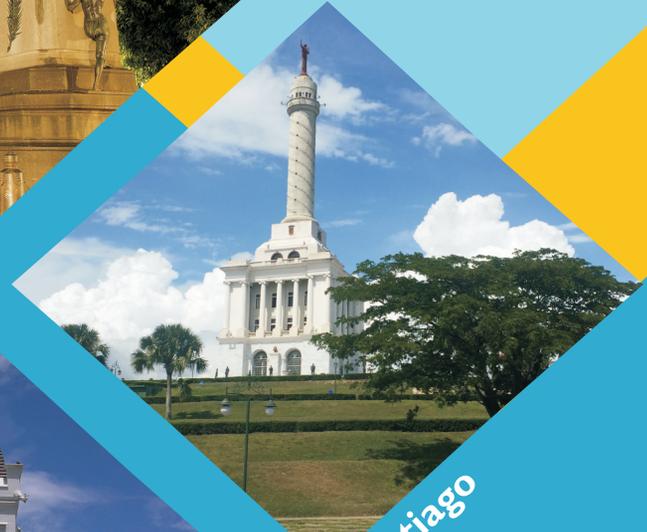


Clima Futuro en la República Dominicana

Santo Domingo



Santiago



San Pedro de Macorís



Las Terrenas



PROGRAMA DE
INFORMACIÓN CLIMÁTICA



USAID
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS
UNIDOS DE AMÉRICA



The City College
of New York



intec
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SANTO DOMINGO

Clima Futuro en la República Dominicana

Programa USAID - INTEC de Información Climática

Clima Futuro en la República Dominicana

**Santo Domingo, D.N.
Febrero 2018**

Equipo de trabajo:

Instituto Tecnológico de Santo Domingo, INTEC

Ing. Rosaura Pimentel, M. Ing.

Directora de Proyecto

Programa de Información Climática

Solhanlle Bonilla, M.Sc.

Especialista en Cambio Climático

Programa de Información Climática

Ing. Karem Rivero, M. Ing.

Especialista en Monitoreo y Evaluación

Programa de Información Climática

Lic. Yolanny Rojas

Asistente Administrativa

Programa de Información Climática

The City College of New York, CCNY

Jorge González, Ph.D

Profesor Departamento de Ingeniería Mecánica

Moisés Ángeles, Ph.D

Departamento de Ingeniería Mecánica

Ing. Ámbar Mesa

Estudiante de maestría

Red Ambiental de Universidades Dominicanas, RAUDO

Dra. Milagros Rodríguez

Presidente RAUDO

Alvin Rodríguez

Coordinador

Créditos fotografías de portada: Santo Domingo por Jerry Bauer, San Pedro de Macorís por Solhanlle Bonilla, Las Terrenas y Santiago por Karem Rivero.

Diagramación: Jesús Alberto De la Cruz

Impresión: Editora Búho, S.R.L.

Impreso en la República Dominicana

Printed in Dominican Republic

Este documento se realizó gracias al apoyo del Pueblo de Estados Unidos a través de la Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID). El contenido es responsabilidad exclusiva del Instituto Tecnológico de Santo Domingo, INTEC, en el marco del Acuerdo de Cooperación Núm. AID-517-A-15-00002 y no refleja las opiniones de USAID ni del Gobierno de los Estados Unidos.

Presentación

El texto que el lector tiene en sus manos, “Clima Futuro en la República Dominicana” es uno de los resultados que forman parte de un esfuerzo de alrededor de tres años, de experiencia, de descubrimiento y aprendizaje. Estas experiencias han sido acrisoladas al calor de una cercana y productiva interacción entre las distintas instituciones que, con el apoyo de la Cooperación del Pueblo de los Estados Unidos de América, han aunado esfuerzos, recursos y capacidades para ayudarnos a pensar el futuro.

Es un honor para el Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC) presentar un documento que ha sido elaborado en conjunto con The City College of New York (CCNY) utilizando la mejor data científica disponible aplicando rigor científico y objetividad. “Clima Futuro en la República Dominicana” constituye un tributo a las distintas organizaciones que han sido parte del Programa de Información Climática.

El último cuarto del año 2017 dejó claramente establecido que nuestros pueblos del Caribe comparten un alto nivel de vulnerabilidad ante la variabilidad climática. Una vulnerabilidad que supera nuestras fronteras insulares, pero que nos une en la solidaridad y en sus diversas manifestaciones —humana, social, académica— según nuestro ámbito de actuación. Un tipo de solidaridad que se expresa por medio de la voluntad manifiesta de explorar y aprender juntos. Tan solo el paso del huracán María por la hermana Isla de Puerto Rico, causó pérdidas aseguradas por encima de los US\$ 70 mil millones.¹ La tragedia anterior es nimia en comparación con la magnitud del daño en términos de oportunidades personales y menosca-

¹ Insurance-Journal. (2017). Insured Losses in Caribbean from Hurricane Maria Estimated at \$40B-\$85B: AIR. Retrieved from: <https://www.insurancejournal.com/news/international/2017/09/26/465440.htm>

bo de capital y vidas humanas, de esperanzas y sueños destrozados, servicios, de los bienes materiales, así como de la agricultura y la infraestructura que en sentido general se vieron afectados.

En la República Dominicana el impacto de la temporada ciclónica se hizo sentir con especial intensidad en la costa norte del país, donde hubo daños significativos en la infraestructura pública, en la agricultura y los servicios. De acuerdo con el Banco Central de la República Dominicana, los efectos de los huracanes Irma y María lastraron el crecimiento de la economía dominicana durante 2017, cerrando el indicado año con una tasa de crecimiento económico del 4.6% en lugar del 5% o más que se esperaba.²

Lo dicho en líneas anteriores significa que el efecto de complejidad de la variabilidad climática asociado con la temporada ciclónica regular, tuvo el potencial de desacelerar el crecimiento económico del país en al menos un 0.4% del PIB, lo que representa una cifra de al menos US\$ 300 millones, unos valores que representan un significativo coste de oportunidad para la educación, la innovación, la salud y la inclusión social para un país en vía de desarrollo como la República Dominicana.

Los números anteriores solo muestran el frío e impersonal lado económico de la problemática de la variabilidad climática y su impacto potencial en el desarrollo económico y social de nuestros pueblos. Las tragedias personales, la pérdida en capital social, el desarraigo de las comunidades, la migración forzada por razones climáticas y ambientales, las pérdidas en el capital natural, en el capital construido y el impacto de medio y largo plazo de la recuperación más allá de los costes de restauración de las infraestructuras muestran que nos hallamos ante una nueva normalidad del desarrollo. Esta nueva normalidad nos obliga a no solo comportarnos de manera resilientes, sino a transformarnos en individuos, comunidades y sociedades resilientes.

El camino a la adaptación y a la resiliencia definitivamente requiere de la cooperación y del aprendizaje. En especial de la cooperación técnica y científica entre nuestros pueblos, de sus centros de pensamiento, de sus universidades y del rico y sensible capital humano que las conforma. Las universidades están especialmente llamadas a jugar un rol estelar en las próximas décadas en los procesos de adaptación y resiliencia por el triple papel que les corresponde: formar el capital humano del futuro, generar los conocimientos útiles para los procesos de adaptación tecnológica y producir una mejora continua (en lo concerniente a potencial de vinculación con los sectores productivos y lo relativo a la industria) con tal de generar soluciones que sean funcionales y especialmente sostenibles desde el punto de vista del mercado.

Volvernos resilientes significa que tenemos que explorar y aprender más y mejor. Explorar implicará la búsqueda común y conjunta de nuevos conocimientos y soluciones que trasciendan las barreras disciplinarias de las ciencias, para desarrollar así transdisciplinas y abordajes que desde la perspectiva

2 Banco-Central. (2018). Valdez Albizu informa que la economía dominicana creció 4.6% en 2017. Retrieved from https://www.bancentral.gov.do/notas_bc/2018/01/30/2922/valdez-albizu-informa-que-la-economia-dominicana-creci-46-en-2017

de sistemas complejos e intrínsecamente dinámicos, nos permitan comprender los nuevos desafíos a los que se enfrenta el desarrollo y bienestar de nuestras sociedades. Por su parte, aprender implicará innovar e internalizar por diversas vías los resultados y los nuevos conocimientos obtenidos de la exploración transdisciplinaria. Aprender significa ya incorporar en la currícula de las universidades y en todos sus planes de estudios y de aprendizaje los nuevos conocimientos, en la política pública implicará mejorar la toma de decisiones del desarrollo, en la industria implicará innovar con inteligencia, costes accesibles y modos sustentables con relación al medio ambiente.

Los resultados del Programa de Información Climática son todos excepcionales, no solo por la capacitación de técnicos de distintas entidades nacionales como la Oficina Nacional de Meteorología (ONAMET), el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI), las municipalidades del Distrito Nacional, Santiago de los Caballeros, San Pedro de Macorís y Las Terrenas, sino además por la creación de un mecanismo de continuidad y sostenibilidad como resulta ser el Observatorio Nacional de Cambio Climático y Resiliencia. Este Observatorio funcionará desde el INTEC como una especie de *clearing house mechanism* o repositorio de datos abiertos, que proveerá servicios de información a la amplia comunidad de usuarios articulada alrededor de este relevante resultado.

En todos estos retos y desafíos del presente, proyectos como el de Información Climática, realizado por el INTEC, The City College of New York, Centro NOAA-CREST, la Red Ambiental de Universidades Dominicanas (RAUDO) y la Fundación Plenitud con el apoyo decidido del Pueblo de los Estados Unidos de América a través de USAID, así como con la colaboración de otras entidades dominicanas e internacionales, marcan un camino de esperanza en la dirección adecuada de la cooperación y el aprendizaje. Nuestra responsabilidad es trabajar por un presente y un futuro en el que podamos recuperarnos del impacto de la variabilidad climática de una manera mucho más costo-efectiva e inteligente, pero sobre todo con la esperanza de que podremos estar mejor al siguiente día.

Finalmente, este documento sobre “Clima Futuro en la República Dominicana”, constituye una muestra más de la excelencia, de la calidad y el compromiso de los distintos socios del proyecto. Esperamos que su lectura y atenta revisión nos motive a continuar cooperando y, sobre todo, que nos empuje a continuar con este viaje compartido de exploración y aprendizaje.

Dr. Víctor Gómez-Valenzuela,
Vicerrector de Investigación y Vinculación
Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC)
Santo Domingo, República Dominicana.

Programa de Información Climática

El “Programa de Información Climática” ejecutado por el Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC) fue un proyecto financiado por el pueblo de los Estados Unidos, bajo la Estrategia de Cooperación para el Desarrollo 2014-2018 de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y su objetivo de aumentar la resiliencia de las poblaciones vulnerables al cambio climático.

Este proyecto tuvo como objetivo incrementar y mejorar la oferta útil, procesable y relevante al cambio climático, asegurando que esté disponible, accesible y comprensible para la toma de decisiones tanto a nivel municipal como individual.

Los elementos transversales del programa fueron:



Vista playa en Las Terrenas

- Proceso participativo de las municipalidades y organizaciones involucradas
- Género y Grupos Vulnerables
- Seguridad Ciudadana

El Programa de Información Climática trabajó de cerca con, Santo Domingo, Distrito Nacional y los municipios: Las Terrenas, San Pedro de Macorís y Santiago de los Caballeros.

Sus componentes principales fueron:

- Evaluar y desarrollar información climática, incluyendo evaluaciones y mapas de vulnerabilidad en los municipios participantes, tomando en cuenta grupos vulnerables y género. Con esto se espera tener mayor comprensión de la información y de las tecnologías de comunicación utilizadas para diseminar la información pertinente y poder reducir los riesgos asociados al cambio climático.
- Fortalecimiento de las instituciones gubernamentales proveedoras de información climática Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI) y la Oficina Nacional de Meteorología (ONAMET) a través de capacitaciones específicas en las herramientas utilizadas para los estudios de vulnerabilidad, índices de vulnerabilidad y sistemas de información climática. Esto permitirá crear un mecanismo que mejore la provisión de información sobre el cambio climático y sus consecuencias a nivel municipal y nacional.
- Creación de nuevas capacidades en los municipios participantes y a nivel nacional con la incorporación de la Red Ambiental de Universidades Dominicanas (RAUDO), The City College of New York (CCNY) y el Programa Regional de Cambio Climático (PRCC) de la USAID y el CATIE. Se ampliará y fortalecerá una red compuesta por redes de trabajo sectoriales, de acuerdo a los sectores priorizados en las políticas climáticas nacionales y de la región.
- Desarrollo de un sistema de información climática que incluya la traducción de la información producida por los proveedores, sistemas de alerta temprana municipal, la integración de la plataforma regional de información climática (Acción-Clima), a través de un observatorio de cambio climático y resiliencia. Este sistema de información tendrá diferentes fuentes de alimentación y estará disponible a las instituciones gubernamentales, de la sociedad civil, investigadores, estudiantes y público en general. Información oportuna y disponible que permita tomar acciones para la adaptación al cambio climático a diferentes escalas en la República Dominicana.



Iglesia de San Pedro de Macorís

Resultados logrados:

- Información hidro-climática para diferentes escalas de tiempo disponible.
- Capacidades técnicas y gerenciales de los planificadores municipales mejoradas.
- Necesidades y capacidades de las municipalidades involucradas en el programa evaluadas.
- Capacidad de utilizar información climática relevante para la toma de decisiones incrementada.
- Redes de colaboraciones sectorial público-privadas integradas al Observatorio de Cambio Climático y Resiliencia.
- Página web con información climática relevante para las autoridades, grupos interesados y público en general disponible.
- Observatorio de Cambio Climático y Resiliencia conectado al Sistema Regional de Información Climática.

Contenido

Presentación	7
Programa de Información Climática	11
Índice de figuras	17
Índice de tablas	20
Lista de acrónimos	21

INFORMACIÓN HIDRO-CLIMÁTICA A DIFERENTES ESCALAS DE TIEMPO

1. INTRODUCCIÓN	25
2. ANTECEDENTES	27
2.1 Cambio Climático Global y los escenarios del IPCC	27
2.2 Modelos de Circulación General	28
2.3 Downscaling Estadístico	29
3. METODOLOGÍA	31
3.1 Datos del nivel del mar	31
3.2 Índice de sequía	33
3.3 Índice de calor y cálculos de olas de calor	35
3.4. Análisis de recursos de agua	36
3.4.1 Caracterización de la cuenca	36
3.4.2 Balance hídrico	39
3.4.3 Validación de HEC-HMS	45
3.5 Análisis de inundaciones para Santo Domingo	49

4. RESULTADOS	53
4.1 Aumento del nivel del mar en la República Dominicana	53
4.2 Eventos de sequía en la República Dominicana	56
4.2.1 Eventos de sequía en el presente	56
4.2.2 Proyecciones de sequías	60
4.3 Olas de calor en la República Dominicana	64
4.3.1 Olas de calor en el presente	64
4.3.2 Proyecciones de olas de calor	67
4.4 Balance Hídrico	71
4.5 Análisis de inundaciones: Santo Domingo - río Ozama	75
Conclusiones	81
Bibliografías	83
Anexos	87
Boletín #1 Ondas de Calor en Samaná	89
Boletín #2 Sequías en Samaná	91
Boletín #3 Ondas de Calor en Santiago	93
Boletín #4 Eventos de Sequía en Santiago	95
Boletín #5 Análisis de Inundación en zonas al margen del río Ozama	97
Boletín #6 Ondas de Calor en Santo Domingo	99
Boletín #7 Sequías en Santo Domingo	101

Índice de figuras

Figura 1	Mapeo de cuantiles y corrección de sesgo	29
Figura 2	Mareógrafos distribuidos por toda la región del Caribe y proporcionados por PSMSL. .32	
Figura 3	Referencia de datos de nivel del mar para el conjunto de datos de PSMSL.	32
Figura 4	Cálculo de la altura ortométrica en Samaná.	33
Figura 5	Cuencas hidrográficas que contienen las provincias de interés	36
Figura 6	(a) Sub-cuencas del Ozama, (b) Número de curva para cada subcuenca, (c) la pendiente en grados para cada subcuenca	37
Figura 7	(a) El número de curva por cada sub-cuenca. (b) El mapa ráster de pendiente de la cuenca.	38
Figura 8	Cuenca del río Higuamo	39
Figura 9	Estaciones meteorológicas de la cuenca del Ozama	41
Figura 10	Configuración de la cuenca de Santo Domingo en HEC-HMS.	42
Figura 11	Medidor de flujo de Palmarejo y ubicación de la salida de la subcuenca 3.	45
Figura 12	Comparación del caudal del río modelado y observado	45
Figura 13	Flujo mensual observado y simulado para período de validación en la estación seleccionada en el río Yaque del Norte - Puente San Rafael	47
Figura 14	Flujo mensual observado y simulado para período de validación en la estación seleccionada en el río Yaque del Norte - Pena Ranchero.	47
Figura 15	Flujo mensual observado y simulado para período de validación en la estación seleccionada en el río Yaque del Norte - Palo Verde	48
Figura 16	Diagrama Topológico de la región Hidrográfica Ozama-Nizao	49
Figura 17	Muestra las secciones transversales perpendiculares al río Ozama.	50
Figura 18	Puentes Francisco del Rosario Sánchez y Juan Bosch y sus respectivas localizaciones en el modelo	51
Figura 19	Penetración del mar en Samaná, Puerto Plata, Barahona, Santo Domingo y San Pedro de Macorís para el año 2025	54

Figura 20	Penetración del mar en Samaná, Puerto Plata, Barahona, Santo Domingo y San Pedro de Macorís para el año 2050	54
Figura 21	Penetración del mar en Samaná, Puerto Plata, Barahona, Santo Domingo y San Pedro de Macorís para el año 2075	55
Figura 22	Penetración del mar en Samaná, Puerto Plata, Barahona, Santo Domingo y San Pedro de Macorís para el año 2100	55
Figura 23	Serie de tiempo del Índice de SPI para SPI 3 meses corriendo, y SPI anual en Santo Domingo	56
Figura 24	Serie de tiempo del Índice de SPI para SPI 3 meses corriendo y SPI anual en Santiago, Cibao	57
Figura 25	Serie de tiempo del Índice de SPI para SPI 3 meses corriendo y SPI anual en Samaná	57
Figura 26	(a) Frecuencia de SPI para Santo Domingo – estación de ONAMET y (b) Santo Domingo - estación de NCDC	58
Figura 27	Frecuencia de SPI para Santiago – estación de ONAMET y Cibao – estación de NCDC.	58
Figura 28	Frecuencia de SPI para Samaná – estación de ONAMET	59
Figura 29	Evolución temporal de las sequías para (a) Santo Domingo - estación de ONAMET, (b) Santo Domingo - estación de NCDC, (c) Santiago - estación de ONAMET, y (d) Cibao - estación de NCDC.	60
Figura 30	Evolución temporal de las sequías para Samaná - estación de ONAMET	60
Figura 31	(a) Proyección de SPI, (b) Frecuencia de SPI, y (c) evolución temporal de sequía en Santo Domingo – estación de ONAMET.	61
Figura 32	(a) Proyección de SPI, (b) Frecuencia de SPI, y (c) evolución temporal de sequía en Santiago – estación de ONAMET	62
Figura 33	(a) Proyección de SPI, (b) Frecuencia de SPI, y (c) evolución temporal de sequía en Samaná – estación de ONAMET	63
Figura 34	Evolución temporal de las olas de calor para la serie de tiempo (a) anual en Santo Domingo – estación de NCDC, (b) acumulado de las olas de calor en varios períodos de tiempo en Santo Domingo - estación de NCDC	64
Figura 35	Evolución temporal de las olas de calor para (a) series de tiempo anuales en Santiago - estación de NCDC, (b) olas de calor acumuladas en varios periodos en Santiago - estación de NCDC	65
Figura 36	Evolución temporal de las ondas de calor para (a) series de tiempo anuales en Samaná - estación de ONAMET y (b) olas de calor acumuladas en varios periodos en Samaná - estación de ONAMET	65
Figura 37	Frecuencia de número de olas de calor para (a) Santo Domingo - estación de NCDC, (b) Santiago - estación de NCDC y (c) Samaná - estación de ONAMET	66

Figura 38	Proyección del número de olas de calor a lo largo del siglo XXI en Santo Domingo – estación de ONAMET para (a) series de tiempo anual, (b) frecuencia y (c) evolución temporal.68
Figura 39	Proyección del número de olas de calor a lo largo del siglo XXI en Santiago – estación de ONAMET para (a) series de tiempo anual, (b) frecuencia y (c) evolución temporal.69
Figura 40	Proyección del número de olas de calor a lo largo del siglo XXI en Samaná - estación de ONAMET para (a) series de tiempo anual, (b) frecuencia y (c) evolución temporal.70
Figura 41	Caudal máximo anual versus los caudales picos estimados para cada período de retorno76
Figura 42	Niveles del agua para cada perfil a la misma sección transversal #7377
Figura 43	Perfil del río y los niveles del agua de todas las secciones transversales para el perfil 1. . .	.77
Figura 44	Áreas de inundaciones en el río Ozama para diferentes períodos de retorno78
Figura 45	Comparación de las áreas de inundación correspondiente a diferentes períodos de retorno79

Índice de tablas

Tabla 1	Clasificación de SPI para eventos de humedad y sequía	35
Tabla 2	Área impermeable para cada sub-cuenca	40
Tabla 3	Número de curva para cada subcuenca	40
Tabla 4	Los resultados de tiempo de retraso para cada sub-cuenca.	42
Tabla 5	Áreas cada subcuenca en Km2	43
Tabla 6	Porcentaje de impermeabilidad y número de curva por subcuenca.	43
Tabla 7	Caudal mensual para el método de direccionamiento	44
Tabla 8	Método de Muskingum Cunge.	44
Tabla 9	Resumen estadístico de la comparación entre los valores de flujo simulados en HEC-HMS y observados para el período de validación en 3 estaciones de medición en el Yaque del Norte, desde enero 1983 a diciembre 1989. Período de calibración	48
Tabla 10	Características generales de los puentes introducidos al modelo de HEC-RAS	52
Tabla 11	Valores asumidos en el modelo de HEC-RAS.	52
Tabla 12	Clasificación del indicador Falkenmark.	71
Tabla 13	Demanda de agua por sector (mm3/año), datos del INDRHI	71
Tabla 14	Clasificación del Índice de Tensión de Agua (Raskin et al. 1997) [25].	72
Tabla 15	Índice de escasez de agua en Santiago para el período 2020 - 2050.	72
Tabla 16	Escasez de agua en el Yaque del Norte.	73
Tabla 17	Escasez de agua para el Ozama	73
Tabla 18	Disponibilidad de agua segura por región. (Plan Hidrológico Nacional – INDRHI, año 2007).	74
Tabla 19	Disponibilidad de agua por región (Plan Hidrológico Nacional – INDRHI, año 2007).	74
Tabla 20	Tensión Hídrica y escasez de agua por región (Plan Hidrológico Nacional – INDRHI, año 2007).	75
Tabla 21	Niveles del agua desde río arriba hasta río abajo y las secciones transversales donde termina cada división	78
Tabla 22	Zonas vulnerables para cada perfil.	79

Lista de acrónimos

ArcGIS	Plataforma de mapeo y análisis de Sistemas de Información Geográfica
ArcMap	Aplicación central de ArcGIS
BAUS	Escenario habitual o “Business as Usual”, (por sus siglas en inglés)
CAM4	Modelo Comunitario Atmosférico versión 4 (por sus siglas en inglés)
CCNY	The City College of New York
CCSM4	Modelo Comunitario del Sistema Climático versión 4
CDF	Función de Distribución Acumulativa (por sus siglas en inglés)
CESM	Modelo de Sistema de Tierra Comunitario (por sus siglas en inglés)
CLM4	Modelo de Tierra Comunitario versión 4 (por sus siglas en inglés)
CYN	Cuenca Yaque del Norte
DEM	Modelo digital de elevación (por sus siglas en inglés)
DQM	Mapeo de Cuantiles sin tendencia
DS	Temporada seca (por sus siglas en inglés)
ENSO	Oscilación Sur de El Niño (por sus siglas en inglés)
ERS	Estación de lluvias tempranas (por sus siglas en inglés)
FI	Indicador de Falkenmark (por sus siglas en inglés)
GCM	Modelo de circulación general
GEI	Gases de efecto invernadero
GFS	Sistema de pronóstico Global (por sus siglas en inglés)
GIS	Sistema de Información Geográfica (por sus siglas en inglés)
GPS	Sistema de Posicionamiento Global (por sus siglas en inglés)
HEC-HMS	Sistema de Modelado Hidrológico (por sus siglas en inglés)

HEC-RAS	Sistema de Análisis de Ríos
HI	Índice de calor climatológico (por sus siglas en inglés)
IE-EE	Informe especial sobre escenario de emisiones del IPCC
INDRHI	Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos
INTEC	Instituto Tecnológico de Santo Domingo
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (por sus siglas en inglés)
LRS	Temporada de lluvias tardías (por sus siglas en inglés)
NAO	Oscilación de Atlántico Norte (por sus siglas en inglés)
NCDC	Centro Nacional de Datos Climáticos (por sus siglas en inglés)
NCEP	Centro Nacional de Pronóstico Ambiental (por sus siglas en inglés)
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (por sus siglas en inglés)
ONAMET	Oficina Nacional de Meteorología
PDF	Función de Densidad de Probabilidad (por sus siglas en inglés)
POP	Programa de Océano Paralelo (por sus siglas en inglés)
PSMSL	Servicio Permanente para el Nivel Medio del Mar (por sus siglas en inglés)
QDM	Mapeo de Delta cuantiles (por sus siglas en inglés)
QM	Mapeo de cuantiles
RCP	Trayectoria de Concentración Representativa (por sus siglas en inglés)
RLR	Referencia Local Revisada (por sus siglas en inglés)
SCS	Método de servicio de conservación de suelos (por sus siglas en inglés)
SPI	Índice de Precipitación Estandarizada (por sus siglas en inglés)
SST	Temperatura de la superficie del mar (por sus siglas en inglés)
TGBM	Punto de Referencia del Mareógrafo (por sus siglas en inglés)
USAID	Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (por sus siglas en inglés)
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés)
WRF	Modelo de Investigación y Pronóstico del Clima (por sus siglas en inglés)
WSI	Índice de escasez de agua (por sus siglas en inglés)

Información hidro-climática a diferentes escalas de tiempo





I. Introducción

La región del Caribe abarca las costas del mar Caribe, Antillas Mayores/Menores, las líneas costeras caribeñas de América Central y de América del Sur y la región de desarrollo principal occidental. El patrón atmosférico del Caribe se rige principalmente por la temperatura superficial del mar, la divergencia de los vientos, la cizalladura vertical del viento, los episodios del polvo sahariano, así como fenómenos de tele-conexión como El Niño-Oscilación del sur y la Oscilación del Atlántico Norte [1-3]. La convergencia de estos factores conduce la climatología de lluvia caribeña, mientras que la anomalía debida al calentamiento regional genera una zona altamente vulnerable a eventos extremos como actividades ciclónicas, sequías, olas de calor, entre otros eventos.

