua y aumento de las condiciones de sequía. Esta situación aunada al aumento poblacional incrementará la sobreexplotación del agua superficial y subterránea, disminuyendo los niveles de las fuentes acuíferas. En la zona de México se esperan reducciones del 35-40% en las lluvias en algunas épocas del año (principalmente en verano), lo supone una disminución del recurso (Romero-Lankao *et al.* 2014).

### 3.7 Erosión bajo escenarios de cobertura vegetal y clima

En ambos escenarios de RCPs (4.5 y 8.5) la mayor cantidad de erosión ocurre en los suelos cubiertos mayormente por pasto, 293 y 215% más que en el escenario tendencial. La menor cantidad de erosión ocurre en los cubiertos por aproximadamente un 89% de bosque, 46% menos que en el escenario tendencial en ambos escenarios de clima. Para los tres escenarios de



cobertura y uso de suelo la mayor cantidad de erosión ocurre bajo el RCP 4.5, probablemente porque bajo el escenario 8.5 se prevé una disminución de producción de agua, y por tanto también de erosión (Figura 34).

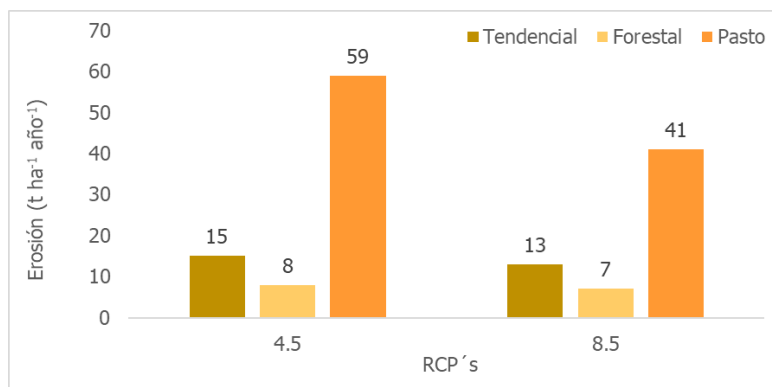


Figura 34. Erosión a partir de distintos escenarios de cobertura de suelo y bajo los RCPs 4.5 y 8.5

### 3.8 Sensibilidad en producción de agua y erosión hídrica a partir de escenarios de cobertura vegetal y clima

#### 3.8.1 Sensibilidad en producción de agua

La diferencia promedio en producción de agua al año 2030 bajo el RCP 4.5 es de -1% y, con el escenario 8.5 la disminución sería de un 19%. Con el RCP 4.5 no se espera ningún cambio en producción de agua para el 26% del territorio (Arroyo Los Tablones, Arroyo El Cercado, Río Jimenoa y Río Baiguato). Por otro lado, con el RCP 8.5 se prevé una disminución de en producción de agua de hasta 20% (río Yujo).

Bajo un escenario tendencial de cobertura y uso de suelo y un escenario de clima estable (4.5) todas las microcuencas que componen el área de estudio presentan un bajo grado de sensibilidad. Por otro lado, bajo el mismo escenario de cobertura y un escenario de clima extremo (8.5) la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte presenta sensibilidad alta (Figura 35).

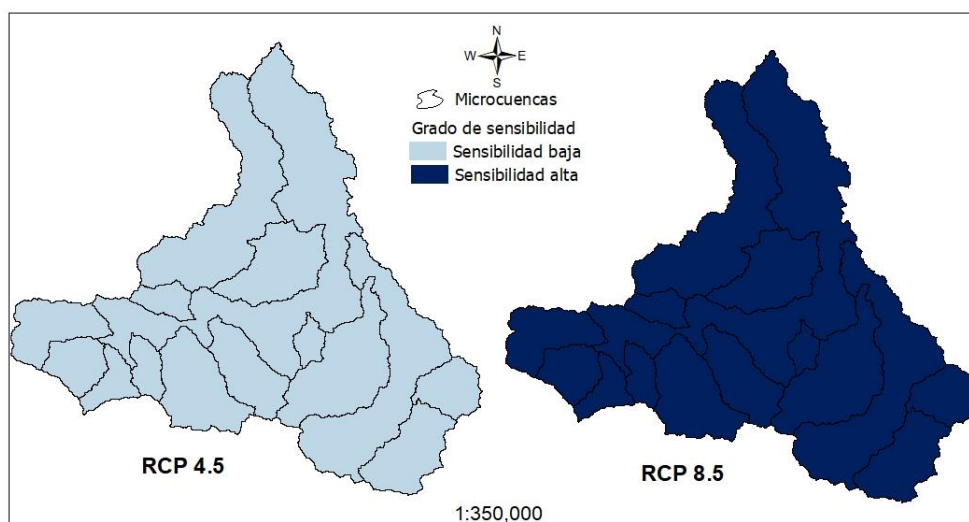


Figura 35. Grado de sensibilidad en producción de agua de las microcuencas del área de estudio bajo los RCPs 4.5 (izquierda) y 8.5 (derecha)

El cambio de clima podría generar desabastecimiento de agua para consumo humano (Ruiz 2013). Alrededor de la quinta parte de países del mundo tendrán agudos recortes del suministro de agua en el año 2040. El déficit de agua puede aumentar de 40% a 70% en 2040 en países como Estados Unidos, China e India. (Aqua 2016).

La disminución del recurso hídrico también se percibe en países como México y Colombia (Romero-Lankao *et al.* 2014; Pabón 2010). Wang *et al.* (2014) exponen que en los últimos años se han observado episodios fuertes de sequías. En zonas de América del Sur de Europa y Asia ha aumentado la sequía de 16% en 1902-1949 hasta 41% en 1950-2000. Con el escenario RCP 8.5 se prevé una reducción del 10% en precipitaciones, con rangos de -25% hasta +10% en Centroamérica (Magrin *et al.* 2007; Magrin *et al.* 2014), en este estudio el resultado de la producción de agua de 19%.

### 3.8.2 Sensibilidad a la erosión hídrica

Con los escenarios de cambio climático se espera una disminución promedio en erosión de entre -8% (RCP 4.5) hasta -11% (RCP 8.5). El mayor cambio positivo ocurre en las microcuencas Río Yujo, Río Guanajuma y Arroyo Los Guanos, y la menor variación ocurre en Arroyo Los Tablones, Arroyo Arraiján, Arroyo Los Dajaos, Río Jimenoa, Río Las Palmas y Río Arenosito. En el resto de las microcuencas las diferencias porcentuales en disminución de erosión se encuentran más cercanas al promedio.

Con el RCP 8.5 y el escenario tendencial de uso y cobertura de suelo se prevé una disminución moderada de erosión en aproximadamente el 75% del territorio (sensibilidad media positiva). El 25% restante del territorio tiene una sensibilidad baja, con aumentos de erosión inferiores a 10 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Este grado de sensibilidad lo perciben las microcuencas ubicadas en la parte más alta del área de estudio (Figura 36).

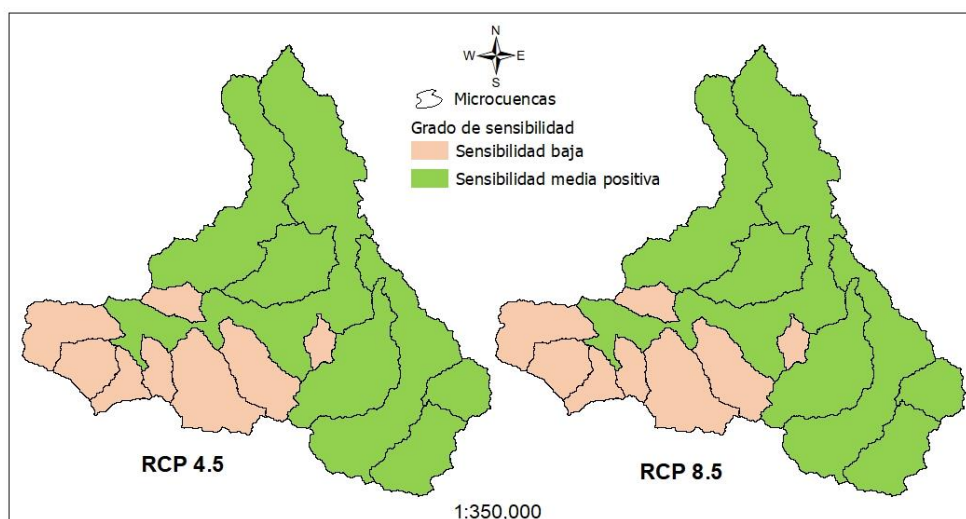


Figura 36. Grado de sensibilidad por erosión de las microcuencas del área de estudio bajo los RCPs 4.5 (izquierda) y 8.5 (derecha)

La lluvia es uno de los factores de clima que más influyen sobre la erosión (FAO 2000). La ocurrencia de lluvias torrenciales podría provocar deslizamientos de tierra. El aumento de las lluvias y la reducción de la evapotranspiración por el cambio del uso del suelo podría provocar un

importante aumento en la escorrentía superficial y consecuentemente ocasionar problemas ecológicos y de erosión (Magrin *et al.* 2014).

### 3.9 Priorización de microcuencas

Luego de la identificación y delimitación de microcuencas es necesario seleccionar las prioritarias, considerando que no siempre es posible intervenir en todas las microcuencas (FAO 2007). Las prioridades podrían variar según el objetivo y las limitaciones identificadas en las áreas, en este caso el criterio de priorización es la erosión de suelos (FAO 2007; Martínez y Reyes 2007; Benegas y León 2009). Se identificó un ligero aumento de erosión en ocho microcuencas, las cuales son consideradas como prioritarias para implementar prácticas de manejo de suelos. Estas microcuencas son Arroyo Arraiján, Arroyo El Cercado, Arroyo Frío, Arroyo Grande, Arroyo Los Dajaos, Arroyo Los Guanos, Arroyo Los Tablones y Arroyo Sigua (Figura 37).

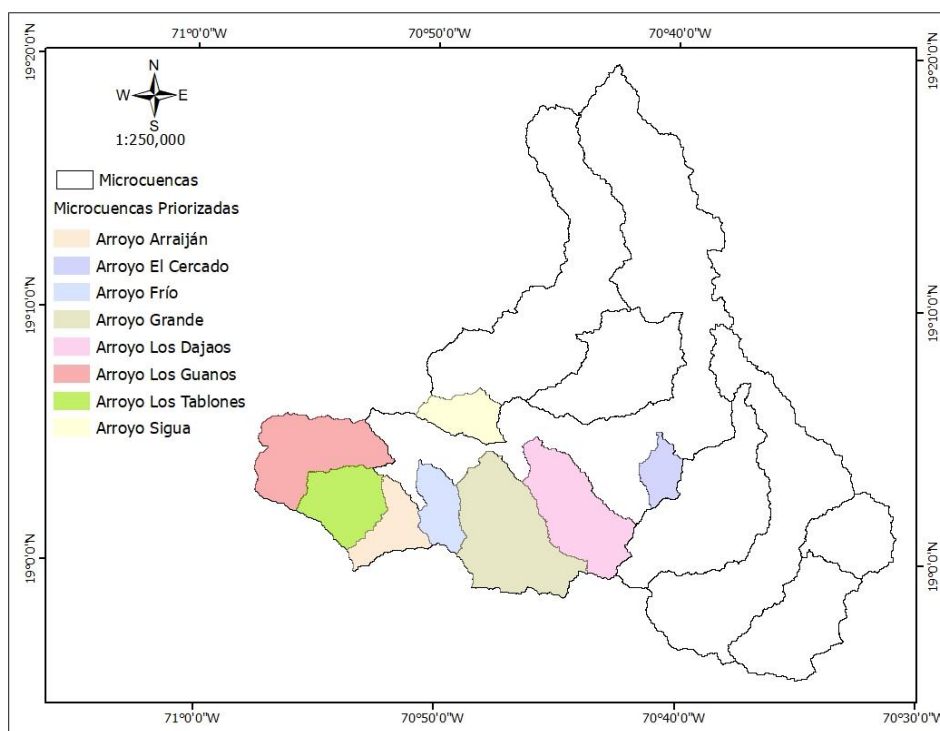


Figura 37. Microcuencas prioritarias de acuerdo con los escenarios de erosión.

## 4. CONCLUSIONES

- A pesar de que se aumentó la cobertura forestal en la sección alta de la cuenca del río Yaque de Norte, esto no significó un cambio favorable en producción de agua para algunas microcuencas respecto de la tendencia. Esto probablemente está relacionado con los criterios para aumentar o no dicha cobertura. Mientras que para el escenario tendencial se consideró la pendiente, elevación, áreas protegidas y otros parámetros. Para el escenario forestal se distribuyeron al azar los bosques sólo considerando la capacidad productiva de suelos y el uso de suelo actual.
- La pérdida de cobertura forestal implicaría una disminución en producción de agua en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte respecto del escenario tendencial. Al aumentar las zonas de pasto ocurriría lo mismo.