La República Dominicana es una isla del Caribe y es parte de las Antillas Mayores, que es afectada drásticamente por un calentamiento regional recientemente detectado [4]. En la presente investigación se estudiaron las provincias de Santo Domingo, San Pedro de Macorís, Santiago y Samaná, por ser las regiones de trabajo del Programa USAID/INTEC de Información Climática.

Santo Domingo es la capital de la República Dominicana y el área metropolitana más grande de la región. Esta ciudad es vulnerable a varios eventos extremos como sequías, inundaciones, aumento del nivel del mar y olas de calor. Además, la provincia Santo Domingo se ve afectada con frecuencia por los huracanes. Asimismo, de acuerdo con la Comisión Europea, en 2009, Santo Domingo y San Pedro de Macorís fueron las provincias con mayores daños causados por las tormentas tropicales en las últimas décadas [5]. Por otro lado, Santiago está amenazada por frecuentes inundaciones de ríos, mientras que Samaná es afectada por la subida del nivel del mar.

En Santo Domingo y Samaná, se cuantificaron la producción de agua de la cuenca Ozama y las inundaciones costeras. Además, las sequías y olas de calor se proyectaron utilizando el Modelo de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés) conocido como el Modelo Comunitario del Sistema Climático versión 4 (CCSM4, por sus siglas en inglés). Para analizar estos acontecimientos, fueron consideradas las provincias de Santo Domingo, Santiago y Samaná.

La Comisión Europea en 2009 también ha señalado que aproximadamente el 46% de las inundaciones registradas en el período 1966-2000 se concentraron en las zonas urbanas importantes, como el Distrito Nacional y varias ciudades de la región Cibao Central [5]. Por lo tanto, las provincias más afectadas por las inundaciones fueron Santiago, Santo Domingo y San Pedro de Macorís. El Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI) determina la distribución del agua en la República Dominicana, con 1% para el consumo humano, 1% consumido por los ecosistemas, 1% para ganado, 2% por la industria y el 79% es consumido por la agricultura. El Plan Hidrológico Nacional explica que la demanda de agua en el año 2000 era de 4,865 millones de metros cúbicos por año y el agua disponible era 13,205 MM³/año [6]. Además, se identificó la disponibilidad de agua como un serio desafío en el futuro [5]. Según el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), la atmósfera de la Tierra se ha calentado aproximadamente 1° C durante los últimos 100 años. Tras el reciente final del período frío conocido como la “pequeña edad de hielo” en el siglo XIX, el nivel del mar ha aumentado alrededor de 1 a 2 milímetros por año debido al derretimiento de los casquillos de hielo, campos de hielo y los glaciares; además de la expansión térmica del océano [7]. Según el USGS, durante el último interglaciar, la mayor parte de hielo derretido de Groenlandia fue causado por el aumento del nivel del mar de unos 6 metros.

La región del Caribe está sujeta a un calentamiento regional y el subsiguiente cambio en los patrones atmosféricos, así como el aumento en la temperatura del aire y el contenido de humedad relativa.

El Programa de Información Climática en colaboración entre el City College of Nueva York (CCNY) y el Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC) con el objetivo de proporcionar información a las comunidades y las autoridades a tomar medidas para reducir el riesgo climático, llevó a cabo una investigación donde se aplicaron metodologías para analizar fenómenos extremos en la región. Además, se implementó una metodología para estimar la producción/escasez de agua en la provincia de Santo Domingo, así como un análisis exhaustivo de los eventos de inundación. Conjuntamente, la sequía y las olas de calor fueron proyectadas siguiendo escenarios de forzamientos radiativos futuro. Adicionalmente, una proyección preliminar del aumento del nivel del mar se realizó para determinar zonas costeras vulnerables probables en caso de que el nivel del mar aumentara de 2 o 4 metros.

2. Antecedentes

2.1 Cambio Climático Global y los escenarios del IPCC

La composición de la atmósfera tiene ciertos gases de efecto invernadero (GEI), como el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), vapor de agua, entre otros gases, que juegan un papel esencial en el efecto invernadero para mantener la vida en nuestro planeta. Desde los tiempos preindustriales, algunos gases de efecto invernadero como la concentración de CO_2 , metano y óxido nitroso (N_2O) han aumentado de manera acelerada debido a diversas actividades humanas (quema de combustibles fósiles y el cambio en el uso de la tierra) [8].

El aumento de la temperatura global de la superficie del mar (SST, por sus siglas en inglés) fue detectado en los años 1971 – 2010 con una tasa de incremento de 0.11°C por década en la profundidad superior de 75 metros, mientras que en una respuesta directa se detectó el derretimiento de los casquetes polares. En el período de 1955 a 1995 un aumento termostático del nivel del mar de $0.40 \pm 0,09$ mm/año fue observado y basado en datos promedio de 5 años promediados desde una profundidad de 3000 metros. Además, el derretimiento de los casquillos de hielo agrega agua dulce al océano disminuyendo su salinidad y causando una extensión de océano (extensión halostérica). La contribución de este tipo de expansión a la subida global del nivel del mar es solamente cerca de 1% [9]. Por lo tanto, la expansión termostática es una de las contribuciones más relevantes al aumento del nivel global del mar.

La temperatura global de la superficie del mar provoca cambios en la temperatura del aire de la superficie, que es un factor clave en el desarrollo de eventos extremos como olas de calor y el impacto negativo sobre la salud humana. Se ha detectado un aumento de $0.85 \pm 0.2^\circ\text{C}$ desde finales del siglo XIX hasta

el 2012, con una tierra más caliente que el océano. Además, el análisis de temperaturas diarias máxima y mínima de la superficie terrestre a partir la 1950 a 1993 muestra que las temperaturas mínimas y máximas sobre la tierra han aumentado a una tasa de 0.1°C por década desde 1950 [8,10,11].

A escala local, un calentamiento regional en el Caribe fue identificado recientemente con una tasa anual de cambio de 0.015°C por año. Las dos principales temporadas del Caribe, correspondientes a la temporada de lluvia temprana y la temporada de lluvias finales, muestran tendencias estadísticas significativamente más altas, siendo igual al 0.0161 y 0.0209°C por año, respectivamente [4].

La correlación entre el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero y el calentamiento de la atmósfera fue detectado y relacionados con la actividad antropogénica. Por eso, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) realizó un estudio de información técnica, científica y socioeconómica para determinar el riesgo de cambios climáticos generados por la actividad humana [12]. La tercera generación de escenarios fue emitida en el 2011 y se denomina Trayectoria de Concentración Representativa (RCPs, por sus siglas en inglés). Cuatro nuevos escenarios se desarrollaron, pero en este trabajo, se seleccionó el escenario de Trayectoria de Concentración Representativa (RCP) 4.5. Este escenario se considera como un escenario medio-bajo o escenario de estabilización porque este escenario toma en cuenta algunas acciones para controlar las emisiones de gases de efecto invernadero. El objetivo en este escenario es estabilizar el forzamiento radiativo en 4.5 W/m^2 en el año 2100. Para lograr este objetivo, este escenario considera tecnologías bajas en emisiones, uso intensivo de tecnología de captura de carbono, tecnología de almacén geológico, aplica el precio de emisión a las emisiones de uso de la tierra y las áreas de tierras forestales extendidas desde el presente [13, 14].

2. 2 Modelos de Circulación General

Actualmente, el Modelo Comunitario del Sistema Climático versión 4 (CCSM4, por sus siglas en inglés) es el Modelo de Circulación General (GCM) más moderno utilizado por el Modelo de Sistema de Tierra Comunitario (CESM, por sus siglas en inglés) para simular la respuesta del clima global debido al aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera por causas antropogénicas a lo largo del Siglo XXI (2006 a 2100) considerando el ciclo interactivo del carbono. Los componentes del CCSM4 son el Modelo Comunitario Atmosférico versión 4 (CAM4, por sus siglas en inglés), el Programa de Océano Paralelo (POP, por sus siglas en inglés) versión 2 para simular la interacción oceánica, el Modelo de Tierra Comunitario versión 4 (CLM4, por sus siglas en inglés) y el Código de Hielo Comunitario versión 4 junto con un elemento acoplador que une el intercambio de flujos de energía entre los componentes. El componente atmosférico, CAM4 tiene una resolución uniforme de 0.94° de latitud y 1.25° de longitud, incluyendo 26 capas en el plano vertical. El Programa de Océano Paralelo tiene una resolución meridional de 0.25° alrededor del Ecuador, para gradualmen-

te aumentar a 0.54° en las latitudes subtropicales y permanece constante en latitudes más altas. En la dirección zonal, la resolución es uniforme en el 1.11° . El Modelo de Tierra Comunitario está acoplado con el componente atmosférico e introduce el modelo dinámico de vegetación global con la misma resolución que el componente de la atmósfera. De manera similar, el Código de Hielo Comunitario versión 4 tiene la misma resolución del componente oceánico sobre el océano Ártico [15-18].

2.3 Downscaling Estadístico

La técnica de mapeo del cuantil calcula la función de distribución acumulativa (CDF) para datos de precipitación observada (F_o, h) y el resultado de GCM en el período histórico climático (F_m, h). En CCSM4 y las estaciones de tierra de República Dominicana, los períodos históricos corresponden a 2006 – 2014. Ambos CDF coinciden con el sesgo correcto y proyectan la salida GCM en el período climático futuro indicado por el subíndice h. La función de transferencia utilizada en este método es [5]:

$$\hat{x}_{m,p}(t) = F_{o,h}^{-1} \left\{ F_{m,h} \left[x_{m,p}(t) \right] \right\}$$

donde GCM es el resultado en cualquier momento t en el clima proyectado, es el cuantil teniendo en cuenta la corrección de sesgo. Esta técnica se ilustra en la figura siguiente donde se utilizan las funciones de la CDF y la función inversa (F-1) para corregir la salida GCM.

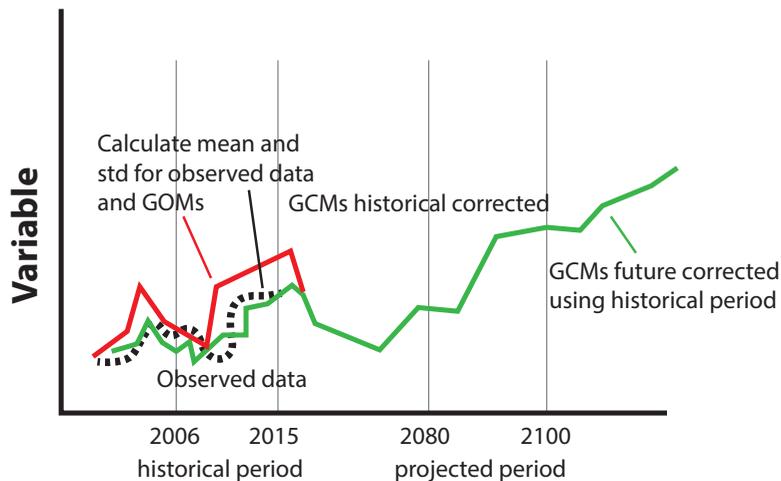


Figura 1 Mapeo de cuantiles y corrección de sesgo

Este enfoque elimina la tendencia en el resultado de los datos de precipitación del GCM antes de aplicar el mapeo de cuantiles. Los datos proyectados sin tendencia tienden a ser dentro de la distribución de datos observados en el período histórico. De esta manera podría evitarse la extrapolación. Después, la tendencia se vuelve a imponer para obtener la siguiente función de transferencia [5]:

$$\hat{x}_{m,p}(t) = F_{o,h}^{-1} \left\{ F_{m,h} \left[\frac{\bar{x}_{m,h} x_{m,p}(t)}{\bar{x}_{m,p}(t)} \right] \right\} \frac{\bar{x}_{m,p}(t)}{\bar{x}_{m,h}}$$

donde $\bar{x}_{m,h}$ es la media a largo plazo del GCM en el período histórico climático, $\bar{x}_{m,p}$ es la media a largo plazo del GCM en el tiempo t en el período proyectado. Este enfoque es el que se utiliza en este trabajo.

3. Metodología

3.1 Datos del nivel del mar

Los datos del nivel del mar a escala local fueron obtenidos del Servicio Permanente para el Nivel Medio del Mar (PSMSL, por sus siglas en inglés) que proporcionan datos de medidor de marea costeras para todo el mundo. Los datos disponibles son gratis y tienen metadatos que indican el lugar de referencia, instrumentos y frecuencia de recolección de datos [19].

En la región del Caribe, hay varios mareógrafos distribuidos en las costas. La costa sur de los Estados Unidos tiene ahora 28 mareógrafos con datos registrados hasta el año 2015 o incluso hasta el presente. En las Antillas Mayores, Cuba, Puerto Rico y algunas islas en las Antillas Menores también poseen datos hasta el presente, mientras que las dos estaciones en la República Dominicana (Puerto Plata y Barahona) y uno en Haití (Puerto Príncipe) tienen datos hasta el 1997 (ver figura 2).

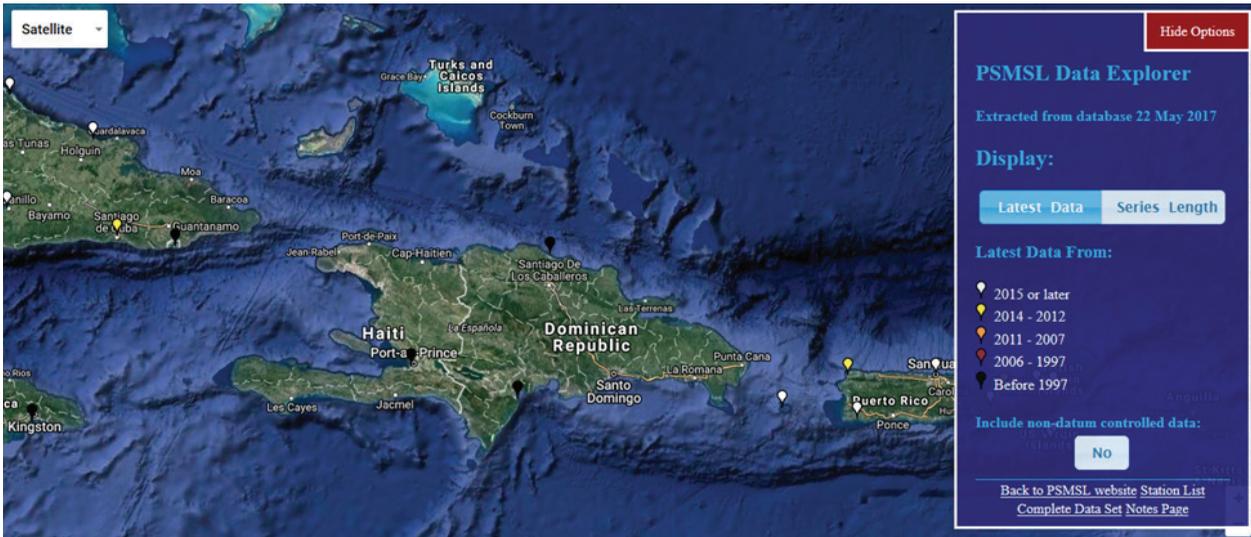


Figura 2 Mareógrafos distribuidos por toda la región del Caribe y proporcionados por PSMSL

El Punto de Referencia del Mareógrafo (TGBM, por sus siglas en inglés) es el principal dato para medir el nivel del mar a nivel local. TGBMs son puntos de referencia en la tierra y cerca de un mareógrafo sobre cualquier superficie estable. Un dato adicional es una simple desviación del TGBM de manera tal que el nivel del mar tiene valores de alrededor 7000 mm. Este dato se conoce como Referencia Local Revisada (RLR, por sus siglas en inglés), y fue creado para registrar largas series de tiempo y almacenar sólo números positivos en computadoras [20]. En cada mareógrafo, una antena de GPS es colocada en cualquier punto estable de la tierra y está relacionada con el TGBM por medio de la alta precisión de nivelación para geo-referenciar los datos de nivel del mar.

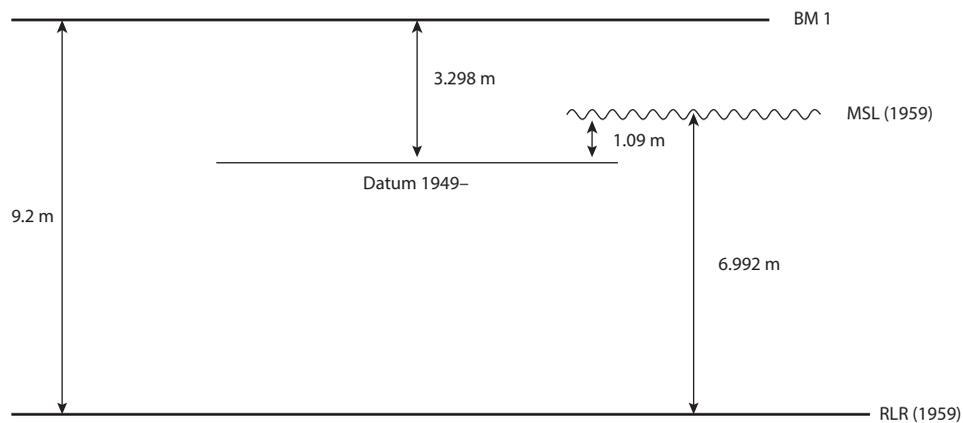


Figura 3 Referencia de datos de nivel del mar para el conjunto de datos de PSMSL

Más adelante, se utilizaron los valores estimados usando los Modelos de Circulación Global más cercanos a los mareógrafos mencionados anteriormente para convertir su referencia con respecto a la referencia del DEM que se ha usado para los análisis. Para convertir la referencia de las proyecciones se le substrajo la altura ortométrica.

$$H(\text{Altura del Geoid}) = N(\text{Altura Ortométrica}) + h(\text{Altura del Elipsoide})$$

La altura ortométrica fue calculada utilizando diferentes puntos que cubren la costa de cada provincia analizada (figura 4). Estos puntos representan las coordenadas y basados en esto, se obtuvo un promedio de la altura ortométrica que represente la región.

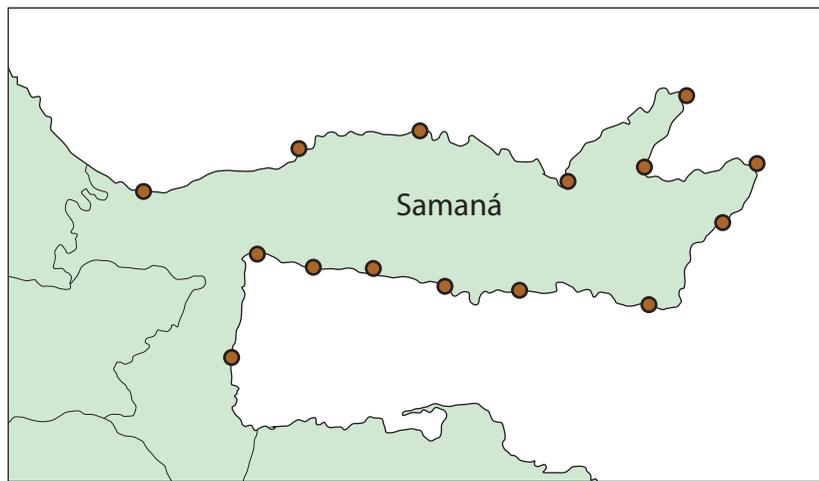


Figura 4 Cálculo de la altura ortométrica en Samaná

Aplicando la ecuación anterior, se pudo calcular los valores del nivel del mar con respecto a la referencia del DEM para Barahona y Puerto Plata. Sin embargo, para Santo Domingo, San Pedro, y Samaná, se calculó un promedio pesado para determinar los valores proyectados en la costa de estas provincias ya que no existen mareógrafos en estas zonas. Para estimar los niveles del mar en el futuro para Santo Domingo, se utilizaron los mareógrafos localizados en Aguadilla, Mayagüez, Isla Mona, y Barahona. Para estimar los niveles del mar en el futuro para San Pedro de Macorís and Samaná, se utilizaron los mareógrafos localizados en Aguadilla, Mayagüez, and Isla Mona.

3.2 Índice de sequía

El Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) es una herramienta estadística útil para el monitoreo de sequías y eventos húmedos en una escala de tiempo dada y estación de lluvias. SPI se calcula ajustando

una función de distribución gamma a los datos de precipitación por medio del análisis de máxima verosimilitud para determinar los parámetros de distribución gamma. La Función de Densidad de Probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés) para la distribución gamma es válida para valores positivos y está dada por:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}$$

con los parámetros de gamma:

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) > 0$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln x}{n}$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} > 0$$

donde n es el número de datos.

Una Función de Distribución Acumulativa (CDF, por sus siglas en inglés) mixta se obtiene combinando la distribución gamma PDF y la precipitación cero discreta CDF. La distribución gamma CDF (G) viene dado por:

$$G(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx$$

mientras que la CDF mixta (H) se expresa como:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x)$$

$$q = m/n$$

donde q es la probabilidad de cero lluvias y m es el número de eventos de cero lluvias.

La CDF mixta se transforma en una distribución normal estándar equivalente. La puntuación z correspondiente es el SPI. De esta manera, la probabilidad de lluvias menor o igual a la precipitación

promedio es de 0.5, que corresponde a un puntaje z igual a cero, mientras que la probabilidad de ser menor o igual a una cantidad mucho menor que la media será denotada por valores muy pequeños de SPI (e.g. -0.5, -1, -2). Los valores positivos del SPI representan eventos húmedos, mientras que valores negativos del SPI indican sequía moderada ($-1.0 \leq \text{SPI} \leq -1.49$), sequía severa ($-1.5 \leq \text{SPI} \leq -1.99$) y sequía extrema cuando el SPI es menos de -2.0 (ver tabla 1).

Tabla 1 Clasificación de SPI para eventos de humedad y sequía

<i>SPI</i>	<i>Clasificación</i>
> 2.0	Extremadamente húmedo
1.5 a 1.99	Muy húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo
0 a 0.99	Ligeramente húmedo
0 a -0.99	Sequía ligera
-1 a -1.49	Sequía moderada
-1.5 a -1.99	Sequía severa
< -2.0	Sequía extrema

3.3 Índice de calor y cálculos de olas de calor

El aire se siente más caliente cuanto mayor humedad, particularmente durante la época de verano en el Caribe, debido a que la humedad alta reduce la evaporación de la transpiración. El índice de calor mide este efecto como una temperatura aparente y es una medida del riesgo de estrés por calor [21].