- La diferencia porcentual entre los escenarios tendencial y los alternativos es inferior al 5%. Por tal razón, se esperaría que no existan mayores problemas vinculados a escasez de agua o posibles inundaciones al realizar cambios de usos y coberturas de suelo.
- Por otra parte, un aumento en cobertura forestal favorecería la práctica de conservación de suelo y una disminución de dicha cobertura causaría problemas de erosión hídrica. En este caso la cantidad de erosión producida por unidad de superficie depende en gran medida de la cobertura vegetal.
- Al observar el comportamiento de los GCMs en cuanto a producción de agua y erosión se refiere, existen datos muy dispersos y un rango muy amplio de lo que podría suceder, lo cual amplía el nivel de incertidumbre de esta modelación. Ello resulta más marcado en erosión que en producción de agua.
- Bajo un escenario de clima extremo (RCP 8.5), la producción de agua sería menor que bajo un escenario de clima moderado (RCP 4.5). Lo mismo ocurre con la erosión.
- Al combinar los escenarios climáticos con la tendencia de cobertura de suelo se esperaría mayor producción de agua y erosión bajo el escenario 4.5 y menores cantidades bajo el 8.5. Significa entonces que un cambio extremo de clima al año 2030 afectaría la disponibilidad del recurso agua, pero beneficiaría el recurso suelo.
- Bajo un RCP 8.5 la producción de agua disminuiría de manera moderada en todas las microcuencas (promedio 18%), lo cual indica un mismo grado de sensibilidad. De igual forma, bajo el RCP 8.5 se disminuye la erosión (promedio 17%) y que resulta favorable. La diferencia en disminución de erosión es baja, pero con un rango más amplio que en producción de agua; por lo tanto, es posible categorizar por grado de sensibilidad.

## 5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda emplear al menos un mapa adicional para validar los resultados de Dinámica Ego y luego del proceso de validación hacer el escenario tendencial.
- A pesar de tener escenarios contrastantes de cobertura y uso de suelo la diferencia en producción de agua es mínima. Por tal razón es sugerido replicar la presente investigación empleando información más detallada sobre los tipos de suelo.
- La categorización de los usos de suelo es muy amplia, por lo que es preciso hacer un análisis de dichos empleos para una posterior reclasificación.
- Debido a que en el área de estudio la producción de agua no es un problema (61% de las precipitaciones), se recomienda analizar los componentes de la producción de agua por separado.
- Adoptar políticas y medidas para mitigar los efectos del cambio climático es una iniciativa viable para afrontar la modificación de las tendencias de las emisiones de gases de efecto invernadero.

## 6. LITERATURA CITADA

- Álvarez, C; Quiroga, A; Santos, D; Bodrero, M. 2013. Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción. Ediciones INTA. 170 p.
- Alonso, S; Del Mar, M; Alonso, C; Gómez, I; Urban, S; Genovés, A; Gómez, JC. 2015. Análisis de vulnerabilidad al cambio climático del municipio de Valencia (en línea). España. 115 p. Consultado 24 de mayo 2019. Disponible en [https://www.valencia.es/ayuntamiento/-Energias.nsf/0/D821C1942870B9D1C1257F5B002F1D00/\\$FILE/An%C3%A1lisis\\_vulnerabilidad\\_20150325.pdf?OpenElement&lang=1](https://www.valencia.es/ayuntamiento/-Energias.nsf/0/D821C1942870B9D1C1257F5B002F1D00/$FILE/An%C3%A1lisis_vulnerabilidad_20150325.pdf?OpenElement&lang=1).
- Arango, C; Dorado, J; Guzmán, D; Ruíz, JF. 2012. Cambio climático más probable para Colombia a lo largo del siglo XXI respecto al clima presente (en línea). 38 p. Consultado 21 de jun. 2019. Disponible en <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Escenarios+Cambio+Climatico+%28Ruiz%2C+Guzman%2C+Arango+y+Dorado%29.pdf/fe5d64fb-3a82-4909-a861-7b783d0691cb>.
- Armenta, G; Dorado, J; Rodríguez, A; Ruiz, J. 2014. Escenarios de cambio climático para precipitación y temperaturas en Colombia (en línea). IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). Colombia. 274 p. Consultado 24 de jun. 2019. Disponible en <http://modelos.ideam.gov.co/media/dynamic/escenarios/escenarios-rcp-2014.pdf>.
- Aqua. 2016. Una quinta parte del planeta sufrirá la falta de agua en el 2040 (en línea). Madrid, España. Consultado 23 de jun. 2019. Disponible en <https://blog.securibath.com/2016/03/23/falta-de-agua-en-2040/>.
- Barry, R; Chorley, R. 2003. Atmosphere, Weather, and Climate (online). Routledge Taylor & Francis Group. New York. 8 ed. Available at [.http://theeye.eu/public/WorldTracker.org/Geology/Atmosphere%2C%20Weather%20and%20Climate%208th%20ed%20%20R.%20Barry%2C%20R.%20Chorley%20%28Routledge%2C%202003%29%20WW.pdf](http://theeye.eu/public/WorldTracker.org/Geology/Atmosphere%2C%20Weather%20and%20Climate%208th%20ed%20%20R.%20Barry%2C%20R.%20Chorley%20%28Routledge%2C%202003%29%20WW.pdf).
- Benegas, L; León, J. 2009. Criterios para priorizar áreas de intervención en cuencas hidrográficas (en línea). CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). No. 378. 60 p. Consultado 1 de jul. 2019. Disponible en <https://www.catie.ac.cr/attachments/-article/542/CriteriosParaPriorizar%20Cuencas.pdf>.
- Bernabides, H; León, G. 2007. Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático (en línea). IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). Subdirección de Meteorología. Nota técnica. Colombia. 102 p. Consultado 23 de mayo 2018. Disponible en <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf/7fabbbd2-9300-4280-befe-c11cf15f06dd>.
- BM (Banco Mundial). 2010. Desarrollo y cambio climático (en línea). Panorama general: un nuevo clima para el desarrollo. Washington, DC. 60 p. Consultado 23 de mayo 2019. Disponible <http://siteresources.worldbank.org/INTWDR2010/Resources/52876781226014527953/Overview-Spanish.pdf>.
- Blázquez, A. 2015. El problema no es la falta de agua, sino su mala gestión (en línea). El país. Consultado 23 de jun. 2019. Disponible en [https://elpais.com/elpais/2015/03/20/-planeta\\_futuro/1426855527\\_122774.html](https://elpais.com/elpais/2015/03/20/-planeta_futuro/1426855527_122774.html).
- BLI (BirdLife International). 2019. Important Bird Areas factsheet: Armando Bermudez National Park (en línea). Consulted 20 de jun. 2019. Disponible en <http://datazone.birdlife.org/>

- site/factsheet/armando-bermudez-national-park-iba-dominican-republic.
- Bruijnzeel, S. 2001. Hidrología de las plantaciones forestales (en línea). 59 p. Consultado 22 de jun. 2019. Disponible en [http://origin.portalces.org/sites/default/files/references/052\\_Bruijnzeel-%201997%20hidrologia%20de%20plantaciones.pdf](http://origin.portalces.org/sites/default/files/references/052_Bruijnzeel-%201997%20hidrologia%20de%20plantaciones.pdf).
- Bruijnzeel, S. 2004. Los Bosques Tropicales y los Servicios Ambientales: ¿Acaso los árboles impiden ver el Terreno? (en línea). Ámsterdam, Holanda. 45 p. Consultado 21 de jun. 2019. Disponible en [http://www.ccmss.org.mx/descargas/los\\_bosques\\_tropicales\\_y\\_los\\_servicios\\_ambientales\\_acaso\\_los\\_arboles\\_impiden\\_ver\\_el\\_terreno.pdf](http://www.ccmss.org.mx/descargas/los_bosques_tropicales_y_los_servicios_ambientales_acaso_los_arboles_impiden_ver_el_terreno.pdf).
- Buytaert, W; Célleri, R; De Bièvre, B; Iñegues, V. 2006. The impact of pine plantations on water yield: a case study from the Ecuadorian Andes. 3rd Internacional Symposium on Integrated Water Management, Bochum, Germany.
- Caballero, M; Lozano, S; Ortega, B. 2007. Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. UNAM (Universidad Autónoma de México). Revista Digital Universitaria. Vol. 8. No. 10. 11 p. Consultado 23 de mayo 2019. Disponible en [http://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/oct\\_art78.pdf](http://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/oct_art78.pdf).
- CAF (Banco de Desarrollo de América Latina). 2014. Índice de vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en la región de América Latina y el Caribe (en línea). s.l., s.e. 212 p. Consultado 31 de jul. 2018. Disponible en <http://www2.iadb.org/intal/catalogo/PE/2014/15019es.pdf>.
- Campillo, S. 2018. El gran problema al que se enfrenta el planeta es el problema del agua (en línea). México. Consultado 23 de jun. 2019. Disponible en <https://www.xataka.com/medicina-y-salud/el-gran-problema-del-agua>.
- Chen, X. and K. K. Tung: "Global surface warming enhanced by weak Atlantic overturning circulation", Nature. No. 559. Pp 387-391. Consulted on jun. 23 2019. Available at <https://amath.washington.edu/research/publications/globalwarmingandatlanticoverturning-circulation>.
- CNCCMDL (Consejo Nacional para el Cambio Climático y Mecanismo de Desarrollo Limpio); MIMARENA (Ministerio de Medioambiente y Recursos Naturales); PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2016. Plan Nacional de Adaptación para el cambio climático en la República Dominicana 2015-2030 (PNACC RD): un país resiliente al cambio climático (en línea). República Dominicana. 81 p. Consultado el 24 de mayo 2019. Disponible en <http://www.fundacionplenitud.org/files/PNACC.pdf>.
- Delgado, J.A., P. M. Groffman, M. A. Nearing, T. Goddard, D. Reicosky, R. Lal, N. R. Kitchen, C. W. Rice, D. Towery, and P. Salon (2011), Conservation practices to mitigate and adapt to climate change. Journal of soil and water conservation. July/August 2011-VOL. 66, No. 4, 118A-129A.
- Delgado, D; Finegan, B; Martin, M; Acosta, M; Carrillo, F; Hernández, T; Bejarano, L; Nieto, V; Lara, D; Ribalaygua, J. 2016. Análisis de vulnerabilidad al cambio climático de bosques de montaña en Latinoamérica: un punto de partida para su gestión adaptativa. Serie técnica. Informe técnico no. 406. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 55 p. Consultado 22 de mayo 2019. Disponible en [http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8496/Analisis\\_de\\_la\\_vulnerabilidad.pdf](http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8496/Analisis_de_la_vulnerabilidad.pdf).
- Díaz, C. 2011. Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de cobertura convencionales, no convencionales y revegetación (en línea). Vol. 31. No. 3. Pp 80-90.

- Consultado 21 de jun. 2019. Disponible en <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v31n3/v31n3a09.pdf>.
- Díaz, R. 2010. «Mecanismo de pago por servicios ambientales en la cuenca del río Yaque del Norte en la República Dominicana (en línea). 11 p. Consultado 21 de jun. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/forestry/19399-088fc1002c11aea5c4a6d38d181d8f696.pdf>.
- Díaz, J. 2013. De la sensibilidad climática y de la variabilidad climática (en línea). Consultado 21 de jun. 2019. Disponible en <https://jdiaz474.wordpress.com/2013/01/31/de-la-sensibilidad-climatica-y-de-la-variabilidad-natural/>.
- Dos Santos, V., Laurent, F., Abe, C., y Messner, F. (2018). Hydrologic Response to Land Use Change in a Large Basin in Eastern Amazon. *Water*, (10)429. doi:10.3390/w10040429.
- Espinel, M; Bruno, A; Placencia, I. 2010. La comparación de porcentajes de variación en situaciones cotidianas (en línea). *UNIÓN. Revista Iberoamericana de Educación Matemática*. . No. 4. Pp 83-102. Consultado 20 de jun. 2019. Disponible en [http://www.fisem.org/www/union/-revistas/2010/24/Union\\_024\\_010.pdf](http://www.fisem.org/www/union/-revistas/2010/24/Union_024_010.pdf).
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1993. Erosión de suelos en América Latina (en línea). Santiago, Chile. Consultado 22 de jun. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/3/t2351s/T2351S00.htm#Contents>.
- FAO. 2000. Los principales factores ambientales y de suelos que influyen sobre la productividad de los suelos (en línea). 7 p. Consultado 23 de jun. 2019. Disponible en <https://www.uv.mx/-personal/tcarmona/files/2010/08/FAO-2000.pdf>.
- FAO. 2002. Las buenas prácticas agrícolas (en línea). 7 p. Consultado 22 de jun. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/ag/esp/revista/faogapes.pdf>.
- FAO. 2002b. Bibliografía anotada sobre los efectos ambientales, sociales y económicos de los eucaliptos (en línea). Roma, Italia. Consultado 23 de jun. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/3/y7605s04.htm#TopOfPage>.
- FAO. 2004. Perfil forestal de la República Dominicana (en línea). 7 p. Consultado 21 de jun. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/forestry/14342045a886da3ccdad3f7a3c5667-401c936d3.pdf>.
- FAO. 2007. Guía metodológica para el manejo participativo de microcuencas (en línea). Guatemala. 76 p. Consultado 7 de jul. 2019. Disponible en [https://coin.fao.org/coin-static/cms/media/3/12647138247290/guia\\_manejo\\_microcuencas.pdf](https://coin.fao.org/coin-static/cms/media/3/12647138247290/guia_manejo_microcuencas.pdf).
- FAO. 2012. República Dominicana destina fondos para el sector agropecuario (en línea). El Caribe. Consultado 21 de jun. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/inaction/agronoticias-/detail/es/c/509510/>.
- FAO. 2013. Captación y almacenamiento de agua de lluvia: opciones técnicas para América Latina y El Caribe (en línea). Santiago de Chile. 272 p. Consultado 23 de jun. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/3/i3247s/i3247s.pdf>.
- FAO. 2014. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015: informe nacional de República Dominicana (en línea). Roma. 81 p. Consultado 21 de jun. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-az202s.pdf>.
- FAO. 2015. Los bosques y suelos forestales contribuyen de manera esencial a la producción agrícola y la seguridad alimentaria mundial (en línea). Consultado 21 de jun. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/285875/>
- FAO. 2015b. Los suelos están en peligro, pero la degradación puede revertirse (en línea). Roma. Consultado 23 de jun. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/news/story/es/-item/357165/icode/>.