El Servicio Nacional del Tiempo de la NOAA proporciona una tabla de índices de calor en función de la temperatura y humedad relativa, conocida como Tabla de Steadman [22]. La tabla de índice de calor de Steadman es representada por análisis de regresión múltiple, conocido como regresión de Rothfus [23]:

$$\begin{aligned}
 HI = & -42.379 + 2.04901523 \times T + 10.14333127 \times RH \\
 & - 0.22475541 \times T \times RH - 6.83783 \times 10^{-3} \times T^2 \\
 & - 5.481717 \times 10^{-2} \times RH^2 + 1.22874 \times 10^{-3} \times T^2 \times RH \\
 & + 8.5282 \times 10^{-4} \times T \times RH^2 - 1.99 \times 10^{-6} \times T^2 \times RH^2
 \end{aligned}$$

Normalmente, el índice de calor se utiliza para identificar los días de calor intenso. Una ola de calor se define como al menos tres días consecutivos con índice de calor superior a los 97 percentiles. El índice

de calor se calcula utilizando la temperatura del aire y humedad relativa, pero en el caso donde no hay información de humedad relativa, la temperatura del aire puede ser usada para identificar las olas de calor. Por lo tanto, las olas de calor se definen como al menos tres días consecutivos con temperatura superior a 96 percentiles.

3.4. Análisis de recursos de agua

3.4.1 Caracterización de la cuenca

Se identificaron cuatro regiones de interés con vulnerabilidad a las perturbaciones del clima (Santo Domingo, San Pedro de Macorís, Santiago y Samaná) para desarrollar la metodología y cuantificar la producción de agua en cuencas e inundaciones costeras. La provincia de Santo Domingo forma parte de la cuenca del Ozama, la provincia de Santiago es contenida por la cuenca Yaque del Norte, la provincia de San Pedro de Macorís es contenida por la cuenca Higuamo, mientras que Samaná posee una cuenca costera (ver figura 5).

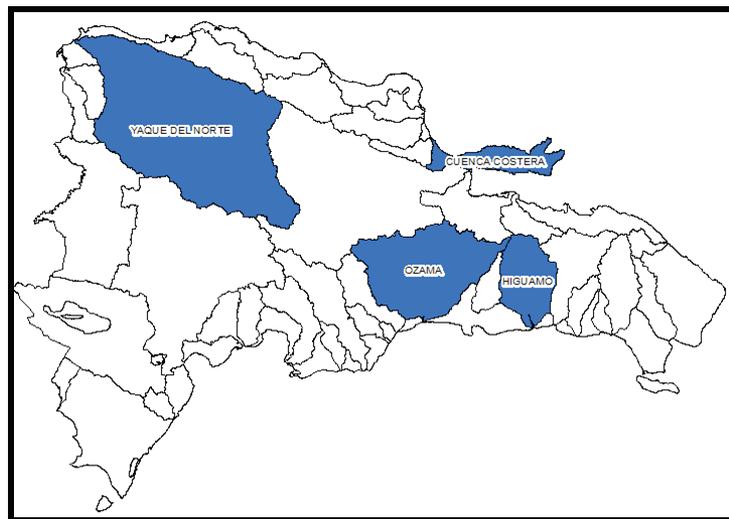


Figura 5. Cuencas hidrográficas que contienen las provincias de interés

- Santo Domingo

La Cuenca del Ozama tiene una superficie de 2,465 km². Para este análisis, la cuenca se dividió en 5 sub-cuencas (figura 6a). La cuenca sur es el área urbana más poblada que correlacionan con una zona impermeable de 90%. Las áreas restantes están compuestas por agricultura y pasto, proporcionando

unos números de curva entre 71 y 74 (ver Figura 6b). El Número de Curva (CN) es un método para determinar la capacidad de infiltración de los suelos. La cuenca norte tiene la mayor elevación del terreno con una pendiente de la cuenca que van entre 6 y 8 grados, mientras que el lado sur tiene una pendiente de aproximadamente 1.78 grados (ver figura 6c).

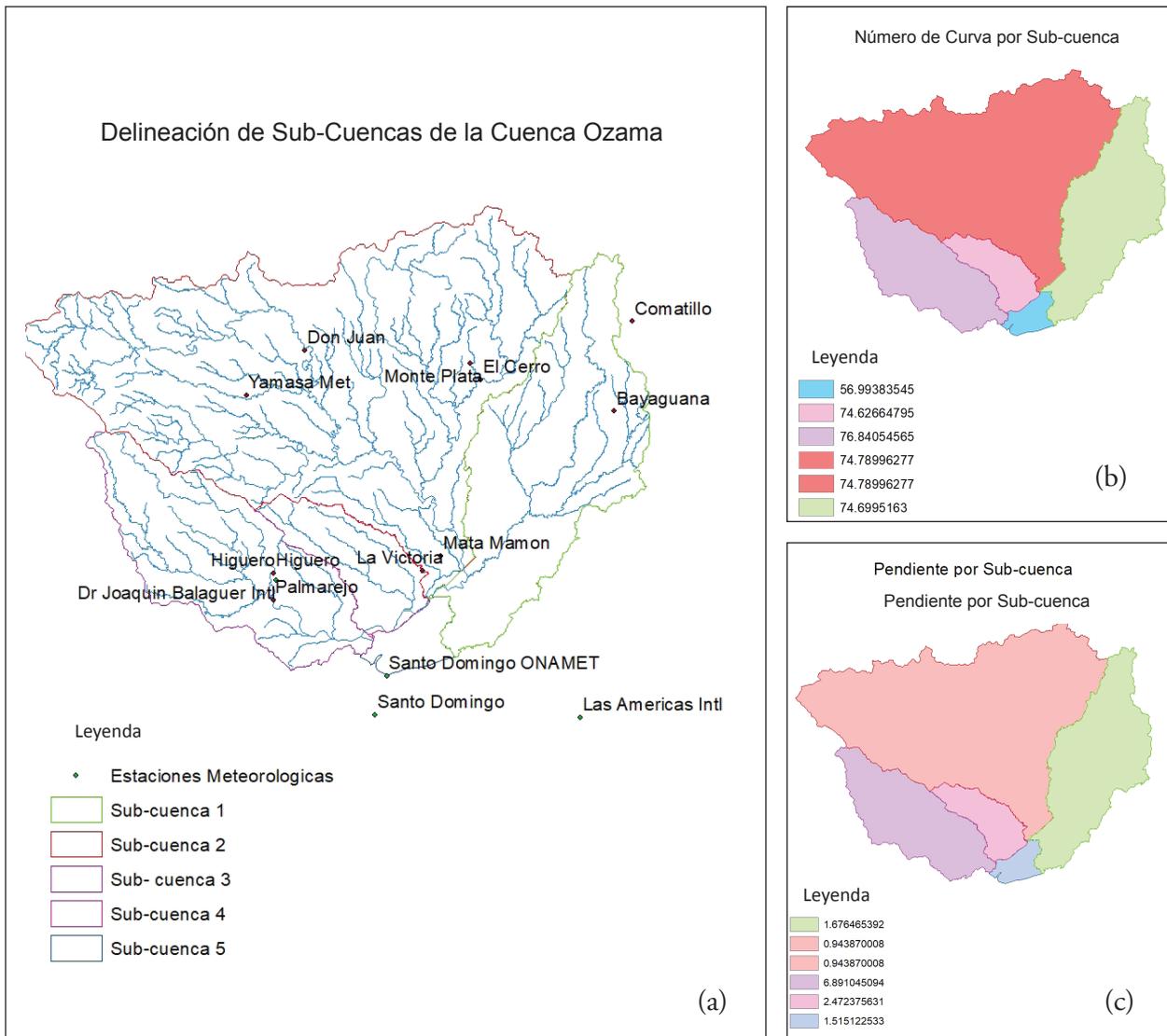


Figura 6 (a) Sub-cuencas del Ozama, (b) Número de curva para cada subcuenca, (c) la pendiente en grados para cada subcuenca

- **Samaná**

Según datos suministrados por la Dirección de Información Ambiental y de Recursos Naturales, DIA-RENA (2011), la provincia de Samaná se divide en diez cuencas hidrográficas incluyendo: litoral de Samaná norte, litoral de Samaná al noreste, litoral de Samaná sur, los Haitises, río Yuna, río San Juan, humedal de Yuna, río Limón, río Cantón y arroyo La Tayota. Las áreas totales son 159.8, 154.4, 127.1, 95.6, 71.7, 68.4, 58.3, 25, 6.9 y 112.0 km², respectivamente.

- **Santiago**

La cuenca del Yaque del Norte es la mayor cuenca en República Dominicana, con una superficie de 6,891 km². Se encuentra en la región del Cibao nordeste y en el noroeste del país. El río principal de la cuenca es el río Yaque del Norte que nace en la Cordillera Central a una altura de 2,580 metros sobre el nivel del mar. La longitud del río es de aproximadamente 296 km y su caudal medio es de 60 m³/s. Otros ríos que alimentan el Yaque del Norte son: Jimenoa, Bao, Amina, Mao, Guayubín y Maguaca.

La cuenca se divide en dos zonas que dependen de la elevación. La zona sur contiene la Cordillera Central y la zona norte el Valle del Cibao. Además, la cuenca se divide en seis provincias y 18 municipios. La provincia de Santiago contiene siete municipios; la provincia de Montecristi contiene seis municipios; la provincia de Santiago Rodríguez contiene dos municipios; la provincia de Valverde contiene tres municipios; la provincia de La Vega contiene un municipio, así como la provincia de Dajabón. La figura 7a y 7b muestran el número de curvas por sub-cuencas y la pendiente de la cuenca entera.

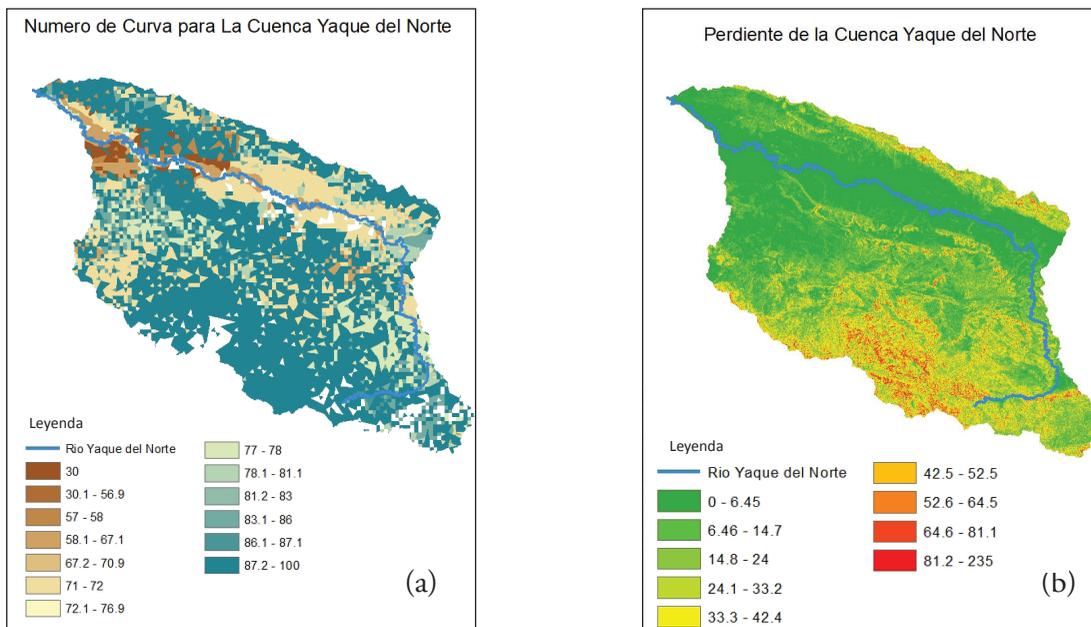


Figura 7 (a) El número de curva por cada sub-cuenca. (b) El mapa ráster de pendiente de la cuenca

- **San Pedro de Macorís**

La provincia de San Pedro de Macorís está localizada al sureste del país. Esta provincia contiene tres ríos y sus afluentes. El río principal de la región este es el río Higuamo, y su desembocadura se encuentra junto a la ciudad de San Pedro de Macorís. Además, la provincia de San Pedro de Macorís contiene el río Soco y el río Cumayasa. El río Soco divide la ciudad de San Pedro de Macorís y el municipio de Ramón Santana; y, el río Cumayasa juega un papel importante en la reproducción de muchas especies marinas. Sin embargo, en este proyecto nos enfocaremos únicamente en el río Higuamo por su cercanía a la zona urbana de la provincia. La cuenca del Higuamo (figura 8) fue dividida en 5 sub-cuencas. La cuenca representa un área de 1,064.47 km² y la cuenca que contiene más área urbana tiene un número de curva 73.11 y una impermeabilidad 10.42%.

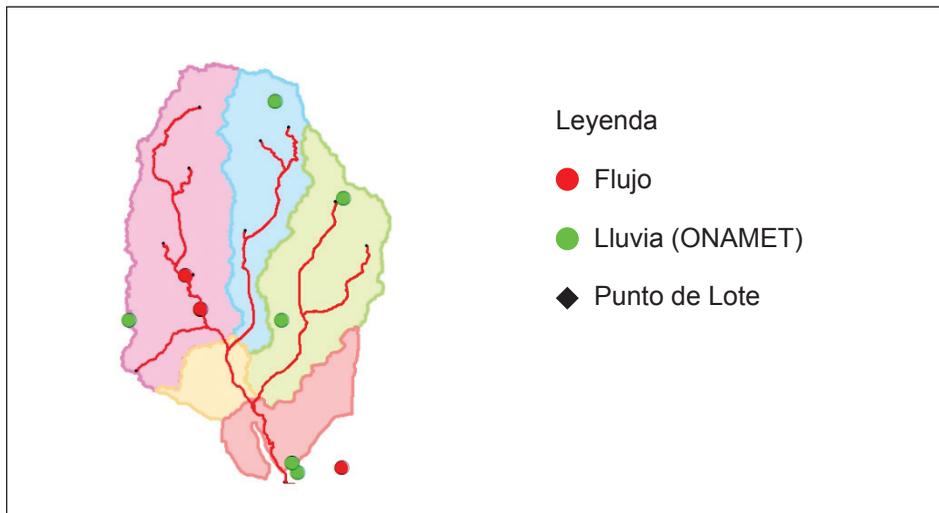


Figura 8 Cuenca del río Higuamo

3.4.2 Balance hídrico

El ciclo Hidrológico es la secuencia de las condiciones a través de la cual el agua pasa, de vapor en la atmósfera, a precipitación y el escurrimiento del agua en la tierra. Una vez que el agua llega al suelo, una parte del agua se evapora en la atmósfera y otra parte del agua se infiltra en el suelo. Más tarde, el flujo por tierra y las aguas subterráneas son descargadas en el océano para cerrar el ciclo. Estos ciclos hidrológicos se pueden modelar mediante el Sistema de Modelaje Hidrológico (HEC-HMS, por sus siglas en inglés). HEC-HMS fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica dentro del Cuerpo de Ejército de Ingenieros de los Estados Unidos. El resultado principal del HEC-HMS es el escurrimiento HEC-HMS y se puede usar junto con otro software para estudiar la disponibilidad de agua, drenaje

urbano, pronóstico de flujo, impacto de urbanización futura, diseño de vertedero de yacimiento, reducción de daños por inundación y regulación de planicies de inundación. Se está desarrollando un modelo de cuencas hidrográficas para la provincia de Santo Domingo y Santiago. Sin embargo, San Pedro de Macorís no se ha considerado para este análisis por la escasez de datos de caudal.

- **Santo Domingo**

El cálculo de infiltración real se realiza por el método de la pérdida, mientras que el método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS, por sus siglas en inglés) fue seleccionado para el cálculo de la abstracción inicial en función del número de curva. El número de curva del método de SCS requiere dos parámetros: curva del número y la superficie impermeable, que se muestran tabla 2 y tabla 3.

Tabla 2 Área impermeable para cada sub-cuenca

Subcuencas	Área Urbana (Mi ²)	Impermeable (%)
1	10.69	5.27
2	2.78	0.53
3	32.48	21.74
4	10.42	20.00
5	17.76	90.20

Tabla 3 Número de curva para cada subcuenca

Sub-cuenca	CN
1	74.70
2	71.37
3	76.84
4	74.63
5	57.00

La precipitación neta para cada sub-cuenca se calculó utilizando la media simple ya que no hay suficientes indicadores de precipitación distribuidos a través de las sub-cuencas para utilizar el método de Thiessen e Isoyetas (ver figura 9). El tiempo inicial de simulación comienza el 1de enero de 1960 y termina el 31 de diciembre de 1982.

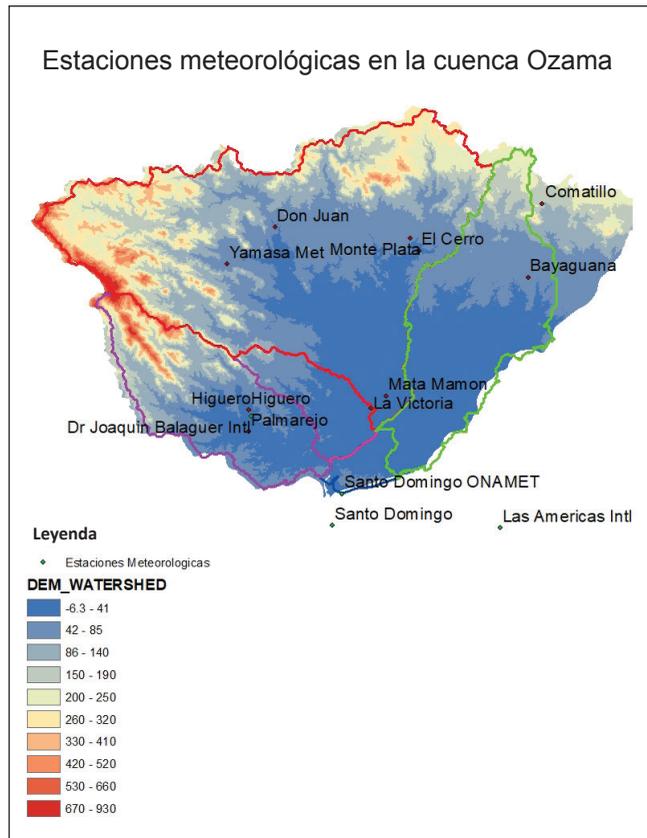


Figura 9 Estaciones meteorológicas de la cuenca del Ozama

El escurrimiento superficial real se calcula utilizando el Hidrograma Unitario del SCS. Este método requiere como entrada el tiempo en minutos, que se calcula utilizando el número de curva, longitud del río más largo y la pendiente media de la cuenca:

$$x = \frac{l^{0.8}(S + 1)^{0.7}}{1900Y^{0.5}}$$

$$S = \left(\frac{1000}{CN}\right) - 10$$

donde x es el tiempo en horas, l es la longitud de flujo (ft), Y es la pendiente del terreno cuenca media (%) y S es la retención potencial máxima (en). Los tiempos de posposición mayor corresponden a sub-cuencas con menor pendiente y áreas más grandes (ver tabla 4).

Tabla 4 Los resultados de tiempo de retraso para cada sub-cuenca

Subcuenca	l (km)	l (ft)	Y (%)	CN	S (in)	x (hr)	x (min)
1	51.66	169497.75	1.68	74.70	3.39	17.45	1631.91
2	93.89	308070.66	3.44	71.37	4.01	21.56	2,098.43
3	47.67	156393.41	6.89	76.84	3.01	7.58	455.12
4	29.52	96858.45	2.47	74.63	3.40	9.20	552.29
5	04.66	15280.19	1.51	56.99	7.54	4.27	487.78

El flujo base se calculó durante la temporada seca durante al menos siete días sin lluvia. En este período, los datos de caudales se extrajeron de caudal durante muchos años. Los caudales para enero, febrero y marzo, se promediaron para obtener un flujo constante de la base. Una limitación importante en la República Dominicana es la evapotranspiración. Se probó la sensibilidad de HEC-HMS para la evapotranspiración. Una simulación sin evaporación fue comparada con otra simulación que incluye estos valores. Los resultados mostraron que la evapotranspiración no juega un papel relevante en el cálculo de la escorrentía. Además, técnicas de enrutamiento/direccionamiento fueron aplicadas para tomar en consideración el almacenamiento de agua en los ríos serpenteantes y la vegetación. Fue seleccionado el método de Muskingum con un tiempo de viaje (K) igual a 0.5 horas y con una ponderación coeficiente de 0.3. La configuración final de la cuenca en HEC-HMS es donde el caudal se estima para cada sub-cuenca, cruce, alcance y acervo (ver figura 10).

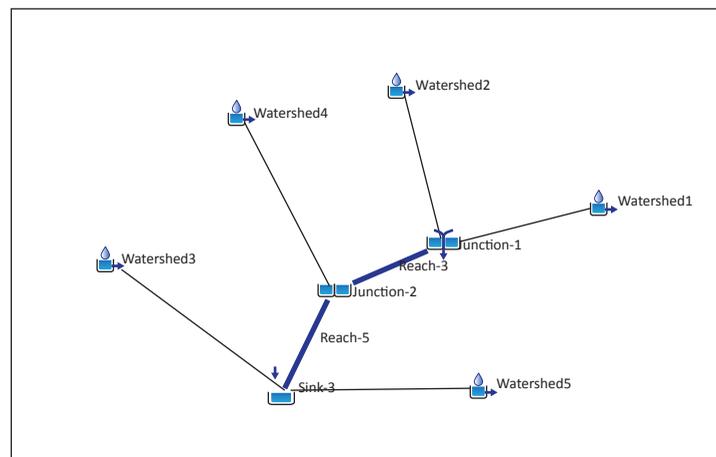


Figura 10 Configuración de la cuenca de Santo Domingo en HEC-HMS

- **Santiago**

Los elementos de la subcuenca representan conceptualmente la infiltración, escurrimiento superficial y procesos sub-superficiales interactuando juntos. Para este modelo, se dividió la cuenca de Yaque del Norte en cuatro subcuencas y se definió el método de pérdida, transformación y flujo de base para cada subcuenca. La subcuenca se distribuye desde el centro del país a la costa donde se localiza la salida. En ese orden, la subcuenca se ordena como sigue: la subcuenca W860 forma parte de la cuenca que se encuentra en la provincia de La Vega. La subcuenca W840 se encuentra en la provincia de Santiago. La subcuenca W640 se encuentra en las provincias de Santiago, Valverde y Santiago Rodríguez. La subcuenca W720 se encuentra en las provincias de Valverde, Santiago Rodríguez, Dajabón y Montecristi. La tabla 5 muestra el área en kilómetros cuadrados que tiene cada una de la subcuencas.

Tabla 5 Áreas cada subcuenca en Km²

Subcuenca	Área (Km ²)
W860	812.86
W840	1,095.4
W640	2,171.6
W720	2,712.6
Total	6,792.46

Se calculó el porcentaje de superficie impermeable en ArcGIS. El área de las zonas urbanas se dividió por el área de la subcuenca y multiplicada por cien. Además, este paso fue hecho para cada subcuenca. El porcentaje de impermeabilidad y el número de curva se presentan en la tabla 6.

Tabla 6 Porcentaje de impermeabilidad y número de curva por subcuenca.

Subcuenca	Número de Curva	% Impermeabilidad
W860	91.849	0.78939
W840	93.251	6.7319
W640	91.154	1.9499
W720	83.675	1.2151

Para cada mes, los flujos/caudales por debajo del valor de percentil 10 fueron promediados. Los promedios mensuales fueron entonces promediados a través de todos los años para obtener los valores constantes que se muestran en la tabla 7. El método de Muskingum Cunge se utilizó para calcular la ruta/dirección. El Coeficiente de Manning el cual toma en cuenta la rugosidad de la pared para el cál-

culo de la velocidad del agua, este coeficiente para canal natural es 0.04, y con una forma trapezoidal se calculó la pendiente de fondo ancho y lateral de cada alcance. Los resultados se muestran en la tabla 8.