- FAO. 2019. The State of the World's Biodiversity for Food and Agriculture. J. Bélanger & D. Pilling (eds.). FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture Assessments. Rome. 572 p. Available at <http://www.fao.org/3/CA3129EN/CA3129EN.pdf>.
- Félix, Y. 2019. La cobertura boscosa del país aumentó a 51% (en línea). El Día. Santo Domingo, República Dominicana. Consultado 22 de jun. 2019. Disponible en <https://eldia.com.do/la-cobertura-boscosa-del-pais-aumento-a-51/>.
- Fernández, A. 2012. El agua: un recurso esencial (en línea). CETA (Instituto Centro Transdisciplinario). Química Viva. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 25 p. Consultado 23 de jun. 2019. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/863/863-25090002.pdf>.
- Fernández, J. 2018. Cambios en la atmósfera que afectan el equilibrio de la Tierra (en línea). Universidad de Navarra. Diario Navarra. España. Consultado 23 de mayo 2019. Disponible en [https://www.google.com/search?q=universidad+de+Navarra&rlz=1C1CHBF\\_enCR849-CR849&oq=universidad+de+Navarra&aqs=chrome..69i57j69i60j0l4.4905j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.com/search?q=universidad+de+Navarra&rlz=1C1CHBF_enCR849-CR849&oq=universidad+de+Navarra&aqs=chrome..69i57j69i60j0l4.4905j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8).
- FUNGLODE. 2012. La República Dominicana aumenta su cobertura boscosa a 39.7% (en línea). Consultado 22 de jun. 2019. Disponible en <http://www.funglode.org/notice/republica-dominicana-aumenta-su-cobertura-boscosa-a-39-7/>.
- García, E. 2008. El proceso de expansión urbana y su impacto en el uso de suelo y vegetación del municipio de Juárez, Chihuahua (en línea). Tijuana, México. 155 p. Consultado 23 de jun. 2019. Disponible en <https://www.colef.mx/posgrado/wp-content/uploads/2009/10/TEISIS-Garcia-Estarron-Erika-Julieta.pdf>.
- Geist, H.J.; Lambin, E.F. 2002. Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation Tropical forests are disappearing as the result of many pressures, both local and regional, acting in various combinations in different geographical locations. Bioscience Vol. 52. No. 2. Pp 143-150.
- Glenn, C. 1999. Futures research methodology. Millennium Project. United Nations University. Washington, United State. No. 8 35 p.
- Guzmán, L. 2009. El cambio climático, causas, consecuencias y la reducción de riesgos de desastres de Cruz Roja Costarricense (en línea). Cruz Roja Costarricense. Centro del clima. Costa Rica. 89 p. Consultado 23 de mayo 2019. Disponible en <https://www.bvs.sa.cr/ambiente/3897.pdf>.
- Heindrichs, T. 2003 Pagos por Servicios Ambientales (PSA) en PROCARYN: concertar fondos nacionales e internacionales para la conservación de los recursos hídricos de la República Dominicana (en línea). Santo Domingo, República Dominicana. 10 p. Consultado 21 de jun. 2019. Disponible en [http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP\\_FaoRlc/old/prior-recnat/foro/heindrichs2.pdf](http://www.fao.org/tempref/GI/Reserved/FTP_FaoRlc/old/prior-recnat/foro/heindrichs2.pdf).
- Hoffert, M; Covey, C. 1992. Deriving global climate sensitivity from palaeoclimate reconstructions. Nature. Non. 360. Pp 573-576. Consulted on jun. 21 2019. Available at <https://www.nature.com/articles/360573a0>.
- Ibárcena, M; Scheelje, J. 2003. El cambio climático: principales causantes, consecuencias y compromisos de los países involucrados (en línea). Consultado 21 de jun. 2019. Disponible en <http://www.fao.org/3/XII/0523-B2.htm>.
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2010. Generación de escenarios de cambio climático regionales y locales a partir de modelos globales: guía para tomadores de decisiones (en línea). Bogotá, Colombia. 17 p. Consultado 21 de jun. 2019. Disponible en <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gu%C3%ADa+Escenarios+para+Tomadores+de+Decisiones.pdf/fa7abe38-43cc-49c8-96a3-f2b5c24ecce3>.



- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2012. Sequía meteorológica en Colombia: incidencia y tendencias (en línea). Subdirección de Meteorología. 49 p. Consultado 21 de jun. 2019. Disponible en <http://www.ideam.gov.co/documents/21021-/21138/Sequias+Incidencias+y+Tendencias.pdf/3e72c86c-cf4a-42f9-95f1-07e7cf88861a>.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2014. Rocas, pastos y erosión por el ganado, características de los suelos de la Providencia y Santa Catalina (en línea). Bogotá, Colombia. Consultado 22 de jun. 2019. Disponible en <https://noticias.igac.gov.co/es/contenido/rocas-pastos-y-erosion-por-el-ganado-caracteristicas-de-los-suelos-de-providencia-y-santa>.
- INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). Escenarios de cambio climático (en línea). México. Consultado 21 de jun. 2019. Disponible en <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/escenarios-de-cambio-climatico-80126>.
- IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático). 2007a. Climate Change 2007. Síntesis Report. Panel Intergubernamental del Cambio Climático. Valencia, España. 52p.
- IPCC (Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático). 2007b. Cambio Climático 2007: Base de ciencia física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC. New York, United States of America, Cambridge University Press.
- IPCC - The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007c: AR4 (Fourth Assessment Report): Climate Change 2007, The Physical Science Basis. Cambridge University Press. New York, USA.
- IPCC (Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático). 2014. Cambio climático 2014: informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs. Consultado 23 de mayo 2019. Disponible en [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf).
- IPS (Inter Press Service). 2019. Extinción de especies amenaza salud y alimentación humanas. Panamá. Consultado 23 de mayo 2019. Disponible en <http://www.ipsnoticias.net/2019/05/extincion-especies-amenaza-salud-alimentacion-humanas/>.
- Izzo, M; Rathe, L; Arias, D. 2013. Informe Reporte Final Puntos Críticos para la Vulnerabilidad a la Variabilidad y Cambio Climático en la República Dominicana y su Adaptación al mismo. (en línea). Santo Domingo, República Dominicana. 1 ed. 392 p. Consultado 2 de jun. 2018. Disponible en [http://pdf.usaid.gov/pdf\\_docs/PA00JJ3J.pdf](http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA00JJ3J.pdf).
- JAD (Junta Agroempresarial Dominicana). 2009. Estrategia para el desarrollo agropecuario agroindustrial sostenible de la República Dominicana 2010-2030: diagnóstico sector agropecuario (en línea). 257 p. Consultado 21 de jun. 2019. Disponible en <http://www.competitividad.org.do/wp-content/uploads/2009/01/DIAGNOSTICO-SECTOR-AGROPECUARIO.pdf>.
- Johnson, B.G.; Zuleta, G.A. 2013. Land-use land-cover change and ecosystem loss in the Espinal ecoregion, Argentina. *Agriculture*, 18 Colegio de Geógrafos del Perú Dinámica Ego: una herramienta gratuita para modelar y brindar soporte en el análisis de CCUS ecosystems & environment 181: 31-40.
- Kahn, Herman, and Weiner, Anthony J. *The Year 2000: A Framework for Speculation on the Next Thirty-Three Years*. New York.
- Magi, L. 2017. Cada gota cuenta en el norte de África (en línea). *El País*. Roma. Consultado 23 de jun. 2019. Disponible en [https://elpais.com/elpais/2017/07/05/planeta\\_-futuro/1499237782\\_415999.html](https://elpais.com/elpais/2017/07/05/planeta_-futuro/1499237782_415999.html).

- MAGRAMA (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente). 2015. Cambio climático: impactos, adaptación y vulnerabilidad. Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC. Grupo de trabajo II. España. 58 p. Consultado 23 de mayo 2019. Disponible en [https://www.miteco.gob.es/es/cambioclimatico/publicaciones/publicaciones/cambioclimatic\\_oimpactosadaptacionyvulnerabilidadgt2ar5\\_tcm30-177778.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/cambioclimatico/publicaciones/publicaciones/cambioclimatic_oimpactosadaptacionyvulnerabilidadgt2ar5_tcm30-177778.pdf).
- Magrin, G., C. Gay García, D. Cruz Choque, J.C. Giménez, A.R. Moreno, G.J. Nagy, C. Nobre, and A. Villamizar (2007), Latin America. In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Parry, M.L., O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, and C.E. Hanson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 581-615.
- Magrin, G.O., J.A. Marengo, J.-P. Boulanger, M.S. Buckeridge, E. Castellanos, G. Poveda, F.R. Scarano, and S. Vicuña (2014), Central and South America. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1499-1566.
- Marshall, N; Marshall, P; Tamelander, J; Obura, D; Malleret-King, D; Cinner, J. 2010. A framework for social adaptation to climate change sustaining tropical coastal communities and industries. Gland, Switzerland, IUCN.
- Martínez, M; Reyes, V. 2007. Criterios para la priorización y selección de cuencas. Programa de comunicaciones WWF Centroamérica. Guatemala. 36 p.
- McGarigal, K; Cushman, S; Regan, C. 2005. Quantifying terrestrial habitat loss and fragmentation: a protocol (online). University of Massachusetts. 115 p. Consulted on jun. 21 2019. Available at [https://www.fs.fed.us/rm/pubs\\_journals/2005/rmrs\\_2005\\_mcgarigal\\_k001.pdf](https://www.fs.fed.us/rm/pubs_journals/2005/rmrs_2005_mcgarigal_k001.pdf)
- Mendoza, V. 2016 Dinámica EGO: una herramienta gratuita para modelar y brindar soporte en el análisis de CCUS (en línea). Vol. 3. 21 p.
- Mercado, Y. 2018. Análisis de la vulnerabilidad a la variabilidad climática de los medios de vida productivos agrícolas de los pequeños productores en el municipio de Tisma, corredor seco de Nicaragua. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). Economía, desarrollo y cambio climático. Turrialba, Costa Rica. 119 p.
- Metternicht, G; Sabelli, A; Spensley, J. 2014. Climate change vulnerability, impact and adaptation assesmen. *International Journal of Climate Change Strategies and Management* 6:442-476.
- MIMARENA. 2013. Guía para la apertura de brigadas de reforestación (en línea). Viceministerio de Recursos Forestales. República Dominicana. 36 p. Consultado 21 de jun. 2019. Disponible [https://www.academia.edu/4884915/Gu%C3%ADa\\_para\\_la\\_apertura\\_de\\_brigadas\\_de\\_reforestaci%C3%B3n.\\_Plan\\_Nacional\\_Quisqueya\\_Verde\\_R.D](https://www.academia.edu/4884915/Gu%C3%ADa_para_la_apertura_de_brigadas_de_reforestaci%C3%B3n._Plan_Nacional_Quisqueya_Verde_R.D)
- MIMARENA (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2019. Suelos (en línea). Capacidad productiva de suelos. Consultado 28 de febrero 2019. Disponible en <https://ambiente.gob.do/suelos/>
- Mintegui, J; López F. 1990. La Ordenación Agrohidrológica en la planificación. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 306 p.
- Monforte, G; Cantú, P. 2009. Escenario de agua en México. *Culcyt. Recursos hídricos*. No. 30. Pp 31-40.