Tabla 7 Caudal mensual para el método de direccionamiento

Mes	Caudal (m ³ /s)
Enero	9.85
Febrero	8.47
Marzo	7.75
Abril	7.66
Mayo	11.85
Junio	14.6
Julio	10.52
Agosto	9.32
Septiembre	10.94
Octubre	13.96
Noviembre	14.36
Diciembre	13.77

Tabla 8 Método de Muskingum Cunge

Alcance	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Manning's n	Forma: Trapezoidal	
				Ancho de fondo (m)	Pendiente lateral (xH:1V)
R20	18083.3	0.000937	0.04	21.875	1.902
R40	20784.66	0.000245	0.04	13.7931	2.3046
R50	16528.95	0.000232	0.04	38.88	3.5478
R80	16864.4	0.000417	0.04	34.6154	2.9822
R90	14294.03	0.000288	0.04	15.625	2.3797
R100	17452.43	0.000499	0.04	35.2941	3.7691
R110	4456.719	0.000439	0.04	33.33	0.6545
R130	7788.015	0.000293	0.04	29.41	4.6064
R150	21426.52	0.000594	0.04	20	2.7716
R160	6236.19	0.000268	0.04	1705	1.9209
R220	52063.48	0.001249	0.04	28.33	4.0451
R290	24448.38	0.004952	0.04	30	3.5165

3.4.3. Validación de HEC-HMS

- Santo Domingo

No hay datos de medidores de flujo cerca de las uniones o sumideros/acervos en HEC-HMS para validar correctamente el modelo. Los puntos más cercanos son la estación del arroyo Palmarejo y la salida de la sub-cuenca 3 (delineada por el polígono rosado, figura 11). En la figura 10, el círculo azul claro representa la salida de la subcuenca 3 y el círculo verde calibrador de corriente de Palmarejo.

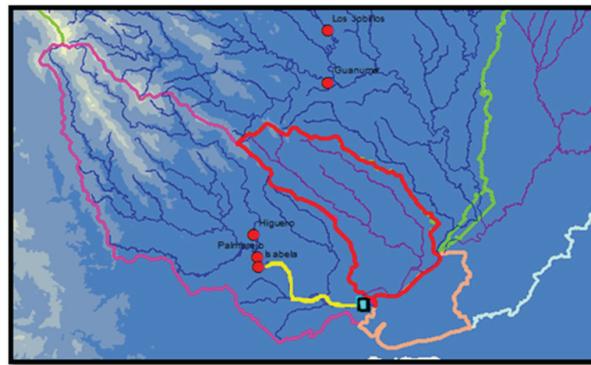


Figura 11 Medidor de flujo de Palmarejo y ubicación de la salida de la subcuenca 3.

El caudal observado es menor que el modelado, ya que el modelo a la salida de la sub cuenca 3 proporcióna el flujo total de agua recogido en la sub cuenca, mientras que los datos registrados provienen de un río tributario. Sin embargo, la figura 12 señala una tendencia similar en los flujos bajos y máximos con diferencia en las magnitudes, como era de esperarse.

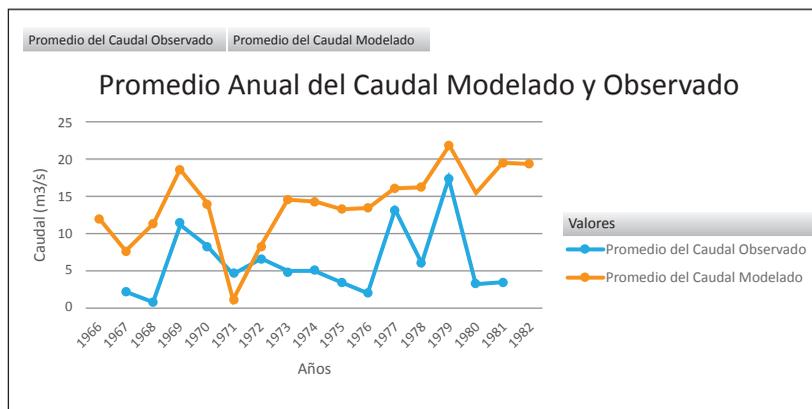


Figura 12 Comparación del caudal del río modelado y observado

Por otra parte, el modelo se validó utilizando el índice de la ecuación de acuerdo. El índice de acuerdo d fue propuesto por Willmott (1981) [24] para superar la insensibilidad de E y de R^2 a las diferencias en los promedios y varianzas observados y pronosticados (Legates y McCabe, 1999)[26]. El índice de concordancia representa la relación entre el cuadrado medio del error y el error potencial. Este índice fue utilizado porque el error potencial en el denominador representa el mayor valor que puede alcanzar la diferencia de cuadrados de cada par. Con el cuadrado medio del error en el numerador d es también muy sensible a los flujos máximos e insensible para condiciones de bajo flujo como es E .

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

O_i representa el caudal observado o el caudal medido por las estaciones de flujo de corriente.

representa el caudal pronosticado o el caudal generado por el modelo. El índice de acuerdo estimado fue de 0.51, lo que significa que la correlación entre el caudal observado y modelado es aceptable. Como R^2 , d se encuentra entre 0 (ninguna correlación) y 1 (ajuste perfecto).

- Santiago

El período de tiempo se modificó y se observó el comportamiento del flujo simulado por el modelo con los datos observados del medidor de flujo real en ese período de tiempo. Para validar el modelo hidrológico, se utilizó un período de tiempo desde el 1992 hasta 1994. Este período fue seleccionado porque es el marco de tiempo más cercano al presente del que se dispone de información. Esto puede ser un problema porque no hay datos suficientes para comparar el flujo simulado y el observado. La siguiente figura muestra un período de flujo de vapor observado de un año entre 1992 y 1993, que se compara con el flujo simulado en la figura 13, y tiene un R^2 de 0,45.

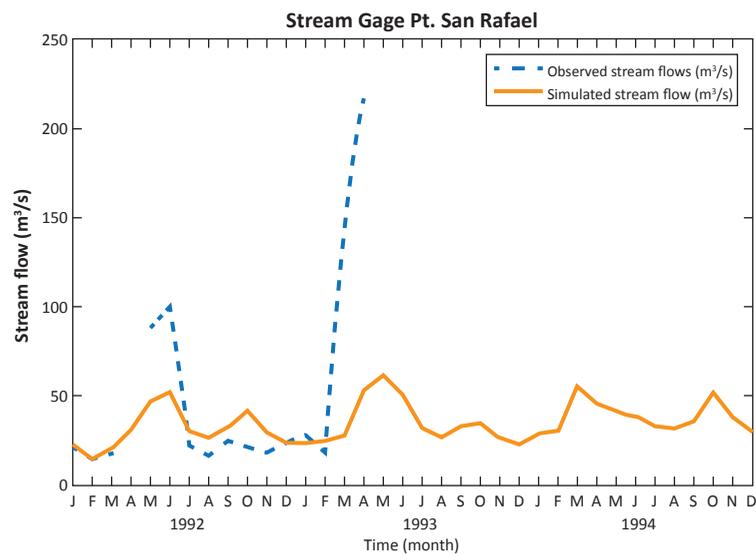


Figura 13 Flujo mensual observado y simulado para período de validación en la estación seleccionada en el río Yaque del Norte - Puente San Rafael

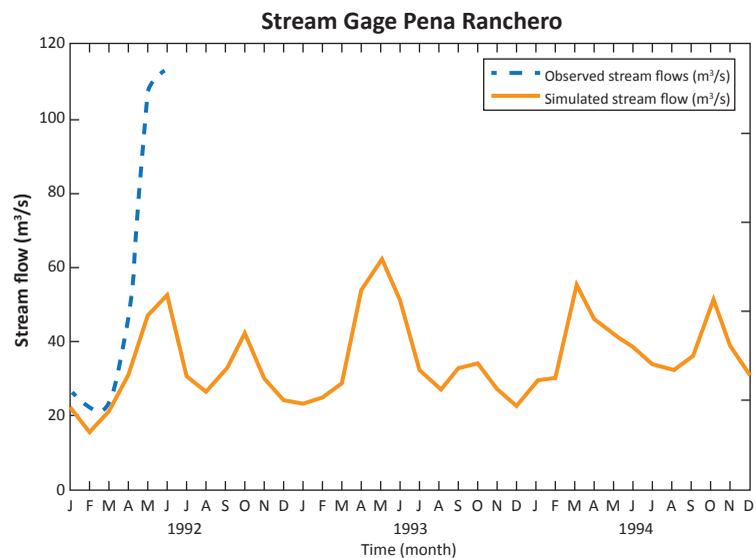


Figura 14 Flujo mensual observado y simulado para período de validación en la estación seleccionada en el río Yaque del Norte - Pena Ranchero

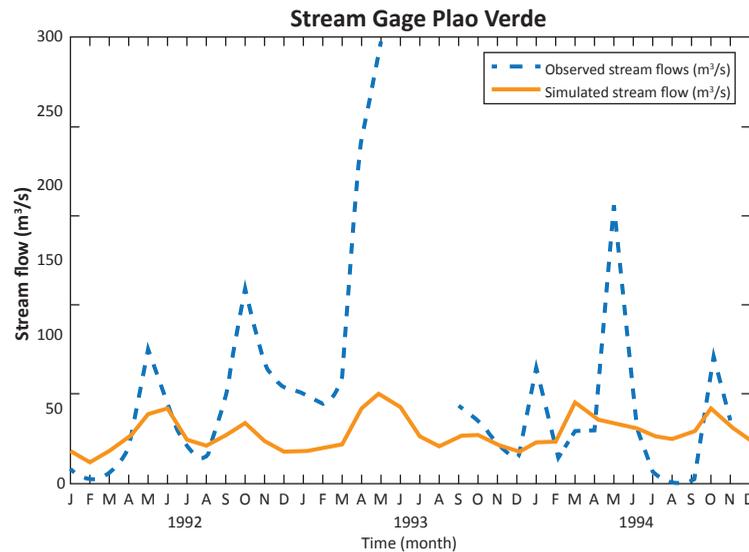


Figura 15 Flujo mensual observado y simulado para período de validación en la estación seleccionada en el río Yaque del Norte - Palo Verde

La tabla 9 muestra el resumen estadístico de la comparación entre los valores de flujo simulados y observados para el período de validación. Se presentan grandes diferencias en los caudales medios del flujo simulado con respecto al flujo de las estaciones. El caudal observado de las diferentes estaciones está en el rango de 51 a 60 m³ / s. Del mismo modo, como se mencionó anteriormente, el error absoluto medio (MAE) y el error cuadrático medio (RMSE) se utilizan para medir la desviación entre las salidas del modelo y los flujos observados; se observa que el MAE muestra una desviación menor que el RMSE (RMSE > MAE). El coeficiente Nash-Sutcliffe (E) observado en la validación es menor en comparación con los valores de la calibración para este coeficiente. Esto se puede explicar porque no tenemos muchos puntos de coincidencia entre el flujo observado y simulado que afectan la medición del coeficiente. El cuadrado R (R²) es mayor que 0.38 para todas las estaciones. Esto significa que los pocos puntos que coinciden entre el flujo de flujo observado y simulado tienen una correlación aceptable.

Tabla 9 Resumen estadístico de la comparación entre los valores de flujo simulados en HEC-HMS y observados para el período de validación en 3 estaciones de medición en el Yaque del Norte, desde enero 1983 a diciembre 1989. Período de calibración

	Q mean	STDEV	MAE	RMSE	Coeficiente Nash-Sutcliffe	R ²
Q simulado	34.7048	11.20861	-	-	-	-
Medidor de flujo Palo Verde	60.99594	66.10407	38.11476	63.58409	0.041426	0.389
Medidor de flujo Pena Ranchero	55.87	43.9289	24.46174	36.24398	0.183131	0.961
Medidor de flujo Puente San Rafael	51.7625	58.91588	28.45483	54.21468	0.096771	0.449

3.5 Análisis de inundaciones para Santo Domingo

El análisis se ha dividido en dos secciones. La primera parte del análisis consiste en el desarrollo de un análisis de frecuencia para determinar caudales extremos en el Río Ozama. Este análisis requiere información de caudales diarios del río Ozama y sus afluentes, los cuales fueron proporcionados por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI). La figura 16, obtenida del Plan Hidrológico Nacional por INDRHI, muestra la localización de las estaciones de caudal y sus respectivos períodos de datos. En este análisis fue necesario seleccionar un período común (1967-1982) entre las estaciones para obtener el caudal total del río en el área de análisis. Este período fue seleccionado debido a que todas las estaciones compartían el mismo período de tiempo, siendo este uno de los más completos. Posteriormente, los caudales de los afluentes fueron acumulados para obtener el caudal total del río en la zona de interés durante el período de análisis.

Asimismo, fueron estimados los caudales correspondientes a diferentes períodos de retorno (25, 50, 75, y 100 años), utilizando los caudales máximos anuales y aplicándoles la distribución de Log Pearson III. Esta distribución estadística es ampliamente utilizada en el análisis de frecuencia de caudales máximos y recomendada por el Servicio Geológico de USA (USGS) (Oregon State University, 2002).

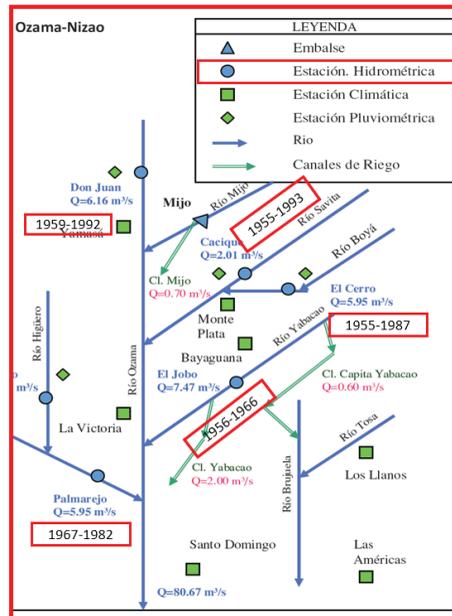


Figura 16 Diagrama Topológico de la región Hidrográfica Ozama-Nizao

La segunda parte del proyecto se desarrolló utilizando Sistema de Información Geográfica (GIS) y HEC-RAS (Sistema de Análisis de Ríos). HEC-RAS es un software desarrollado por el *Hydrologic*

Engineering Center. Este software permite al usuario desarrollar cálculos para flujos constantes de una dimensión, flujos no permanentes de una y dos dimensiones, transporte de sedimentos, entre otros análisis (*US Army Corps of Engineers Website*). Los datos requeridos en esta parte del proyecto fueron: una imagen aérea de la zona y un modelo digital de elevación (DEM, por sus siglas en inglés) obtenidos del USGS. Utilizando la herramienta ArcMap de ArcGIS, fue posible diseñar la geometría del río y obtener las secciones transversales del río Ozama. El perfil de elevación de cada sección transversal fue comparado con los perfiles proporcionados por *Google Earth* para validar los valores obtenidos del DEM. La figura 17 muestra las secciones transversales del río Ozama.

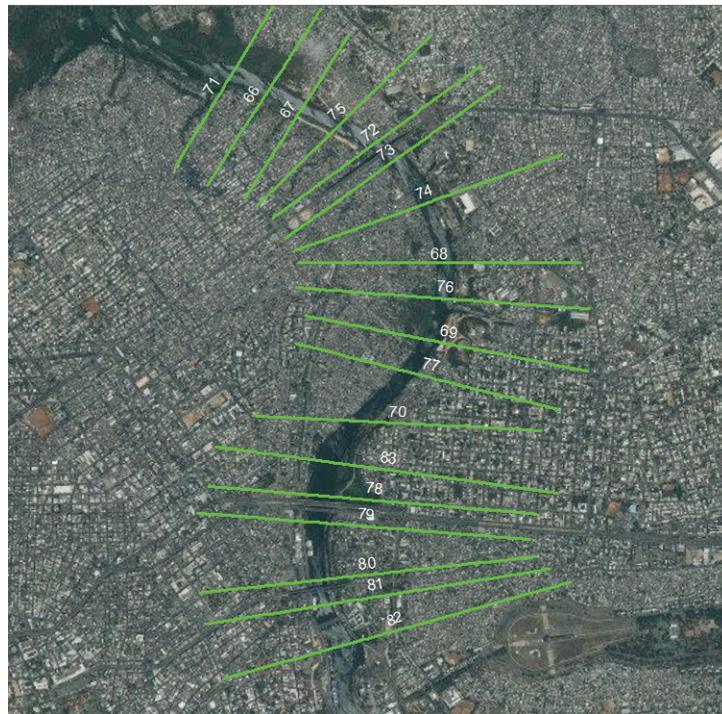


Figura 17 Muestra las secciones transversales perpendiculares al río Ozama

Esta información fue importada en HEC-RAS. Este sistema de modelación de ríos está dividido en varios componentes. Dos componentes fueron utilizados en este trabajo, en el primer componente se define la geometría de las secciones del río y de los puentes, mientras que en el segundo componente se establece los caudales a analizar. En el tramo del río seleccionado se encuentran dos puentes principales, Francisco del Rosario Sánchez y Juan Bosch, cuyas dimensiones y áreas de obstrucción de flujo se introdujeron en HEC-RAS teniendo en cuenta las pilastras, la longitud y ancho del puente, así como su altura máxima y mínima, tal como se muestra en la figura 18. La tabla 10 muestra los datos considerados para cada puente. Estos datos fueron proporcionados por el Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOPC). La tabla 10 presenta los valores asumidos en nuestro análisis. La pendiente

del río Ozama en el tramo seleccionado es 0.000414, la cual caracteriza un flujo sub crítico, es por ello que se seleccionó como condición de frontera una profundidad normal. Además, el número de Manning fue estimado usando imágenes aéreas para determinar la aspereza del suelo. Para la sección central del rio se asumió un cauce natural siendo el número de Manning, 0.040. Las secciones adyacentes se caracterizaban con cierta concentración de árboles, cemento, y casas. Los valores de Manning asignados para estos se muestra en la tabla 10.

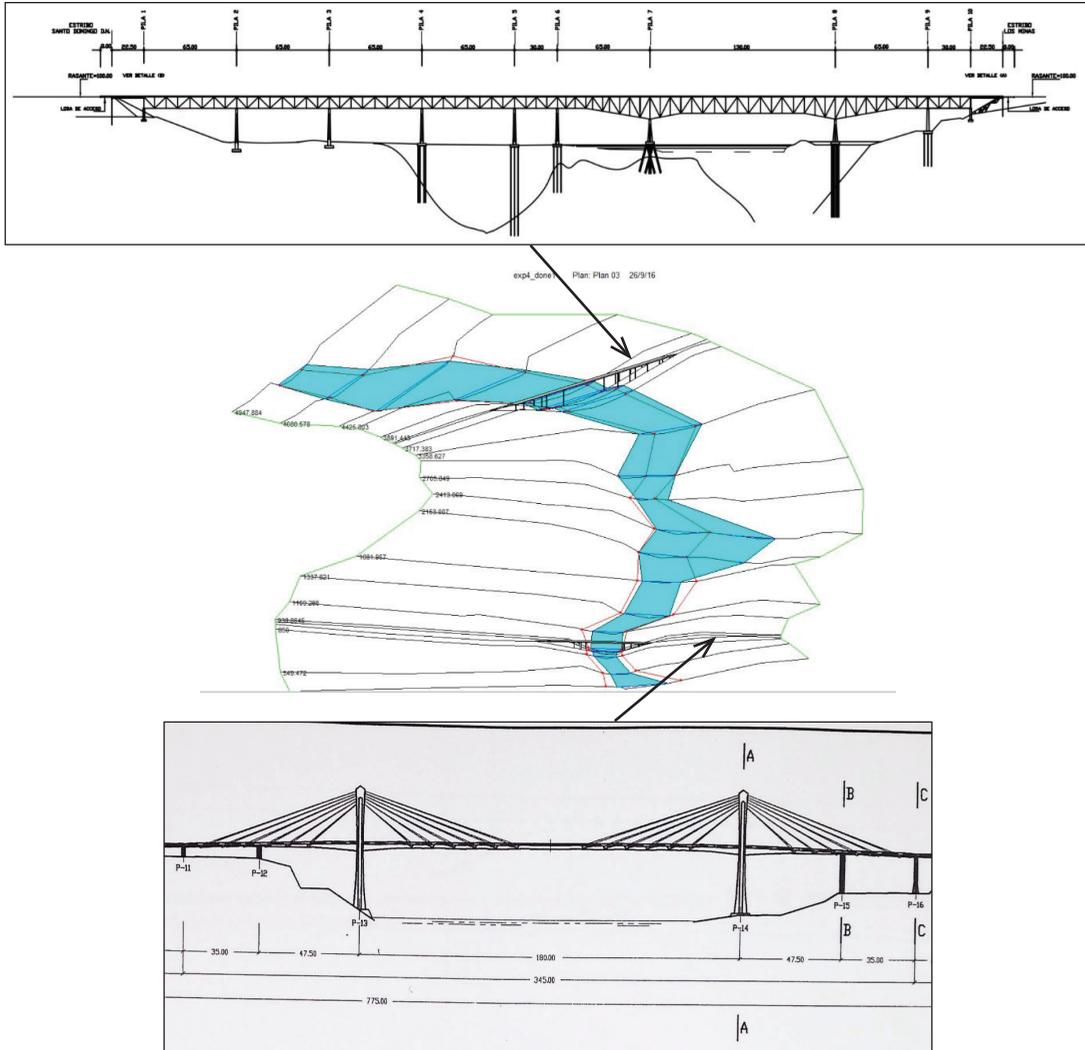


Figura 18 Puentes Francisco del Rosario Sánchez y Juan Bosch y sus respectivas localizaciones en el modelo

Tabla 10 Características generales de los puentes introducidos al modelo de HEC-RAS

Puente Francisco del Rosario Sánchez	Puente Juan Bosch
10 muelles	5 muelles
Ancho de muelles (3.45-3.47 m)	Ancho de muelles (1.5-4.4 m)
Distancia (99.1 m)	Distancia (123.47 m)
Distancia del puente (21.06 m)	Distancia del puente (32.11 m)
Coefficiente de Presa o Dique (2.6 m)	Coefficiente de Presa o Dique (1.4m)
Cuerda alta (39 m)	Cuerda alta (24 m)
Cuerda baja (37.5m)	Cuerda baja (22.5 m)

Tabla 11 Valores asumidos en el modelo de HEC-RAS

Coefficiente de Contracción	0.1
Coefficiente de Expansión	0.3
Número de Manning	
Concreto	04
Árboles	0.05
Flujo Constante	
Profundidad Normal	0.000414
Flujo Subcrítico	

En el segundo componente utilizado en HEC-RAS se introdujo una serie de caudales máximos anuales. Estos caudales máximos corresponden a períodos de retorno de 25, 50, 75 y 100 años, de este modo se genera en HEC-RAS un perfil para cada período de retorno. El perfil número uno corresponde al caudal máximo correspondiente a 25 años, el perfil número dos corresponde a 50 años, el perfil número 3 a 75 años y el perfil número 4 a 100 años.

4. Resultados

Un Downscaling estadístico fue aplicado para los datos de la estación meteorológica (temperatura del aire y precipitación) para corregir el sesgo del resultado numérico del CCSM4 en la República Dominicana. Utilizando la temperatura proyectada de aire y lluvia, sequías y olas de calor se proyectaron en el país a lo largo del siglo XXI y en los escenarios RCP4.5. Además, la producción de agua en la cuenca del Ozama en Santo Domingo fue obtenida mediante HEC-HMS, así como inundaciones costeras asumiendo dos elevaciones de mar posibles. Además, los pronósticos de WRF fueron probados como parte del proceso de automatización de pronósticos.

4.1 Aumento del nivel del mar en la República Dominicana

Mapas de inundación de costas fueron desarrollados para cuatro años (2025, 2050, 2075, y 2100) y para cinco provincias de la República Dominicana. Las figuras 19, 20, 21 y 22 muestran la penetración del mar en las provincias de Samaná, Puerto Plata, Barahona, Santo Domingo, y San Pedro de Macorís para los años 2025, 2050, 2075, y 2100, respectivamente.

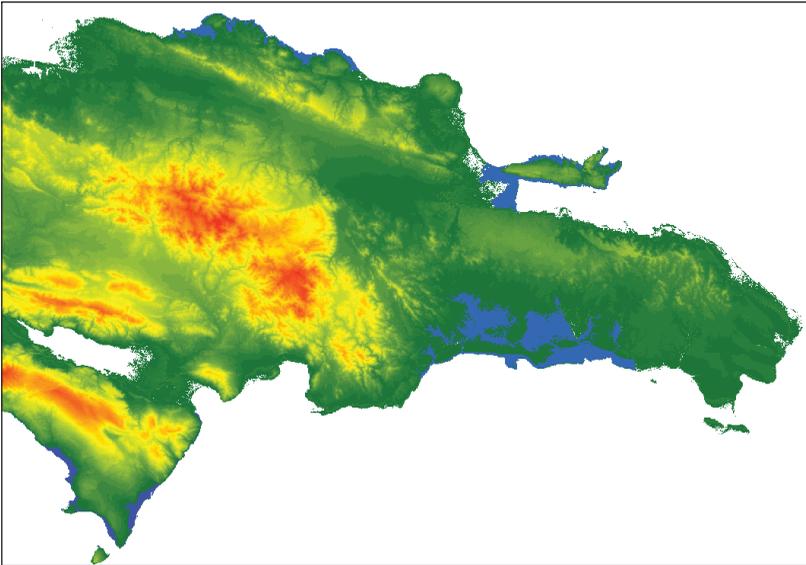


Figura 19 Penetración del mar en Samaná, Puerto Plata, Barahona, Santo Domingo y San Pedro de Macorís para el año 2025

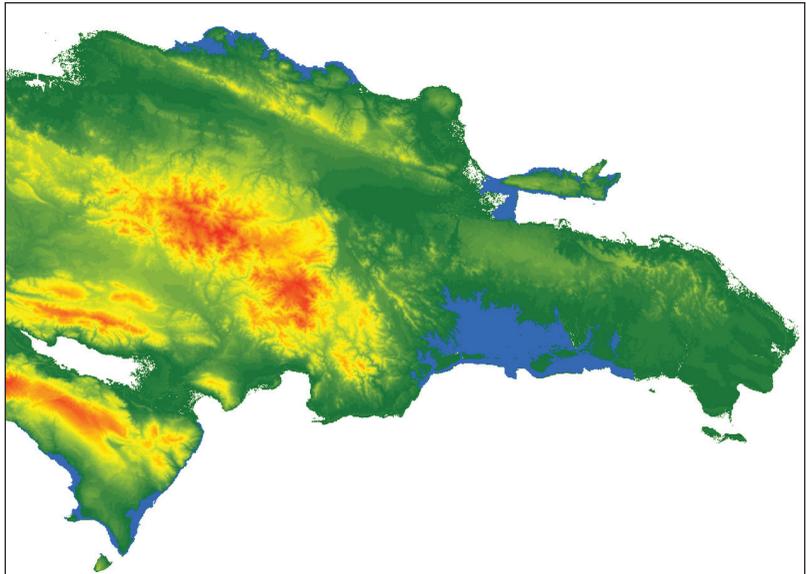


Figura 20 Penetración del mar en Samaná, Puerto Plata, Barahona, Santo Domingo y San Pedro de Macorís para el año 2050

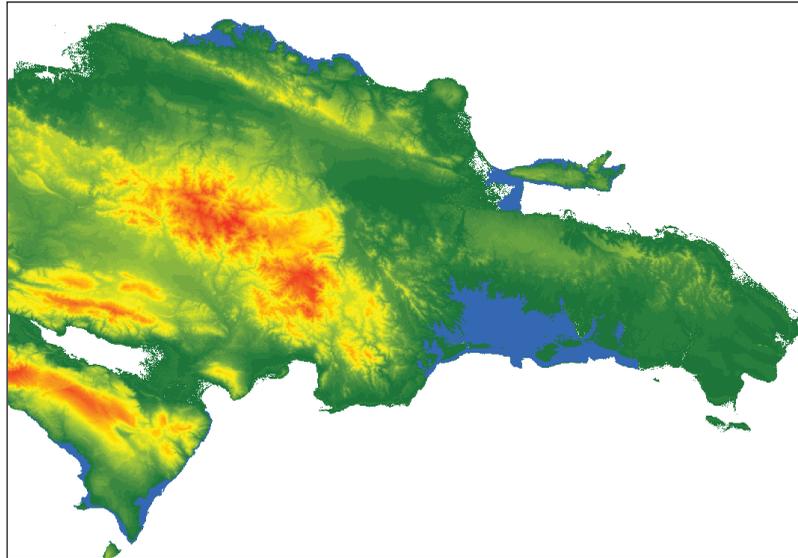


Figura 21 Penetración del mar en Samaná, Puerto Plata, Barahona, Santo Domingo y San Pedro de Macorís para el año 2075

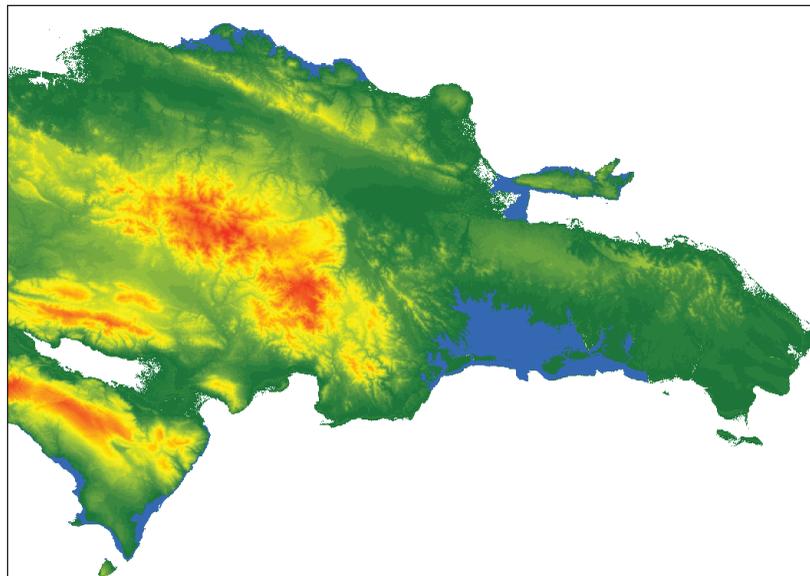


Figura 22 Penetración del mar en Samaná, Puerto Plata, Barahona, Santo Domingo y San Pedro de Macorís para el año 2100

4.2 Eventos de sequía en la República Dominicana

4.2.1 Eventos de sequía en el presente

Los datos de precipitación de la estación meteorológica se utilizaron para analizar los eventos de sequía para detectar variabilidad larga a escala local. Santo Domingo, Santiago y Samaná fueron considerados en el análisis representando diferentes características climáticas.

Las series de tiempo del índice de sequía a largo plazo con un tamaño de ventana de 3 meses identificó sequías extremas en 2013 y 2014 en Santo Domingo, mientras que las sequías graves fueron detectadas en 2005, 2010 y al final del año 2013. Un SPI con un tamaño de ventana de 12 meses proporciona la evolución anual de sequía y en Santo Domingo muestra una fluctuación alrededor de un SPI igual a cero pero con una clara intensificación en 2014 (ver figura 23). La provincia de Santiago denota una tendencia a disminuir eventos de sequía con sequías extremas concentradas entre los años 1990 y 1993. Desde el 1998, los eventos de sequía disminuyen sustancialmente con algunos eventos de sequía moderada. El SPI anual demuestra claramente esta tendencia con una tendencia positiva del SPI de 0.04 por año (ver figura 24). En contraste, la provincia de Samaná tiene amplia fluctuación de SPI alcanzando sequías extremas en el 2000, 2001 y 2010. Desde el año 2005 se registraron en Samaná un número reducido de sequías moderadas, pero después del 2010, nuevos episodios de sequía son detectados con una tendencia a intensificarse, como se muestra en la serie de tiempo SPI anual (ver figura 25).

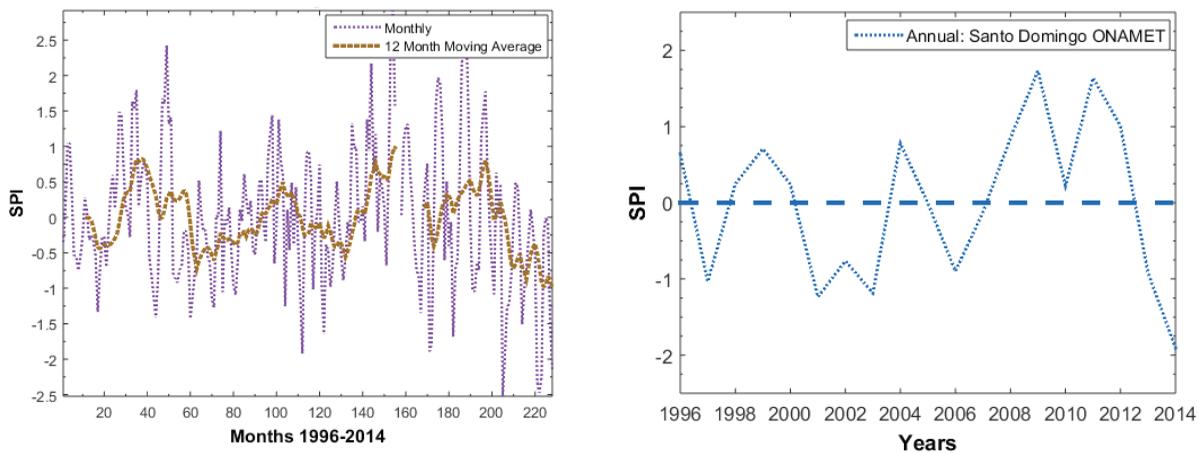


Figura 23. Serie de tiempo del Índice de SPI para SPI 3 meses corriendo, y SPI anual en Santo Domingo

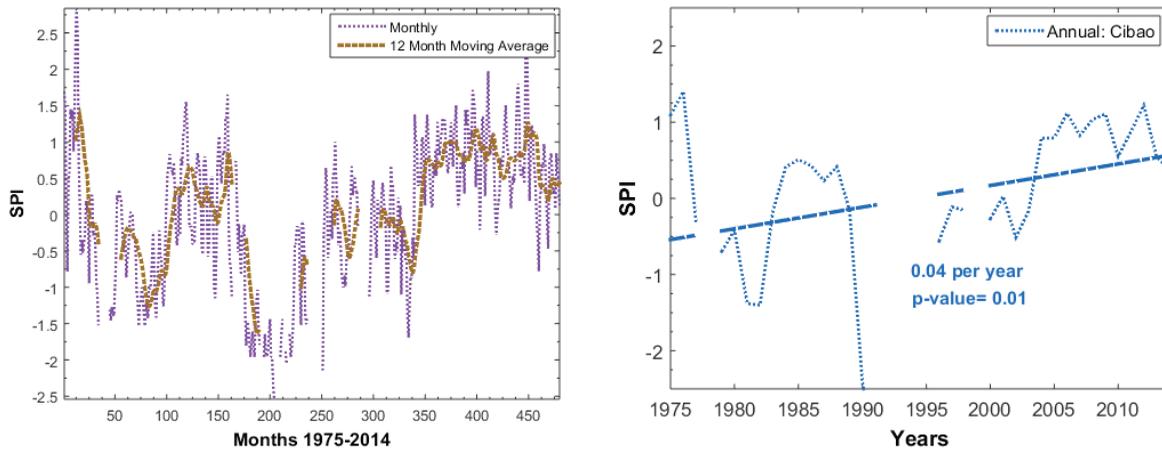


Figura 24. Serie de tiempo del Índice de SPI para SPI 3 meses corriendo y SPI anual en Santiago, Cibao

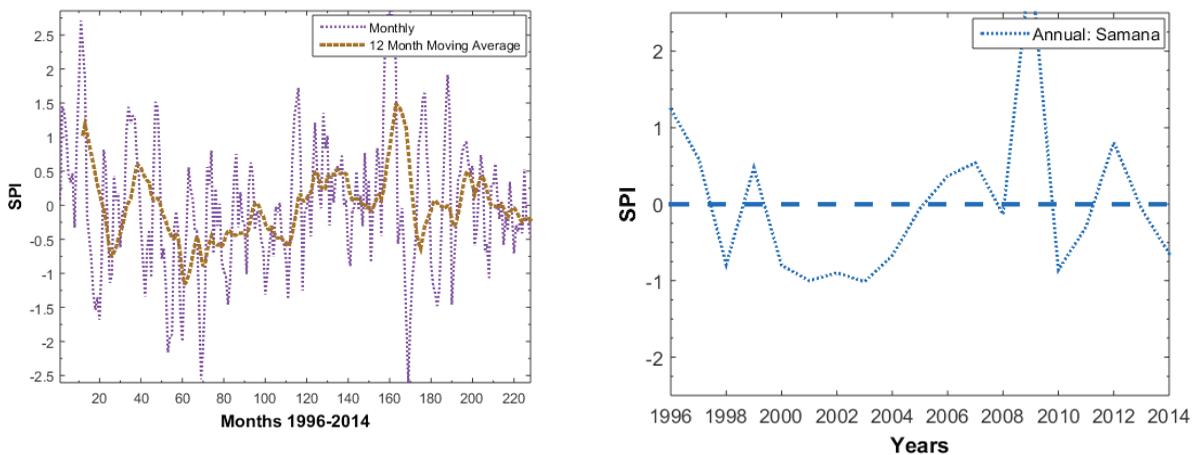


Figura 25 Serie de tiempo del Índice de SPI para SPI 3 meses corriendo y SPI anual en Samaná

El cálculo del índice de sequía se dividió en dos períodos climáticos de acuerdo con el registro de tiempo disponible. Santo Domingo muestra un cambio en la intensidad de sequía cuando se comparan los períodos 1996-2005 y 2006-2014. En el primer período, hay una mayor probabilidad de tener eventos de sequías leves y moderados (0.5). En el segundo período, hay una mayor probabilidad de que se desarrollen eventos húmedos (0.39), pero también se presenta la probabilidad para que se desarrollen sequías extremas (figura 26a). Además, el cálculo del SPI usando los datos del Centro de Datos Climático Nacional (NCDC, por sus siglas en inglés) de la NOAA en Santo Domingo se asemeja a la intensificación de la sequía así como la tendencia a haber vientos húmedos observados en la estación de tierra de la Oficina Nacional de Meteorología (ONAMET) (figura 26b).

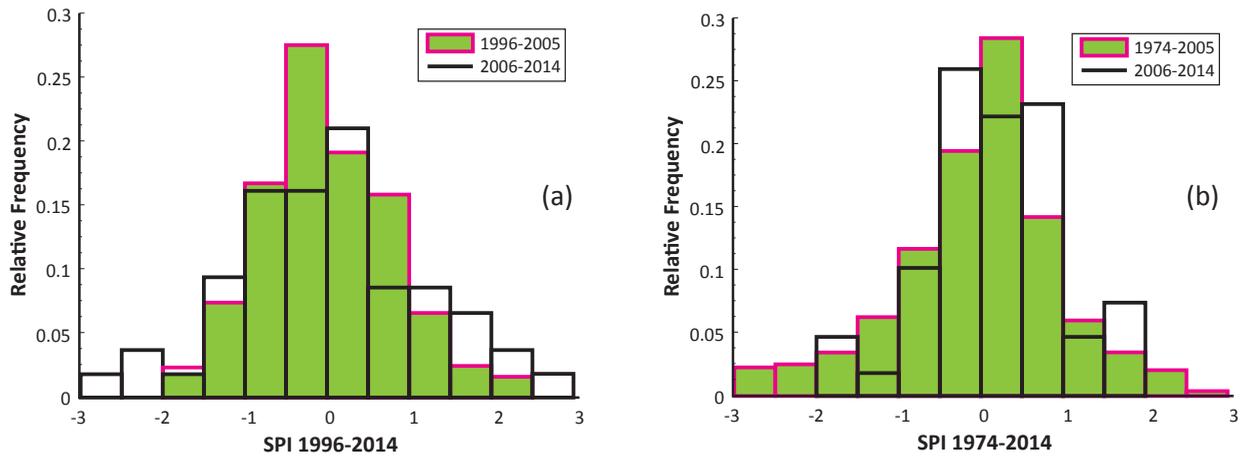


Figura 26 (a) Frecuencia de SPI para Santo Domingo – estación de ONAMET y (b) Santo Domingo - estación de NCDC

El análisis de frecuencia en Santiago señala una intensificación de eventos húmedos en el segundo período (2006-2014) y una sequía menos intensa con una probabilidad de 0.01 y 0.03 para que se desarrollen sequías extremas y severas, respectivamente (ver figura 27). El primer período (1996-2005) se caracteriza por una alta probabilidad de que se desarrolle una sequía severa y moderada (0.29). De manera similar, Samaná muestra una disminución en la probabilidad que se desarrollen sequías extremas (0.03) y sequías severas (0.03) en el segundo período, pero con mayor probabilidad que se desarrollen sequías leves (0.3), mientras que en el primer período (1996-2005), sequías moderadas y graves son más pertinentes (ver figura 28).

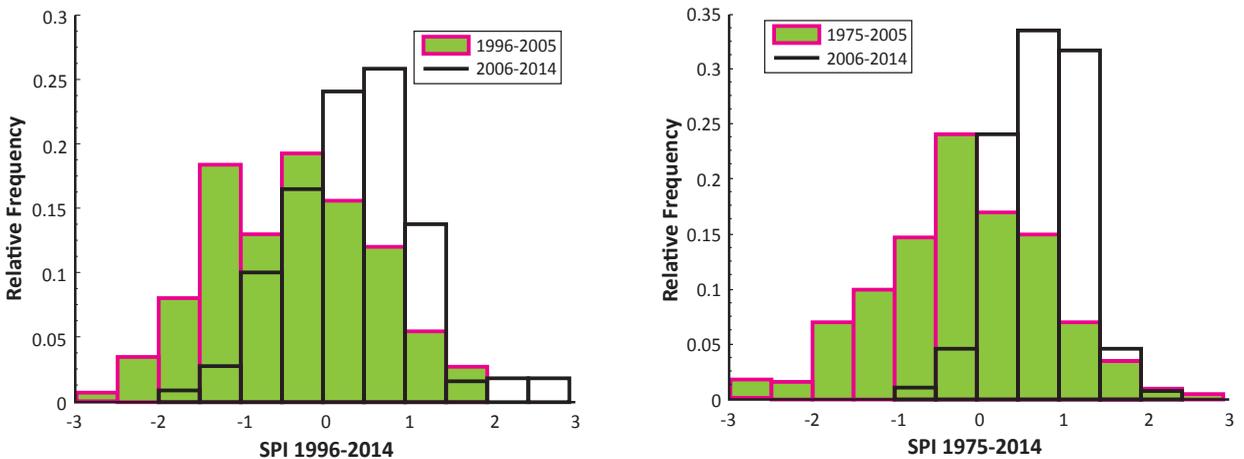


Figura 27. Frecuencia de SPI para Santiago – estación de ONAMET y Cibao – estación de NCDC.

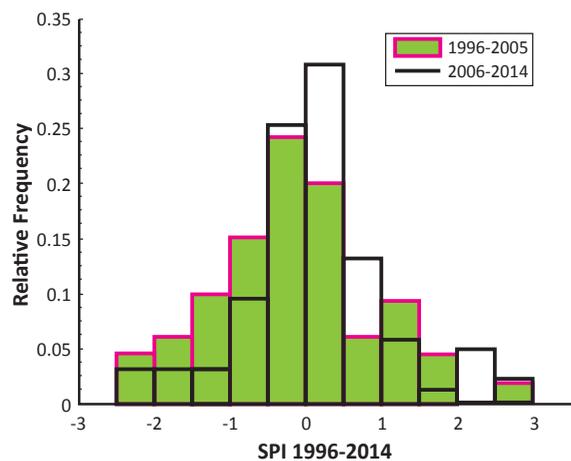
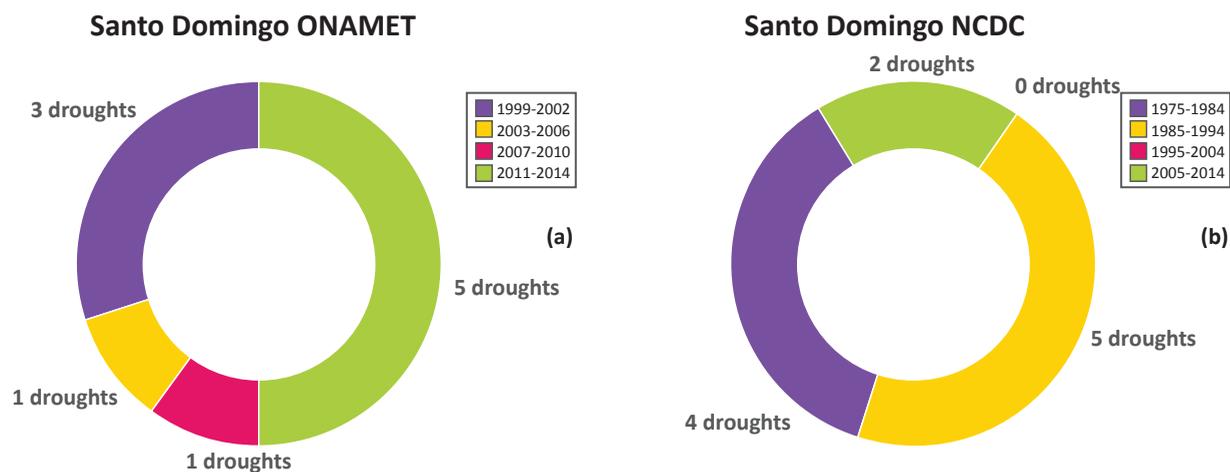


Figura 28. Frecuencia de SPI para Samaná - estación de ONAMET

Aunque el análisis de la frecuencia proporciona la probabilidad y la frecuencia a eventos de sequía, no proporciona la evolución del número de sequías en el país. Reuniendo las sequías leves, moderadas, severas y extremas, la evolución temporal de la sequía se cuantificó en varios períodos de acuerdo con el expediente del tiempo disponible. La provincia de Santo Domingo denota una tendencia a disminuir eventos de sequía hasta el 2004, pero más adelante se observa una intensificación con 5 sequías en la estación de ONAMET en Santo Domingo (figura 29a). Santiago muestra una disminución en los episodios de sequía con 0 eventos en los últimos cuatro años (estación de ONAMET), pero con mayor y más rápida disminución en el Cibao (ver figura 29c y d). Asimismo, Samaná muestra una disminución en los eventos de sequía en los últimos cuatro años, pero no demasiado rápido como el caso de Santiago (figura 30).



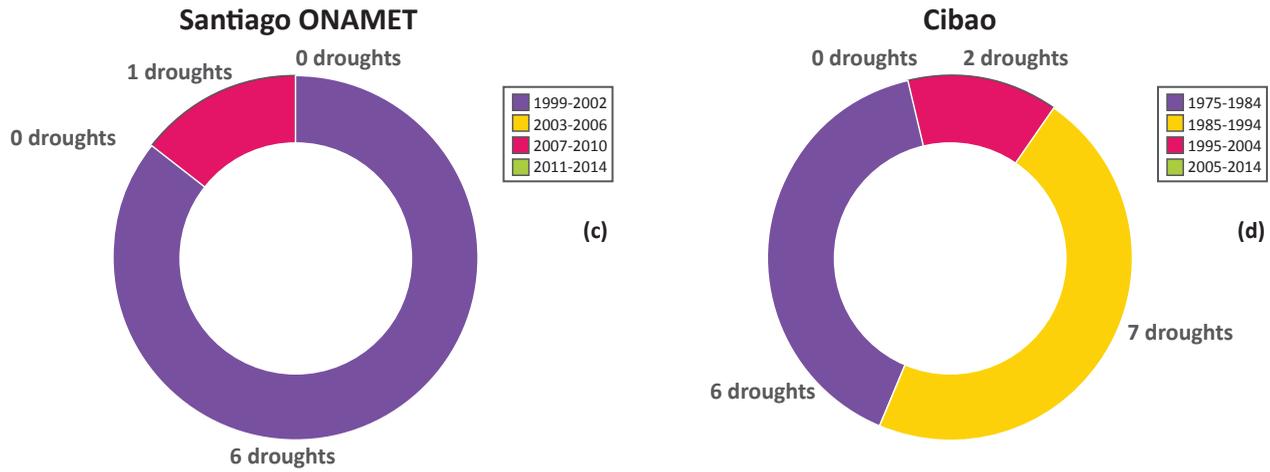


Figura 29 Evolución temporal de las sequías para (a) Santo Domingo - estación de ONAMET, (b) Santo Domingo - estación de NCDC, (c) Santiago - estación de ONAMET, y (d) Cibao - estación de NCDC

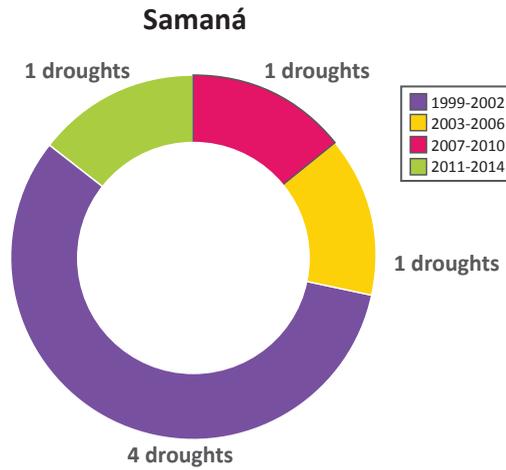


Figura 30. Evolución temporal de las sequías para Samaná - estación de ONAMET

4.2.2 Proyecciones de sequías

Eventos de sequía se proyectaron a lo largo del siglo XXI utilizando el modelo de clima CCSM4 y los escenarios RCP4.5. El downscaling estadístico fue aplicado para los resultados del CCSM4 utilizando los datos de lluvia de Santo Domingo, Santiago y Samaná.