- Montealegre, JE. 2009. Estudio de variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala (en línea). IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). Bogotá, Colombia. 54 p. Consultado 22 de jun. 2019. Disponible en <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Estudio-de-la-variabilidad-clim%C3%A1tica-de-la.pdf/643c4c0e-83d7-414f-b2b4-6953f64078d3>.
- Mulligan, M and Burke, S.M. (2005) FIESTA Contribución de la Interceptación de la niebla a la producción hídrica en áreas tropicales Reporte Técnico Final, una contribución de KCL/AMBIOTEK a DFID FRP R7991. Mark Mulligan and Sophia Burke.
- NCYT (Noticias de la Ciencia y la Tecnología). Árboles que usan sus hojas para absorber agua (en línea). Amazings. Consultado 23 de jun. 2019. Disponible en <https://noticiadelaciencia.com/art/6169/arboles-que-usan-sus-hojas-para-absorber-agua>.
- Neitsch, SL., Williams, JR., Arnold, JG., Kiniry, JR. 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas, United States of America, Texas Water Resources Institute. 618 p.
- Lal, R. 1990. Soil erosion and land degradation: the global risks. Adv. In Soil Sci.11:129-172
- Lizardo, G. 2019. Cómo calcular la tasa de crecimiento o el cambio porcentual (en línea). Consultado 20 de jun. Disponible en <https://www.geniolandia.com/13710787/como-calcular-la-tasa-de-crecimiento-o-el-cambio-porcentual>.
- ONE (Oficina Nacional de Estadísticas). 2010. Datos georreferenciados (en línea). El portal de las estadísticas dominicanas. Santo Domingo, República Dominicana. Consultado 24 de jun. 2019. Disponible en <https://www.one.gob.do/informaciones-cartograficas/shapefiles>.
- Oswaldo, H; León, G. 2007. Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático (en línea). IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). Subdirección de Meteorología. Colombia. Consultado 23 de mayo 2019. Disponible en <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf/7fabbbd2-9300-4280-befe-c11cf15f06dd>.
- Pabón, D., 2010: Informe de evaluación del Cambio Climático en Colombia. Universidad Nacional de Colombia y Conservación Internacional. Bogotá, Colombia.
- Peña, J. 2007. Efectos ecológicos de los cambios de coberturas y usos del suelo en la Marina Baixa (Alicante). University of Alicante, Alicante, Spain. Pp 539.
- Piedra, L; Orozco, M; Ramírez, F; Castillo, M; Morales, V; Luna, S. 2017. Manual de buenas prácticas ambientales para la producción ganadera en el Refugio Nacional de Vida Silvestre del Colado, Costa Rica (en línea). 27 p. Consultado 22 de jun. 2019. Disponible en <http://www.sinac.go.cr/ES/partciudygober/Documents/MAPCOBIO/Manual%20de%20Buenas%20Pr%C3%A1cticas%20Ambientales%20para%20la%20producci%C3%B3n%20ganadera%20el%20RNV%20BCGS%20Final.pdf>.
- Piñero, D. 2017. Cómo calcular variación entre dos números (en línea). Consultado 21 de jun. 2019. Disponible en <http://www.danielpinero.com/como-calcular-variacion>.
- PLENITUD (Fundación Plenitud); CCCCC (Caribbean Community Climate Change Centre); CNCCMDL (Consejo Nacional para el Cambio Climático y Mecanismo de Desarrollo Limpio); MA (Ministerio de Agricultura); UE (Unión Europea). Estrategia Nacional de Adaptación al Cambio Climático en el Sector Agropecuario de la República Dominicana 2014-2020 (en línea). Santo Domingo, República Dominicana. 122 p. Consultado 23 de ago. 2018. Disponible en <http://fundacionplenitud.org/files/NASAP%20%20esp%20final%20pdf.pdf>.
- PNUD. 2011. Formulando escenarios de cambio climático para contribuir con estrategias de desarrollo adaptadas al clima: una guía para practicantes (en línea). 72 p. Consultado 21

- de jun. 2019. Disponible en [https://www.undp.org/content/dam/undp/library/Environment-%20and%20Energy/Climate%20Strategies/Spanish/FormulatingSPNwebfinal\\_11Nov11.pdf](https://www.undp.org/content/dam/undp/library/Environment-%20and%20Energy/Climate%20Strategies/Spanish/FormulatingSPNwebfinal_11Nov11.pdf).
- PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). 2017. Tercera comunicación nacional. Santo Domingo, República Dominicana. 348 p.
- Pokhrel, B. (2018). Impact of Land Use Change on Flow and Sediment Yields in the Khokana Outlet of the Bagmati River, Kathmandu, Nepal. *Hydrology*. Vol. 5. No. 22. doi:10.3390/hydrology5020022.
- ProDUS (Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible). 2014. Evaluación de la vulnerabilidad y adaptación de infraestructuras ante el cambio climático. UCR (Universidad de Costa Rica). Consultado el 22 de mayo 2019. Disponible en [https://www.undp.org/content/dam/costa\\_rica/docs/undp\\_cr\\_infraestructuracc\\_2014.pdf](https://www.undp.org/content/dam/costa_rica/docs/undp_cr_infraestructuracc_2014.pdf).
- Raffino, ME. 2019. Erosión de suelo (en línea). Concepto de. Consultado 23 de jun. 2019. Disponible en <https://concepto.de/erosion-del-suelo/>.
- Reynoso, D. 2015. Contraste de la disponibilidad y demanda de agua por provincia. República Dominicana, s.e. 57 p.
- Rodríguez, E. 2019. Línea base de producción de agua y erosión en la sección alta de la cuenca del río Yaque del Norte, República Dominicana. CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). Turrialba, Costa Rica. Pp 23-53.
- Rojas-Jimenez, K., & Gutiérrez, M. (2012). Relaciones hídricas en árboles del bosque tropical seco: el caso de *Enterolobium cyclocarpum*. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*. Vol. 8. No. 20. Pp 1-8. Consultado 23 de jun. 2019. Disponible en <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/373>.
- Romero-Lankao, P., J.B. Smith, D.J. Davidson, N.S. Diffenbaugh, P.L. Kinney, P. Kirshen, P. Kovacs, and L. Villers Ruiz (2014), North America. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Pp. 1439-1498.
- Rosa, M; Lohmann, H. 2014. Cambio climático en la República Dominicana: recursos costeros y comunidades (en línea). Programa de Fellows. República Dominicana. 138 p. Consultado 24 de may. 2019. Disponible en <http://editorialfunglode.com/documents/LibrosGratis/cambio-climatico-rd-recursos-costeros.pdf>.
- Ruiz, J. 2013. Informe sobre el cambio climático en Colombia (en línea). 6 p. Consultado 21 de jun. 2019. Disponible en <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Resumen+-Ejecutivo+Escenarios+de+Cambio+Clim%C3%A1tico.pdf/0e37511b9ed940c7b1d0b0a47eb7d36e>.
- Saldana, JF. 2008. Enfoques de gestión de recursos hídricos en República Dominicana (en línea). Distrito Nacional, República Dominicana. 6 p. Consultado 24 de mayo 2019. Disponible en [https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/7S2P1JuanFrancisco\\_SaldanaACC.pdf](https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/7S2P1JuanFrancisco_SaldanaACC.pdf).
- Sandia, L; Henao, A. 2008. Sensibilidad Ambiental y sistemas de información geográfica (en línea). 12 p. Consultado 24 de jun. 2019. Disponible en <http://observatoriageograficoamericalatina.org.mx/egal8/Nuevastecnologias/Sig/01.pdf>.
- Sánchez, J. 2018. Causas y consecuencias de las inundaciones (en línea). *Ecología verde*. Consultado 21 de jun. 2019. Disponible en <https://www.ecologiaverde.com/causas-y>