- **Santo Domingo**

En Santo Domingo, CCSM4 proyecta una disminución en la tendencia de SPI a una tasa de 0.01 por año, que se traduce en una tendencia a intensificar las sequías. La prueba de Mann-Kendall determina un significado estadístico adecuado (figura 31a). Además, el análisis de frecuencia muestra un aumento futuro de probabilidad para que se desarrollen sequías leves (0.35) y sequías severas (0.04) en el segundo período (2058 - 2100). En el primer período futuro (2016 - 2057) predominan las sequías leves y moderadas (véase la figura 31b). Además, el desarrollo de sequías suaves a sequías extremas fue dividido en períodos de 15 años. El número de sequías aumenta continuamente desde el 2016 hasta 2085, con 8 eventos del 2071 a 2085, pero en los últimos 15 años (2086-2100) comienzan a disminuir a 6 eventos que corresponden con una tendencia a estabilizar la concentración de CO₂ en la atmósfera (figura 31c).

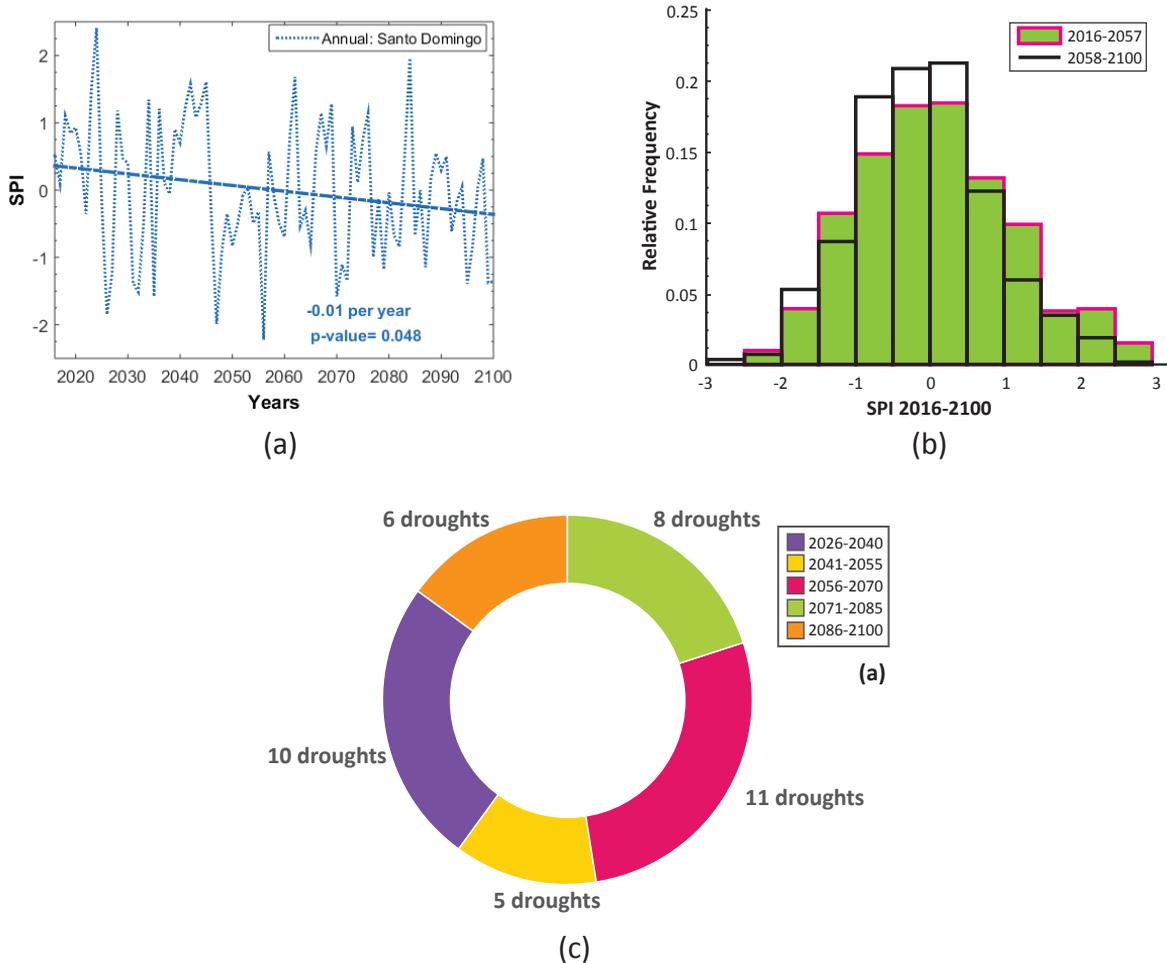


Figura 31 (a) Proyección de SPI, (b) Frecuencia de SPI, y (c) evolución temporal de sequía en Santo Domingo – estación de ONAMET

• Santiago

Santiago representa una región con tendencia a intensificar sequías en los escenarios RCP4.5. El SPI tiene una tendencia negativa con una tasa de cambio de -0.01 por año. A diferencia de Santo Domingo, esta provincia evidencia una tendencia a que se desarrollen sequías más fuertes al final del siglo XXI (ver figura 32a). El aumento de la probabilidad de ocurrencia de sequías se observa en el período futuro de 2058 a 2100, con una probabilidad de 0.2 a que se desarrollen sequías leves y 0.1/0.06 para que se generen sequías moderadas/severas (figura 32b). La evolución temporal de eventos de sequía exhibe un aumento en los eventos de sequía, obteniendo 6 eventos de los últimos 10 años del siglo XXI. El segundo déficit más alto se proyecta en la década de 2041-2055 (ver figura 32c).

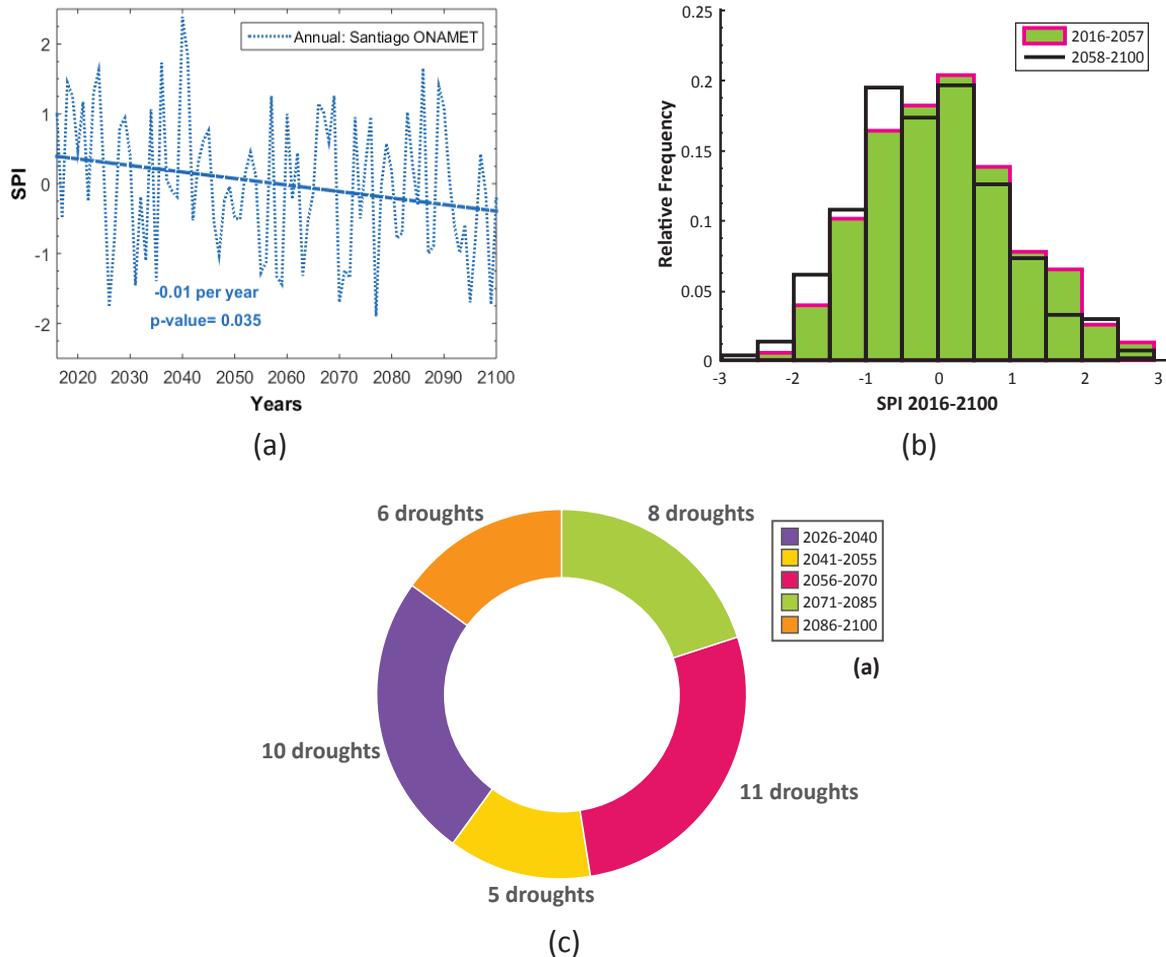


Figura 32. (a) Proyección de SPI, (b) Frecuencia de SPI y (c) evolución temporal de sequía (droughts) en Santiago – estación de ONAMET

- **Samaná**

De manera similar, la serie de tiempo de Samaná indica una tendencia de disminución de SPI de una tasa de -0.01 por año, pero con una disminución en la varianza del SPI en las últimas dos décadas, que se traduce en menor intensidad de sequía (ver figura 33a). El análisis de frecuencia muestra un cambio claro en el SPI con un aumento en la probabilidad a que se desarrollen sequías leves (0.42) y disminución de los casos de sequía extrema, severa y moderada y una intensificación de los eventos húmedos (Fig. 33b). Por otra parte, el número de eventos de sequía aumentan drásticamente de 2056 a 2085 (15 eventos) para luego disminuir a 3 eventos en los últimos 15 años del siglo XXI (ver figura 33c).

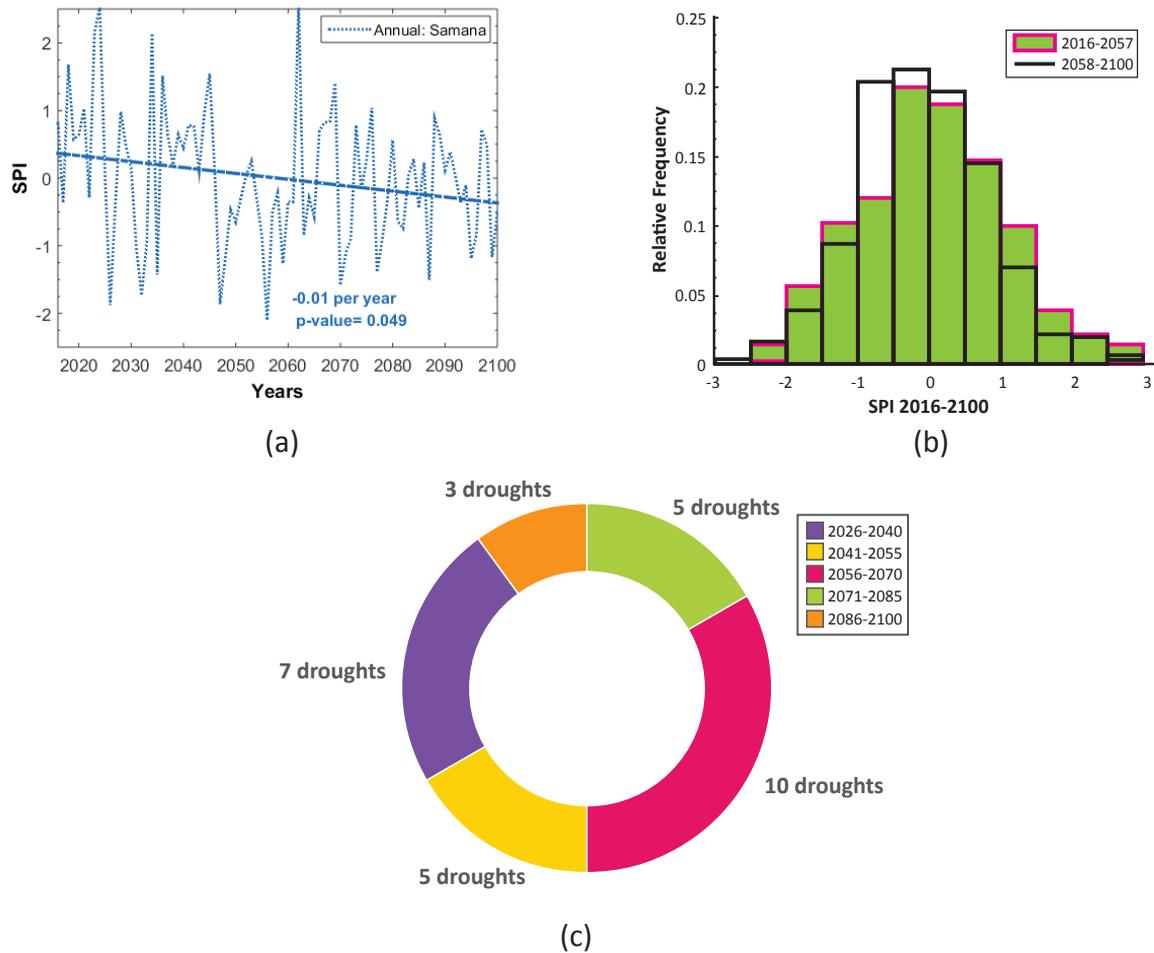


Figura 33. (a) Proyección de SPI, (b) Frecuencia de SPI, y (c) evolución temporal de sequía en Samaná – estación de ONAMET

4.3 Olas de calor en la República Dominicana

4.3.1 Olas de calor en el presente

Las olas de calor se calcularon utilizando el índice de calor en las estaciones con datos de punto de rocío o humedad relativa.

- **Santo Domingo**

Santo Domingo no muestra el desarrollo de eventos de ola de calor en el pasado, pero desde el 1997 las olas de calor comienzan a surgir y se han intensificado en los últimos 10 años (ver figura 34a). De 1975 a 1994 no fueron observadas olas de calor, pero en los últimos 10 años (2005-2014), 36 olas de calor han afectado a esta provincia (figura 34b).

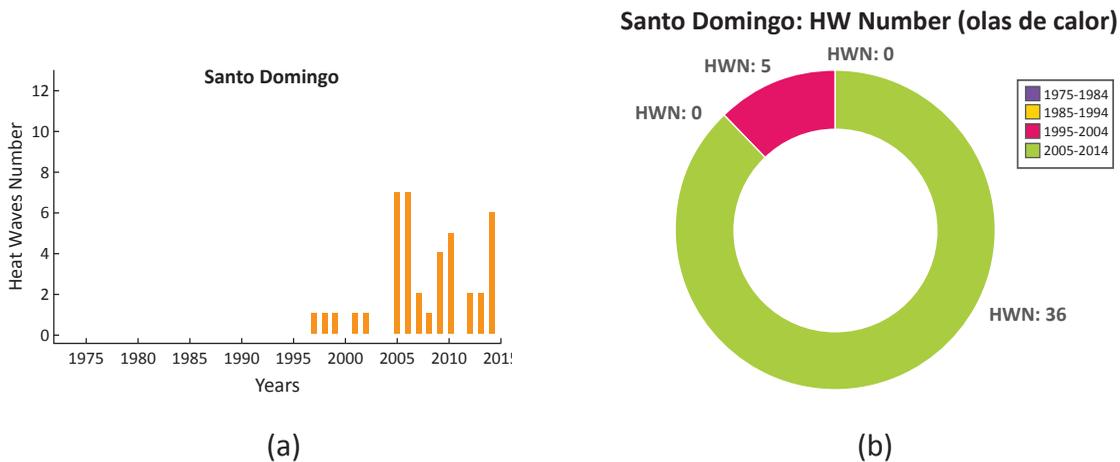


Figura 34. Evolución temporal de las olas de calor para la serie de tiempo (a) anual en Santo Domingo - estación de NCDC, (b) acumulado de las olas de calor en varios períodos de tiempo en Santo Domingo - estación de NCDC

- **Santiago y Samaná**

La provincia de Santiago tiene una tendencia similar y, desde 1997, las olas de calor son detectadas por primera vez. Más adelante, el número de eventos de agotamiento por calor aumenta, particularmente en el 2010 (véase la figura 35a). Por otra parte, cero número de olas de calor caracterizan el período 1975-1995, 3 olas de calor en los años 1995-2004 y un aumento acelerado en los últimos 10 años con eventos de 38 días calientes (figura 35b). Por el contrario, Samaná denota una disminución en eventos de golpes de calor, con eventos mayores en el año 2000 y uno bajo en el 2014 (figura 36a). Además, acontecimientos más grandes se observan en el período 1999-2002, mientras que en los últimos 8 años se desarrollaron tan sólo 6 eventos (figura 36b).

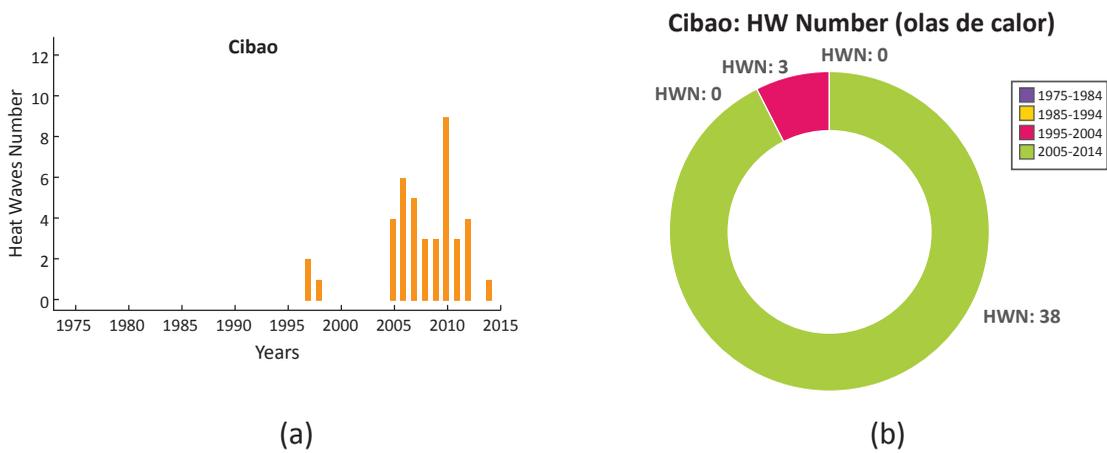


Figura 35 Evolución temporal de las olas de calor para (a) series de tiempo anuales en Santiago - estación de NCDC, (b) olas de calor acumuladas en varios periodos en Santiago - estación de NCDC

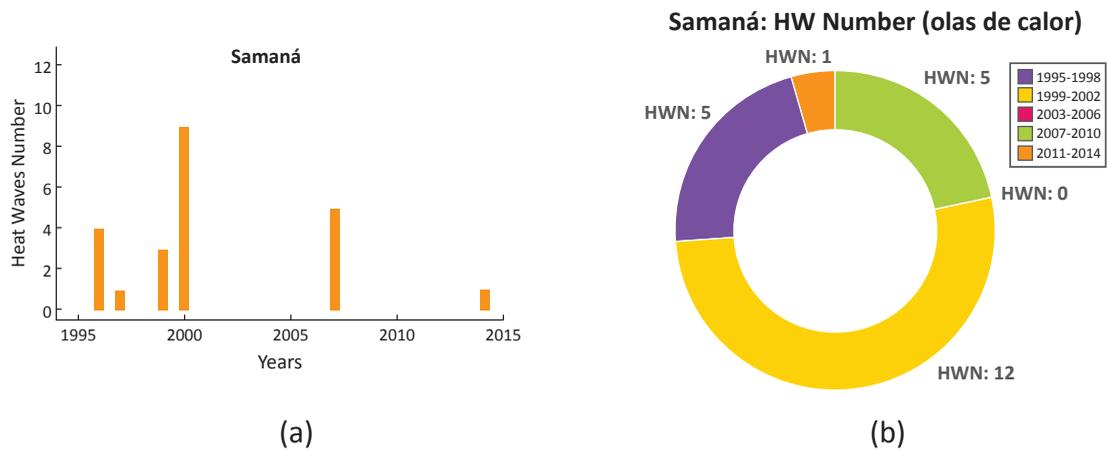


Figura 36 Evolución temporal de las ondas de calor para (a) series de tiempo anuales en Samaná - estación de ONAMET y (b) olas de calor acumuladas en varios periodos en Samaná - estación de ONAMET

Análisis de frecuencia Santo Domingo, Santiago y Samaná

El análisis de frecuencia de número de olas de calor (heat waves numbers) denota un cambio en el desarrollo de número de olas de calor cuando se comparan dos períodos usando como base el año 2005. En Santo Domingo y Santiago se aumenta la probabilidad de desarrollar eventos mayores, mientras que Samaná tiene apenas dos años con este evento, por lo que la frecuencia relativa no representa correctamente los cambios de forma y probabilidad de distribución (ver figura 37).

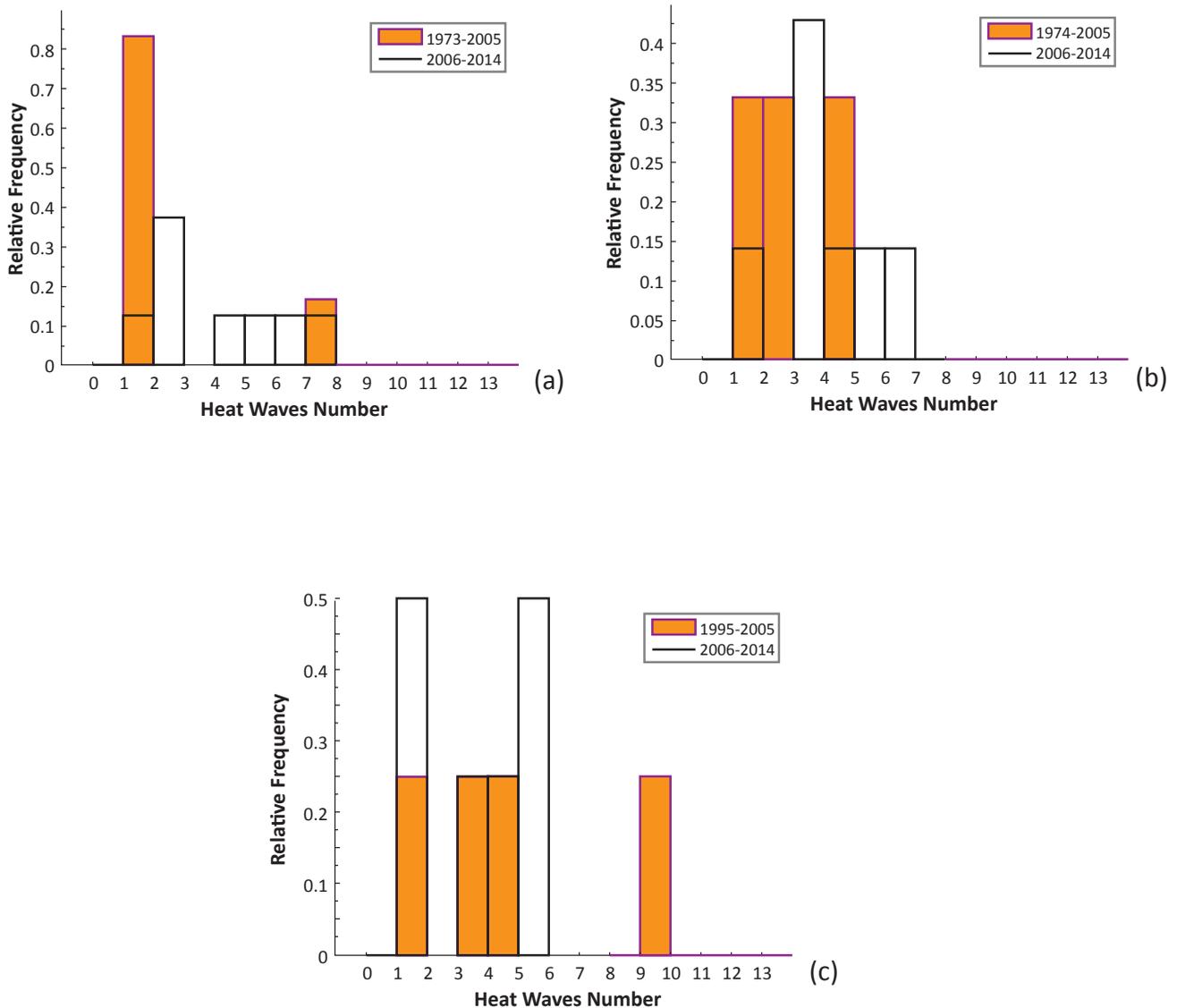


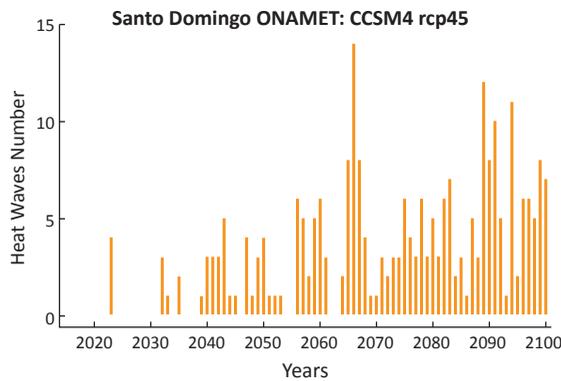
Figura 37 Frecuencia de número de olas de calor para (a) Santo Domingo - estación de NCDC, (b) Santiago - estación de NCDC y (c) Samaná - estación de ONAMET

4.3.2 Proyecciones de olas de calor

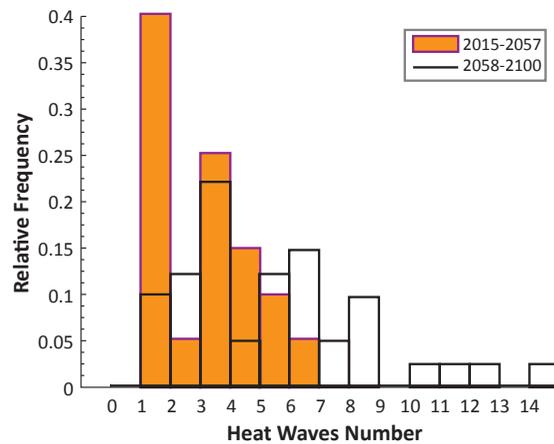
Las olas de calor (heat waves number) se proyectaron en el futuro usando la temperatura diaria del aire porque algunas estaciones no tienen datos de humedad relativa. Debido a estas restricciones, solamente la temperatura del aire fue proyectada en el futuro mediante el downscaling estadístico para representar la variación local en el futuro.

- **Santo Domingo**

En Santo Domingo se proyecta un continuo aumento en los eventos de olas de calor, particularmente después de la mitad y al final del siglo XXI (figura 38a). Además, hay un cambio en la distribución del número de olas de calor con mayor probabilidad para tener mayor número de eventos. En el segundo período climático (2058-2100) se presenta la probabilidad para tener hasta 14 eventos por mes, mientras que en el primer período (2015-2057) el máximo corresponde a 7 eventos por mes (figura 38b). La evolución temporal del número de olas de calor indica una clara tendencia a aumentar, con mayor ocurrencia del evento en los últimos 15 años (90 eventos) del siglo XXI. Después de la mitad del siglo, el segundo mayor número de olas de calor se detecta con 65 eventos (figura 38C).



(a)



(b)

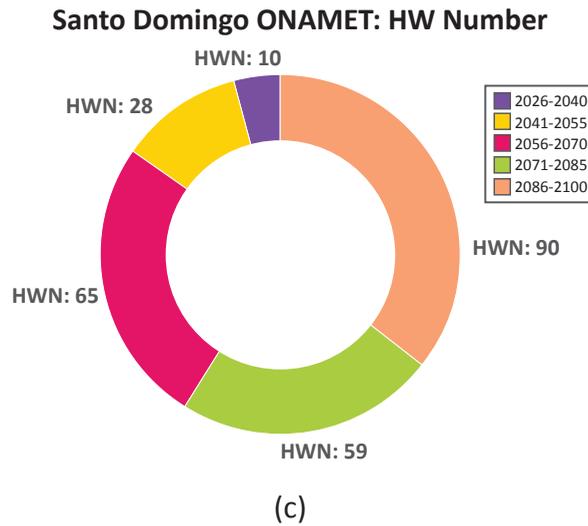
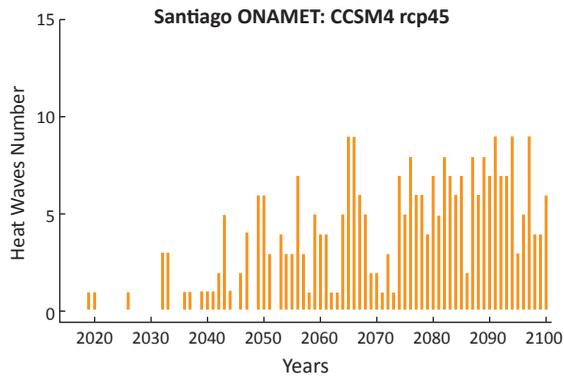


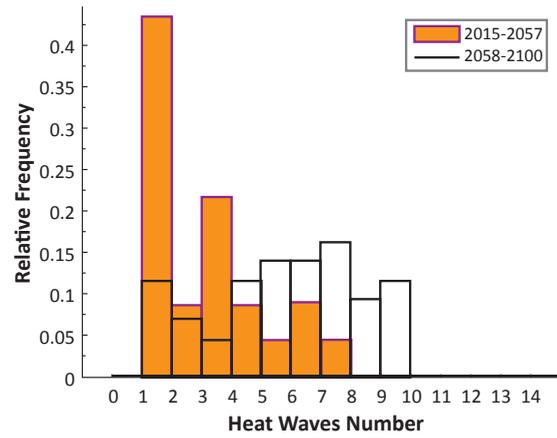
Figura 38 Proyección del número de olas de calor a lo largo del siglo XXI en Santo Domingo – estación de ONAMET para (a) series de tiempo anual, (b) frecuencia y (c) evolución temporal

- **Santiago y Samaná**

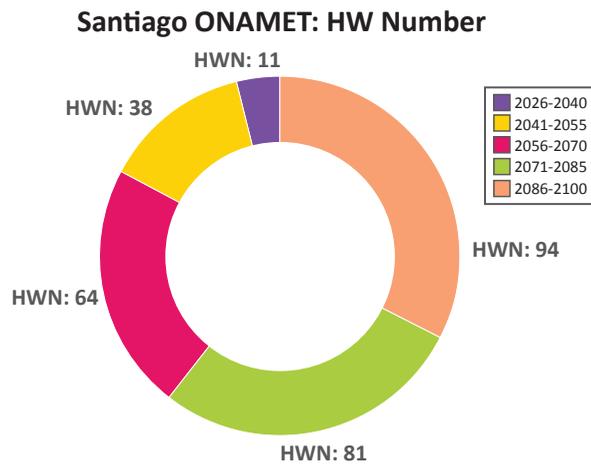
En Santiago, los eventos de olas de calor aumentan muy rápido hasta mediados del siglo XXI y permanecen alrededor de 6 eventos en promedio por año (véase la figura 39a). La distribución del número de olas de calor señala un marcado cambio en el número de olas de calor con mayor probabilidad para obtener el mayor número de eventos en el segundo período (2058-2100). La probabilidad de tener entre 6 y 10 eventos es 0.43 (figura 39b). Además, las olas de calor aumentan muy rápidamente en el período climático 2071-2085 con 81 eventos, mientras que al final del siglo XXI (2086-2100) el número de eventos llega a 94 (ver figura 39C). Samaná denota una tendencia similar a la de Santo Domingo con mayores eventos desde mediados del siglo XXI (véase la figura 40a). De manera similar, hay un aumento de la probabilidad para que se desarrollen un mayor número de olas de calor en el segundo período climático con una probabilidad de 0.44 a tener eventos de día caluroso entre 6 y 19 (figura 40b). Además, en esta provincia tienden a aumentar las olas de calor desde mediados del siglo XXI pero con eventos mayores en los períodos 2071-2085 y 2086-2100 con 78 y 89 eventos, respectivamente (ver figura 40c).



(a)

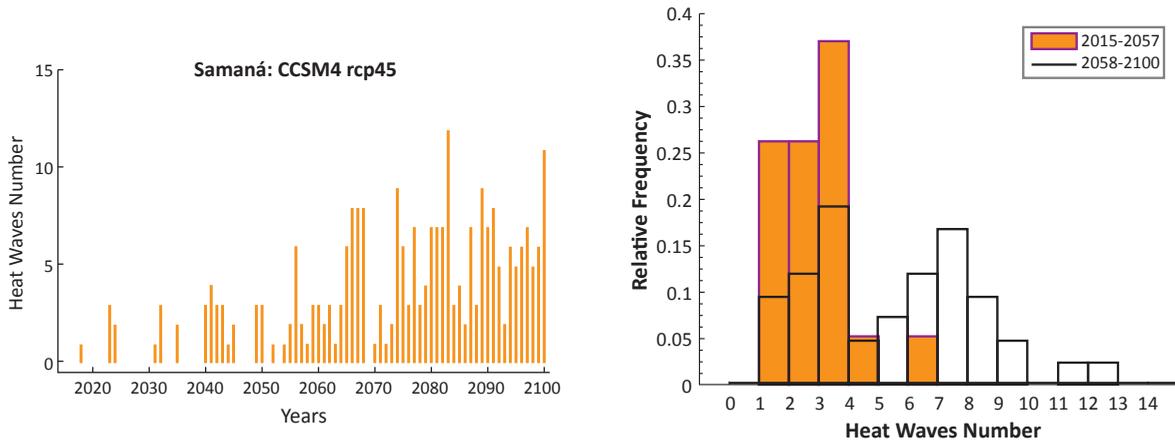


(b)



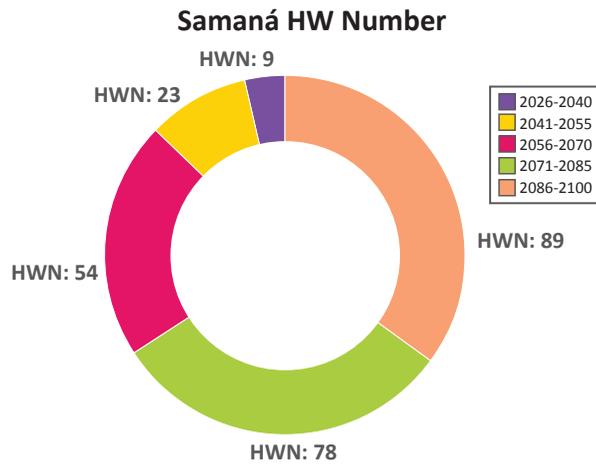
(c)

Figura 39 Proyección del número de olas de calor a lo largo del siglo XXI en Santiago – estación de ONAMET para (a) series de tiempo anual, (b) frecuencia y (c) evolución temporal



(a)

(b)



(c)

Figura 40 Proyección del número de olas de calor a lo largo del siglo XXI en Samaná - estación de ONAMET para (a) series de tiempo anual, (b) frecuencia y (c) evolución temporal

4.4 Balance Hídrico

Para Santo Domingo y Santiago, se desarrolló un índice de estrés hídrico utilizando los indicadores de Falkenmark, [25] que se muestran en la tabla 12. Este indicador se enfoca en las necesidades básicas de agua humana y fuentes de aguas superficiales y relaciona directamente el estado del estrés hídrico con el tamaño de la población. La clasificación estableció que un índice inferior a 500 representa la escasez absoluta, un índice superior a 1700 no representa estrés.

Tabla 12 Clasificación del indicador Falkenmark

Categoría	Índice (m ³ /cap. año)
No estrés	>1700
Estrés	1000-1700
Escasez	500-1000
Escasez absoluta	<500

Se calculó otro índice considerando la demanda de agua para diferentes sectores (doméstico y agrícola). La demanda de agua por sector se estimó en base a los informes del INDRHI. La Tabla 13 muestra la demanda de agua por sector estimado. El indicador utilizado fue Vorosmarty et al. [25] Índice de estrés hídrico, que tiene cuatro categorías: baja, moderada, media y alta para cada valor de índice. La tabla 14 muestra la correspondencia entre las categorías y los índices, y la ecuación utilizada para calcularlos.

Tabla 13 Demanda de agua por sector (mm³/año). Fuente: INDRHI, 2007

Región/ Año	Agricultura			Industrial			Ganadería			Doméstica			Turismo		
	2005	2010	2025	2005	2010	2025	2005	2010	2025	2005	2010	2025	2005	2010	2015
Yaque del Norte	2380.72	1159	835.5	40.65	113.28	148.8	86.74	136.3	285.12	107.08	119.63	158.66	2.15	1.27	1.9
Atlántica	78.04	40.32	28.98	15.99	42.38	56.57	84.28	133.9	282.65	42.69	47.71	63.31	13.2	5.51	10.02
Yuna	882.53	506.19	381.7	30.61	36.93	58.33	93.17	142.8	291.54	81.63	91.74	123.51	0.82	0.8	0.94
Este	7.11	4.07	3.16	24.96	30.14	47.71	99.95	149.5	298.32	64.14	72.23	97.76	22.07	81.95	197.5
Ozama-Nizao	190.03	107.59	77.59	119.6	330.44	429.8	85.738	135.5	284.11	312.67	348.9	461.3	4.82	4.44	10.68
Yaque del Sur	2891.41	1510.8	1134	27.29	32.89	51.85	88.36	138	286.73	71.65	80.55	108.53	0.65	0.32	0.53

Índice de Tensión de Agua (Vorosmarty et. al)

$$WSI = \frac{DIA}{Q}$$

D; Demanda del sector doméstico.

I; Demanda del sector industrial.

A; Demanda del sector agrícola.

Q; Caudal

Tabla 14 Clasificación del Índice de Tensión de Agua (Raskin et al. 1997) [25]

Categoría	Índice
Bajo	<0.1
Moderado	0.1-0.2
Medio	0.2-0.4
Alto	>0.4

- **Santiago**

Para Santiago, el índice de escasez de agua se calculó utilizando el agua disponible en las presas como resultado del modelo con la población proyectada por la Oficina Nacional de Estadística (ONE). De hecho, se comparó el agua asegurada en las represas con la población dentro de la cuenca. La tabla 15 muestra los resultados de la clasificación del Indicador de Falkenmark (FI) del 2020 al 2050. Como se muestra, la región experimentará una escasez absoluta entre 2025, 2030, 2045 y 2050. Esto significa que la región experimentará condiciones extremas, y requerirá acciones significativas por parte de los consumidores y proveedores para mantener suministros suficientes para las necesidades esenciales.

Tabla 15. Índice de escasez de agua en Santiago para el período 2020 - 2050

Año	Volumen (m ³)	Población	FI	Categoría
2020	1243	2,111,871	589	Escasez
2025	985	2,222,100	443	Escasez Absoluta
2030	986	2,319,691	425	Escasez Absoluta
2035	1313	2,403,887	546	Escasez
2040	1559	2,474,116	630	Escasez
2045	1133	2,531,497	448	Escasez Absoluta
2050	1019	2,576,662	396	Escasez Absoluta

La tabla 16 muestra el *Vorosmarty et al.* resultados de clasificación (escasez de agua) para el mismo período 2020 – 2050.

Tabla 16 Escasez de agua en el Yaque del Norte

Año	Demanda (Millones m ³ /s)	Suministro (Millones m ³ /s)	WSI	Categoría
2020	2,526.32	1,243.74	2.03	Alta
2025	2,539.38	985.33	2.57	Alta
2030	2,552.441	986.06	2.58	Alta
2035	2,578.555	1,313.52	1.96	Alta
2040	2,578.555	1,558.81	1.65	Alta
2045	2,591.612	1,133.55	2.28	Alta
2050	2,604.669	1,019.08	2.55	Alta

- **Santo Domingo**

Para Santo Domingo, el índice de escasez de agua se calculó utilizando el agua producida por toda la cuenca como resultado del modelo con la proyección de la población. De hecho se comparó toda el agua disponible y producida por la cuenca con la población de Santo Domingo, asumiendo una contribución constante de agua de parte de la presa de Valdesia y de los sistemas de abastecimiento de Manoguayabo, Duey, e Isa. La tabla 17 muestra los resultados de la clasificación FI de 2020 a 2050. Como se muestra, la región experimentará una escasez absoluta entre 2020 al 2035, y en el 2050. Esto significa que la región experimentará condiciones extremas, y requerirá acciones significativas por parte de los consumidores y proveedores para mantener suministros suficientes para las necesidades esenciales.

Tabla 17 Escasez de agua para el Ozama

Año	Volumen del Ozama (m ³)	Población (SD and ND)	FI (m ³ /hab ¹ año ¹)	Categoría
2020	1723255513	3666231	470.03	Escasez absoluta
2025	1066044051	3857580	276.35	Escasez absoluta
2030	1338667559	4027001	332.42	Escasez absoluta
2035	1916357122	4173164	459.20	Escasez absoluta
2040	2482357768	4295085	577.95	Escasez
2050	1522670198	4473110	340.40	Escasez absoluta

Además, los resultados del modelo se compararon con las proyecciones del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI). Su análisis se desarrolló en 2007 para cada cuenca en República Dominicana; relacionaron la disponibilidad total de agua de la cuenca con la población y el agua asegurada en las represas con población. La cuenca analizada fue Yaque del Norte, que contiene la segunda ciudad más poblada del país, la ciudad de Santiago. La tabla 18 muestra un índice de estrés hídrico de 533.65 m³/hab/año que representa la escasez de la cuenca Yaque del Norte, suponiendo solo el agua disponible en las presas. Sin embargo, la tabla 19 muestra un índice de escasez de agua de 1966 m³/hab/año que no representa estrés para la cuenca, considerando que toda el agua producida por la cuenca es capturada.

Tabla 18 Disponibilidad de agua segura por región. (Plan Hidrológico Nacional – INDRHI, año 2007)

Región	Disponibilidad Segura (MMC)	Habitantes	Disponibilidad Per cápita (m ³ /hab/año)
Yaque del Norte	789	1,478,113	533.65
Atlántica	1,245	661,581	1,882.02
Yuna Camú	1,850	1,579,036	1,171.44
Este	1,712	919,613	1,861.84
Ozama Nizao	1,539	3,930,708	391.65
Yaque del Sur	2,359	1,313,040	1,796.47
	9,494	9,882,091	960.74

Tabla 19 Disponibilidad de agua por región (Plan Hidrológico Nacional – INDRHI, año 2007)

Región	Disponibilidad (MMC)	Habitantes	Disponibilidad Per Cápita (m ³ /hab/año)
Yaque del Norte	3,086	1,478,113	1,966
Atlántica	4,851	661,581	7,006
Yuna Camú	3,837	1,579,036	2,280
Este	3,884	919,613	3,399
Ozama Nizao	4,916	3,930,708	1,134
Yaque del Sur	5,393	1,313,040	3,634
	25,966.69	9,882,091	2,676

Tabla 20 Tensión Hídrica y escasez de agua por región (Plan Hidrológico Nacional – INDRHI, año 2007)

Región	2005	2010	2015	2020	2025
Yaque del Norte	2,027.86	1,887.54	1,769.72	1,670.00	1,587.16
Atlántica	7,163.05	6,667.40	6,251.23	5,898.97	5,606.34
Yuna Camú	2,576.90	2,398.59	2,248.87	2,122.15	2,016.88
Este	3,211.74	2,989.50	2,802.90	2,644.95	2,513.75
Ozama-Nizao	1,159.64	1,079.40	1,012.02	954.99	907.62
Yaque del Sur	4,079.97	3,797.66	3,560.62	3,359.97	3,193.30
Tensión Hídrica (1,000 – 1670)					
Escasez Crónica (menos de 1,000)					

Como se muestra en la tabla 20, la región que contiene la cuenca Yaque del Norte experimentará estrés y escasez probablemente a partir del 2020-2025. Además, la población presenta un aumento significativo y el agua asegurada no es suficiente para abastecer a la población. En nuestro análisis, el proyectado de seguridad hídrica se utilizó para determinar el índice, pero en el análisis del INDRHI se utilizó la disponibilidad total de agua proyectada en la cuenca. Identificaron el estrés para 2020 y 2025, pero estimamos que, durante este período, la región experimentará una escasez absoluta si no se implementan las estrategias correctas. En otras palabras, durante 2020-2025, se espera que la producción de agua en la cuenca del Yaque del Norte disminuya mientras que la población y la demanda seguirán aumentando, y así crear las condiciones para posibles eventos de escasez con una futura recurrencia en 2050. Esto significa que las instituciones locales necesitan incrementar el volumen de agua capturado en las cuencas hidrográficas para satisfacer la demanda.

4.5 Análisis de inundaciones: Santo Domingo - río Ozama

En el análisis de frecuencia se utilizaron caudales máximos anuales para obtener una serie de caudales a diferentes períodos de retorno. La serie de tiempo de caudales máximos anuales es contrastada con los diferentes períodos de retorno para identificar la frecuencia con que el río Ozama alcanzó o superó estos eventos extremos.

En la figura 41 se observa la frecuencia con que el río Ozama ha alcanzado o superado los caudales correspondientes a los cuatro períodos de retorno calculados en este trabajo y que corresponde al período 1967-1982. Como se puede observar, la línea roja (caudal estimado para 25 años) se intercepta con el año 1980. En este año el huracán Allen, categoría 5 afectó principalmente la parte sur del país. También, se puede observar que la línea azul oscura (caudal estimado para 100 años) se intercepta con

el año 1981. Durante este año, la tormenta tropical Gert afectó drásticamente al noroeste del país. Finalmente, se observa un caudal mayor en el año 1979. En este año ocurrieron dos eventos extremos. El primero fue el huracán David, categoría 5, considerado uno de los huracanes más fuertes que ha impactado el país. Este fenómeno causó más de 2,000 muertes, inundaciones, y daños en la infraestructura principalmente en el sur del país. Más adelante, la tormenta tropical Frederick causó fuertes precipitaciones e inundaciones también en la región sur del país.

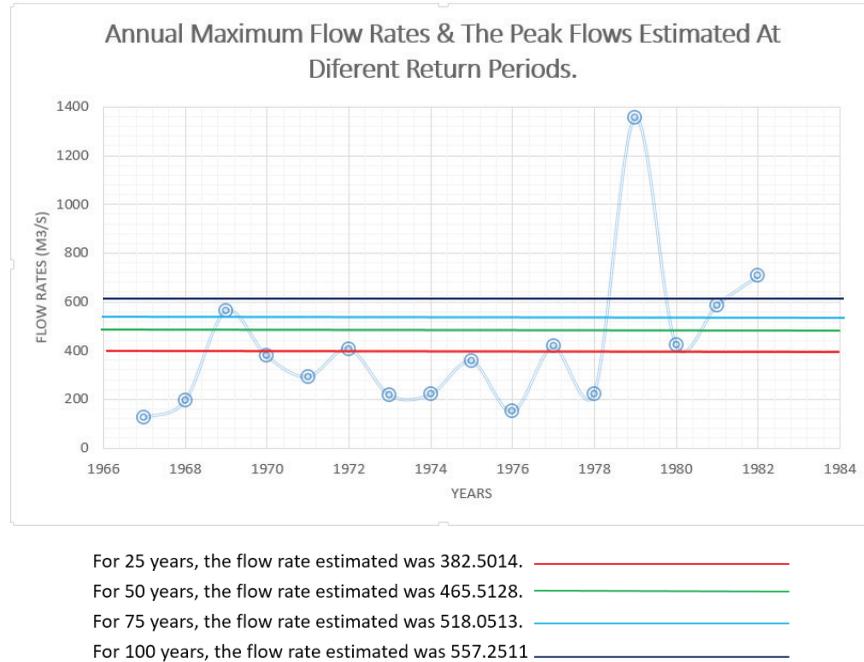


Figura 41 Caudal máximo anual versus los caudales picos estimados para cada período de retorno

La elevación de la superficie del agua en las diferentes secciones transversales del río Ozama fue calculada utilizando HEC-RAS. La figura 42 muestra la elevación de la superficie del agua a la sección transversal #73 y para cada perfil. Los puntos rojos representan la orilla del río, y se puede observar que los niveles del agua están por encima de estos, lo que significa que parte de las zonas aledañas al río están bajo inundación. La figura 43 muestra la evolución de la elevación de la superficie del agua a lo largo del tramo del río Ozama para un período de retorno de 25 años.