- consecuencias-de-las-inundaciones-1282.html.
- Senra, A. 2009. Impacto del ecosistema del pastizal en la fertilidad natural y sostenibilidad del suelo (en línea). ICA (Instituto de Ciencia Animal). Las Lajas, La Habana, Cuba. Pp 3-16. Consultado 21 de jun. 2019. Disponible en <http://ww.ucol.mx/revaiia/portal/-pdf/2009/mayo/1.pdf>.
- Schwartz, Peter. *The Art of the Long View: Planning for the Future in an Uncertain World*. New York: Doubleday, 1991.
- Scopel, E., F. Tardieu, G. Edmeades, and M. Sebillotte (2013), *Effects of Conservation Tillage on Water Supply and Rainfed Maize Production in Semiarid Zones of West-Central Mexico*. Mexico City: International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT).
- Sarrailh, JM. 1990. *Mise en valeur de l'écosystème forestier guyanais (opération Ecerex)*. INRA Centre Technique Forestier Tropical. 273 p.
- SEA (Secretaría de Estado de Agricultura); JAD (Junta Agroempresarial Dominicana); IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). 1993. *Diagnóstico y estrategia del sector agropecuario* (en línea). Santo Domingo, República Dominicana. 132 p. Consultado 17 jun. 2019. Disponible en [https://books.google.co.cr/books?id=wgNAQAIAAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gs\\_bse\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.co.cr/books?id=wgNAQAIAAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gs_bse_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false).
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2009. *Cambio climático, ciencia, evidencia y acciones* (en línea). Serie ¿Y el medio ambiente? Tlalpan, México D. F. 93 p. Consultado 23 de mayo 2019. Disponible en [https://www.conafor.gob.mx/-biblioteca/cambio\\_climatico\\_09-web.pdf](https://www.conafor.gob.mx/-biblioteca/cambio_climatico_09-web.pdf).
- SINAC (Sistema Nacional de Áreas de Conservación). 2013. *Análisis de vulnerabilidad al cambio climático de las áreas silvestres protegidas terrestres* (en línea). Costa Rica. 86 p. Consultado 24 de mayo 2019. Disponible en <https://canjedorbosques.org/wp-content/uploads/2017/07/Informe-final-1.pdf>.
- Soares-Filho, BS; Cerqueira, GC, Peennachin, CL. 2002. *DINAMICA-a stochastic celular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier ecological modelling*. Pp 217-235. Consultado 17 jun. 2019. Disponible en <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.571.3811&rep=rep1&type=pdf>.
- Soares-Filho, BS; Rodrigues, H; Costa, W. 2009. *Modeling environmental dynamics with Dinámica EGO* (online). Belo Horizonte, Brazil. 122 p. Consulted on jun. 21 2019. Available at [http://www.lapa.ufscar.br/geotecnologias-1/Dinamica\\_EGO\\_guidebook.pdf](http://www.lapa.ufscar.br/geotecnologias-1/Dinamica_EGO_guidebook.pdf).
- USAID (Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional); BIOMARCC - GIZ 2013, *Estudio Integrado de Vulnerabilidad y Escenarios Bioclimáticos de los Recursos y Ecosistemas Marino-Costeros de la Costa Caribe de Nicaragua y Panamá*. USAID. Programa Regional de USAID para el Manejo de Recursos Acuáticos y Alternativas Económicas y el Proyecto Biodiversidad Marino-Costera en Costa Rica - Desarrollo de Capacidades y Adaptación al Cambio Climático (BIOMARCC), 94 p.
- Useros, JL. 2012. *El cambio climático: sus causas y efectos medioambientales*. Real Academia de Medicina y Cirugía de Valladolid. España. 71-98 pp.
- Velásquez, S; Jaramillo, A. 2009. *Redistribución de la lluvia en diferentes coberturas vegetales de la zona cafetera central de Colombia* (en línea). *Revista Cenicafé*. No. 2. Pp 148-160. Consultado 23 de jun. 2019. Disponible en [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc060\(02\)148-160.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc060(02)148-160.pdf).
- Vergara, W; Heaussling S. 2010. *El cambio climático y la República Dominicana* (en línea). República Dominicana. 10. Consultado 24 de mayo 2019. Disponible en

<http://economia.gob.do/mepyd/wp-content/uploads/archivos/end/capitulo-6.-cambio-climatico.pdf>.

- Villegas, J. 2004. Análisis del conocimiento en la relación agua-suelo-vegetación para el departamento de Antioquia (en línea). EIA. No. 1. Consultado 23 de jun. 2019. Disponible en [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1794-12372004000100008](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372004000100008)
- Wang Qianfeng, Jianjun Wu, Tianjie Lei, Bin He, Zhitao Wu, Ming Liu, Xinyu Mo, Guangpo Geng, Xiaohan Li, Hongkui Zhou, Dachuan Liu (2014), Temporal-spatial characteristics of severe drought events and their impact on agriculture on a global scale. *Quaternary International*, Volume 349, Pages 10-21.
- Wachenfeld, D; Johnson J; Skeat, A; Kenchington, R; Marshall P; Innes j. 2007. Introduction to the Great Barrier Reef and climate change. In Johnson, JE; Marshall, PA (eds.). *Climate change and the Great Barrier Reef: a vulnerability assessment*. Sydney, Australia, Great Barrier Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office. Pp 1–75.
- WBCSD (World Business Council for Sustainable Development); IUCN (International Union for Conservation of Nature). 2008. *Agricultural ecosystems. Facts and trends*. Suiza. 2008. Consultado 23 de mayo 2019. Disponible en [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S018877422011000200009#notas](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018877422011000200009#notas).