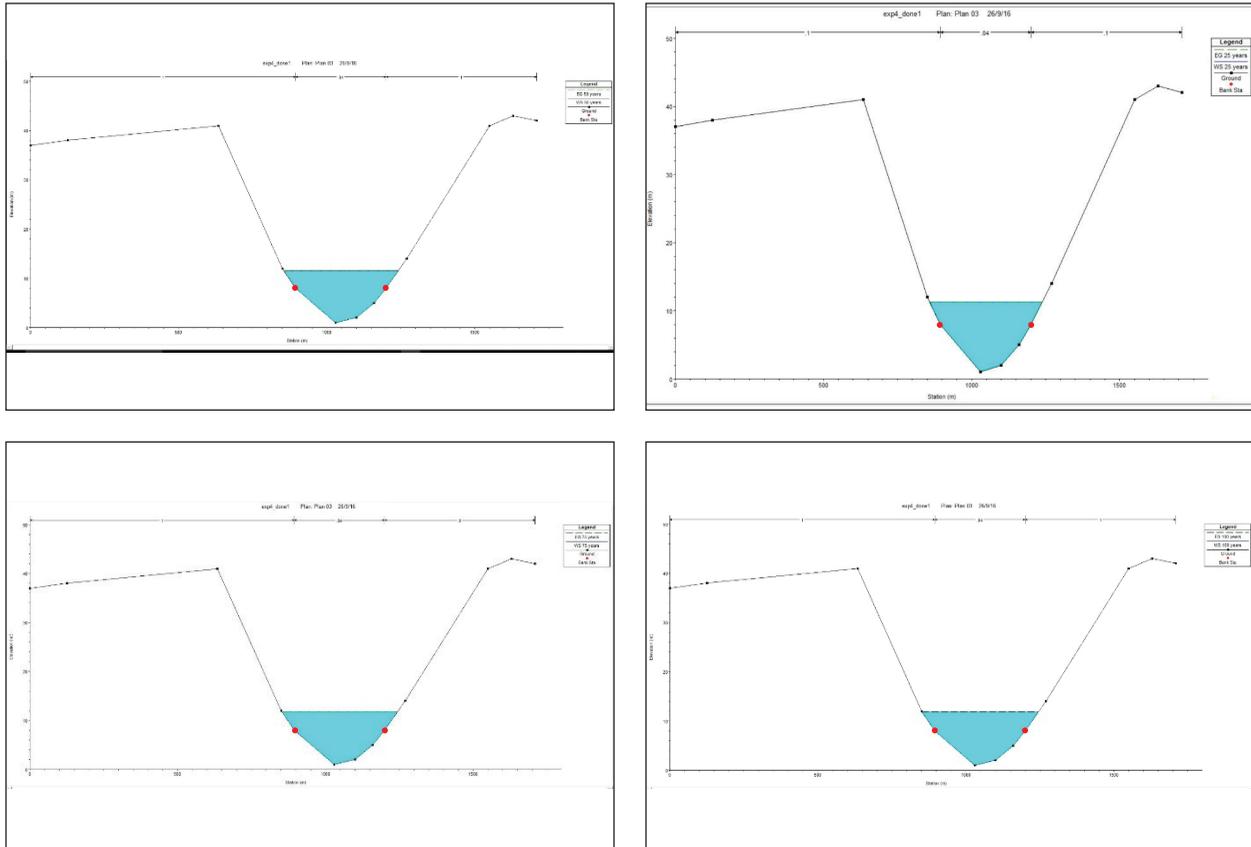


Figura 42 Niveles del agua para cada perfil a la misma sección transversal #73

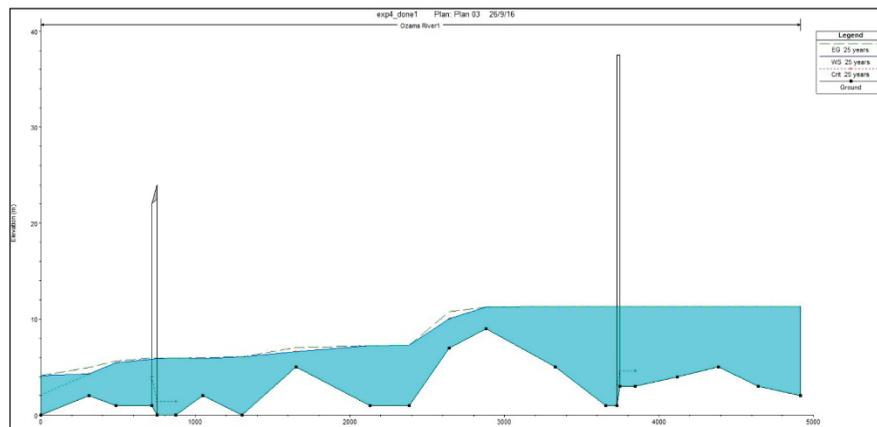


Figura 43 Perfil del río y los niveles del agua de todas las secciones transversales para el perfil 1

La elevación de la superficie del agua para los diferentes perfiles definidos en HEC-RAS es importado a ArcGIS para identificar las áreas de riesgo de inundación. Para cada perfil, el río fue dividido en cuatro tramos tomando una elevación representativa en cada tramo, como se muestra en la tabla 21. Luego usando la herramienta “Calculadora Raster” en ArcGIS, se cuantificaron las áreas de riesgo de inundación, tal como se muestra en la figura 44. Según estas áreas de inundación, ha sido posible identificar los barrios que serían afectados por estos caudales. La tabla 22 muestra las zonas afectadas para cada perfil.

Tabla 21. Niveles del agua desde río arriba hasta río abajo y las secciones transversales donde termina cada división

ID	100 años (m)	75 años (m)	50 años (m)	25 años (m)	Sección Transversal
A	11.85	11.75	11.55	11.33	2945.33
B	9.735	9.645	9.515	9.28	2413.069
C	7.185	7.075	6.925	6.655	930.8645
D	5.43	5.31	5.14	4.855	379.6719

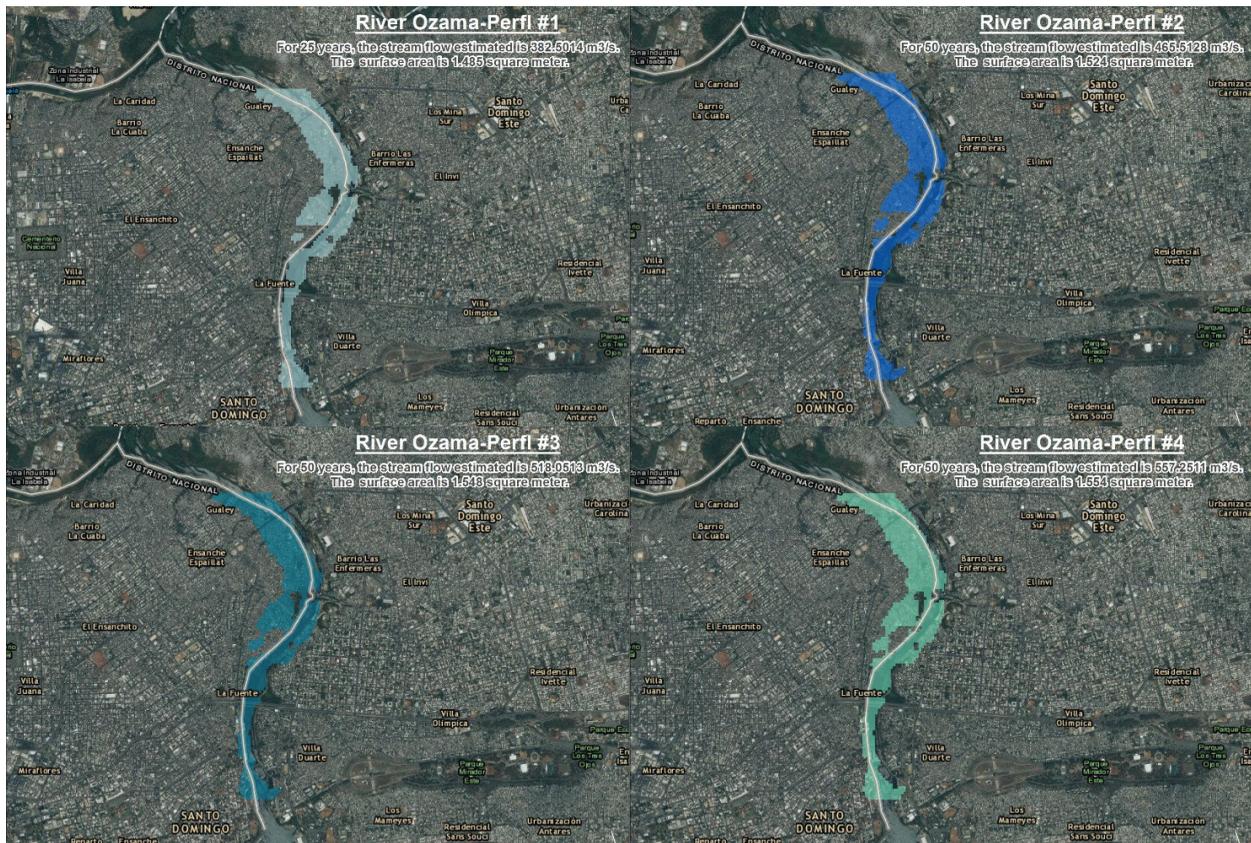


Figura 44. Áreas de inundaciones en el río Ozama para diferentes períodos de retorno

Tabla 22 Zonas vulnerables para cada perfil

Perfiles	Período de retorno (años)	Caudal (m ³ /s)	Área (km ²)	Zonas afectadas
1	25	382.5014	1.485	Gualey, Los Guandules, La Ciénaga, Barrio Oxígeno, Rivera del Ozama
2	50	465.5128	1.524	Gualey, Los Guandules, La Ciénaga, Barrio Oxígeno, Rivera del Ozama
3	75	518.0513	1.548	Gualey, Los Guandules, La Ciénaga, Barrio Oxígeno, Rivera del Ozama, Atarazana
4	100	557.2511	1.554	Gualey, Los Guandules, La Ciénaga, Barrio Oxígeno, Rivera del Ozama, Atarazana

La comparación de las áreas de inundación correspondiente a diferentes períodos de retorno indica que el río Ozama es altamente sensitivo a elevaciones repentinas de caudales debido a eventos de tormenta. Con un período de retorno de 25 años, gran parte del área inundable es cubierta por el agua, mientras que para períodos de retorno mayores el incremento en el área inundada es relativamente pequeño. La particular geometría de las secciones transversales del río Ozama, debido a que atraviesa la ciudad, ocasiona que un caudal de flujo no muy grande inunde rápidamente el lecho del río y su llanura de inundación cercana a la orilla. Luego esta llanura de inundación se expande rápidamente ocasionando que caudales mayores generen elevaciones pequeñas de la superficie del agua. Es por esto que la cantidad de agua requerida para inundar una sección transversal es cada vez mayor. La figura 45 ejemplifica este suceso, comparando las áreas de inundación del perfil 1 y el perfil 4.

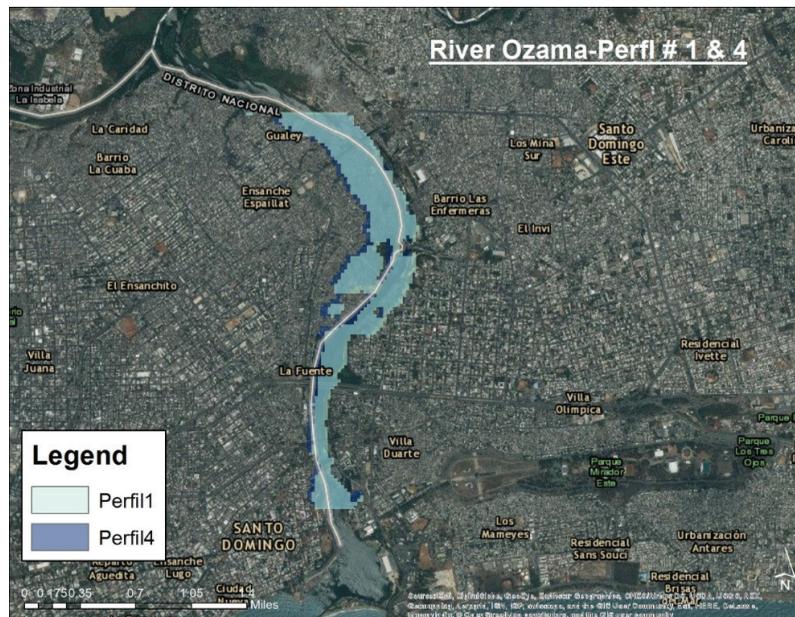


Figura 45 Comparación de las áreas de inundación correspondiente a diferentes períodos de retorno

Eventos de sequía y olas de calor fueron proyectados para la República Dominicana. Santo Domingo y Samaná muestran una tendencia similar al aumento en las primeras décadas a lo largo del siglo XXI para disminuir en los últimos 15 años. En cambio, Santiago exhibe un aumento en los eventos de sequía incluso en los últimos 10 años.

Por otro lado, Santo Domingo proyecta un aumento continuo en los eventos de olas de calor, particularmente después de la mitad y al final del siglo XXI. Después de la mitad de este siglo, el segundo mayor número de olas de calor corresponde a 65 eventos. En Santiago, los acontecimientos de la ola de calor aumentan muy rápido hasta mediados del siglo XXI pero con eventos mayores en los períodos 2071-2085. Al final del siglo XXI (2086-2100) los eventos aumentan a 94. Samaná denota una tendencia similar a Santo Domingo con eventos mayores desde mediados de siglo, pero con eventos mayores en los períodos 2071-2085 y 2086-2100 con 78 y 89 eventos, respectivamente.

En general, Santo Domingo, Santiago y Samaná señalan una tendencia a desarrollar eventos de alta sequía en los escenarios RCP4.5. Al mismo tiempo, fuertes olas de calor se esperan en estas provincias.

El modelo HEC-HMS se utilizó para calcular la producción de agua de la cuenca de Santo Domingo. Durante 2020-2025, se espera que la producción de agua en la cuenca del Yaque del Norte disminuya mientras que la población y la demanda seguirán aumentando, y así crear las condiciones para posibles eventos de escasez con una futura recurrencia en 2050. Esto significa que las instituciones locales necesitan encontrar la forma de capturar mayor cantidad de agua de las cuencas hidrográficas para satisfacer la demanda de la población. Por otro lado, Santo Domingo experimentará una escasez absoluta entre 2020 al 2035, y en el 2050. Esto significa que la región experimentará condiciones extremas, y reque-

rirá acciones significativas por parte de los consumidores y proveedores para mantener suministros suficientes para las necesidades esenciales.

De acuerdo a estudios del INDRHI, la agricultura y el sector doméstico exigen mayor cantidad de agua mientras, para el año 2025 la demanda de agua doméstica aumentará en un 30% respecto al año 2010.

Asimismo, fue proyectado el nivel del mar para cuatro años (2025, 2050, 2075, 2100). Como se puede observar las provincias que contienen ríos que desembocan en el mar (Santo Domingo y San Pedro de Macorís) muestran mayores zonas de inundación, y estas zonas de inundación siguen la trayectoria del río. Esto ocurre debido que el modelo considera la elevación del terreno y no el volumen de agua en el río. Como consecuencia el modelo llena este volumen con volumen de agua del mar que penetra en la zona. Sin embargo, la realidad es otra, ya que existe un volumen de agua en los ríos que contrarrestar la cantidad de agua del mar, por lo que las zonas inundables tienden a ser menores.

La comparación de las áreas de inundación correspondiente a diferentes periodos de retorno indica que el río Ozama es altamente sensitivo a elevaciones repentinas de caudales debido a eventos de tormenta. Con un período de retorno de 25 años, gran parte del área inundable es cubierta por el agua, mientras que para períodos de retorno mayores el incremento en el área inundada es relativamente pequeño. La particular geometría de las secciones transversales del río Ozama, debido a que atraviesa la ciudad, ocasiona que un caudal de flujo no muy grande inunde rápidamente el lecho del río y su llanura de inundación cercana a la orilla. Luego esta llanura de inundación se expande rápidamente ocasionando que caudales mayores generen elevaciones pequeñas de la superficie del agua. Es por esto que la cantidad de agua requerida para inundar una sección transversal es cada vez mayor.

Bibliografías

- [1] Angeles, M., Gonzalez, J., Ramirez, N., Tepley, C., and Comarazamy, D., 2010, “Origins of the Caribbean Rainfall Bimodal Behavior,” *J. Geophys. Res.*, **115**(D11), pp. 1–17.
- [2] Curtis, S., and Gamble, D., 2008, “Regional Variations of the Caribbean Mid-Summer Drought,” *Theor. Appl. Climatol.*, **94**(1), pp. 25–34.
- [3] Taylor, M., Stephenson, T., Owino, A., Chen, A., and Campbell, J., 2011, “Tropical Gradient Influences on Caribbean Rainfall,” *J. Geophys. Res.*, **116**(D21), pp. 1–14.
- [4] Glenn, E., Comarazamy, D., Gonzalez, J., and Smith, T., 2015, “Detection of Recent Regional Sea Surface Temperature Warming in the Caribbean and Surrounding Region,” *Geophys. Res. Lett.*, **42**(16), pp. 6785–6792.
- [5] Gómez, N., and Saenz, P., 2009, *Análisis de Riesgos de Desastres Y Vulnerabilidades En La República Dominicana*, Comisión Europea, Republica Dominicana.
- [6] INDHRI, 2012, *Plan Hidrológico Nacional*, Alfa & Omega, Santo Domingo, República Dominicana.
- [7] Poore, R., Williams, R., and Tracey, C., 2000, “Sea Level and Climate,” USGS Sci. Chang. Word [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/fs/fs2-00/>.
- [8] IPCC, 2013, *Climate Change 2013, the Physical Science Basis*, Cambridge University Press, New York.

- [9] Roberts, S., Glickson, D., Mengelt, C., Waddell, K., Forrest, S., Mansfield, G., Lewis, P., and Harding, L., 2012, *Sea-Level Rise for the Coasts of California, Oregon, and Washington: Past, Present, and Future*. The National Academies Press, Washington, DC.
- [10] IPCC, 2001, *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [11] IPCC, 2013, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA,.
- [12] IPCC, 2000, *Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [13] Thomson, A., Calvin, K., Smith, S., Kyle, G. P., Volke, A., Patel, P., Delgado-Arias, S., Bond-Lamberty, B., Wise, M., Clarke, L., and Edmonds, J., 2011, “RCP4.5: A Pathway for Stabilization of Radiative Forcing by 2100,” *Clim. Change*, **109**, pp. 77–94.
- [14] Symon, C., 2013, *Climate Change: Action, Trends and Implications for Business*, European Climate Foundation.
- [15] Gent, P., Danabasoglu, G., Donner, L., Holland, M., Hunke, E., Jayne, S., Lawrence, D., Neale, R., Rasch, P., Vertenstein, M., Worley, P., Yang, Z.-L., and Zhang, M., 2011, “The Community Climate System Model Version 4,” *J. Clim.*, **24**, pp. 4973–4991.
- [16] Danabasoglu, G., Bates, S., Briegleb, B., Jayne, S., Jochum, M., Large, W., Peacock, S., and Yeager, S., 2012, “The CCSM4 Ocean Component,” *J. Clim.*, **25**(5), pp. 1361–1389.
- [17] Gettelman, A., and Kay, J., 2011, “The Evolution of Climate Sensitivity and Climate Feedbacks in the Community Atmosphere Model,” *J. Clim.*, **25**(5), pp. 1453–1469.
- [18] Holland, M., Bailey, D., Briegleb, B., Light, B., and Hunke, E., 2012, “Improved Sea Ice Shortwave Radiation Physics in CCSM4: The Impact of Melt Ponds and Aerosols on Arctic Sea Ice,” *J. Clim.*, **25**(5), pp. 1413–1430.
- [19] Holgate, S., Matthews, A., Woodworth, P., Rickards, L., Tamisiea, M., Bradshaw, E., Foden, P., Gordon, K., Jevrejeva, S., and Pugh, J., 2013, “New Data Systems and Products at the Permanent Service for Mean Sea Level,” *J. Coast. Res.*, **29**(3), pp. 493–504.

- [20] Aarup, T., André, G., Edwing, R., Heitsenrether, R., Farre, R., Fierro, J., Gaete, J., Foden, P., Pugh, J., Pérez, B., Rickards, L., and Schöne, T., 2016, *Manual on Sea Level Measurement and Interpretation: Radar Gauges*, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris.
- [21] Stull, R., 2000, *Meteorology for Scientists and Engineers*, Brooks/Cole, Belmont USA.
- [22] NOAA, 2014, "What Is the Heat Index?," Natl. Weather Serv. Weather Forecast Off. [Online]. Available: <http://www.srh.noaa.gov/ama/?n=heatindex>. [Accessed: 30-Jun-2015].
- [23] NWS, 2014, "The Heat Index Equation," Natl. Weather Serv. Weather Predict. Cent. [Online]. Available: http://www.wpc.ncep.noaa.gov/html/heatindex_equation.shtml. [Accessed: 01-Jul-2015].
- [24] Willmott, C. J., Center for Climate Research, Department of Geography, & University of Delaware. (1981). On the Validation of Models. Retrieved from http://climate.geog.udel.edu/~climate/publication_html/Pdf/W_Phys_Geog_1981.pdf
- [25] Brown, A., & Matlock, M. D. (2011). A Review of Water Scarcity Indices and Methodologies. The Sustainability Consortium, 106th ser. doi:10.1075/ps.5.3.02chi.audio.2f
- [26] Legates, D. R., & McCabe, G. J. (1999). Evaluating the Use of "Goodness-of-Fit" Measures in Hydrologic and Hydroclimatic Model Validation. *Water Resources Research*, 35, 233-241. <http://dx.doi.org/10.1029/1998WR900018>
- [27] DIARENA (2011). Dirección de Información Ambiental y de Recursos Naturales



SAMANÁ

Ondas de calor

Los animales de sangre caliente, así como los seres humanos percibimos la pérdida de calor en vez de la temperatura del ambiente que nos rodea. Nuestro cuerpo pierde y gana energía debido a mecanismos de calor externos, sin embargo, nuestro organismo tiene la notable capacidad de regular su propia temperatura.

Una onda de calor se define como un periodo prolongado de alta temperatura en combinación con una excesiva humedad relativa. Formalmente, las ondas de calor se pueden definir como un evento en donde el máximo índice de calor excede por lo menos dos días consecutivos el valor de 105 °F (40.5 °C), mientras que el mínimo índice de calor debe exceder los 80 °F (26.7 °C) en esos días consecutivos. Las ondas de calor también tienen un impacto en la demanda de energía y genera un alto peligro de daño de órganos y muerte.

Para el Caribe, se recolectó y analizó datos provenientes del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés), cubriendo un periodo desde 1948 al 2014. En la temporada de lluvia tardía (Agosto – Noviembre), se detectó el mayor número de ondas de calor, localizadas en el Sur Oeste del Atlántico Norte, las Antillas Mayores con especial énfasis en Puerto Rico, el Este de República Dominicana y el lado este de Cuba (ver Figura 1).

Las ondas de calor se calcularon utilizando el índice de calor en estaciones con humedad relativa o datos de punto de rocío, pero en estaciones como en Samaná la temperatura del aire se utilizó para identificar eventos de días calurosos de acuerdo con la definición explicada. Samaná denota una disminución en eventos de ondas de calor con eventos más altos en el año 2000 y uno menor en 2014 (Figura 2).

Además, los eventos más grandes se observan en el período 1999-2002, mientras que en los últimos 8 años sólo se desarrollaron 6 eventos (ver figura 3). El análisis de frecuencia de las ondas de calor denota un cambio en el desarrollo del número de ondas de calor cuando se comparan dos periodos utilizando como base el año 2005. (ver figura 4).

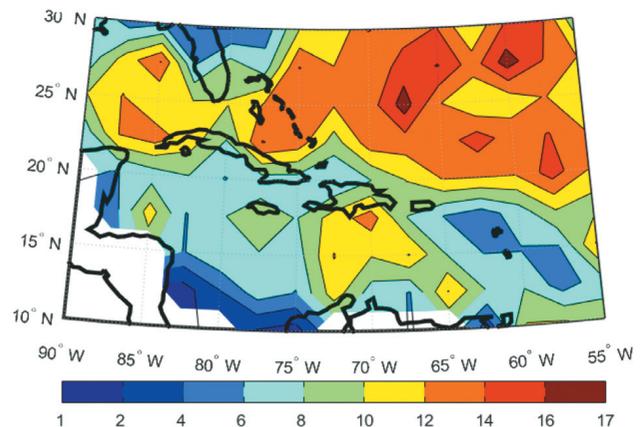


Figura 1

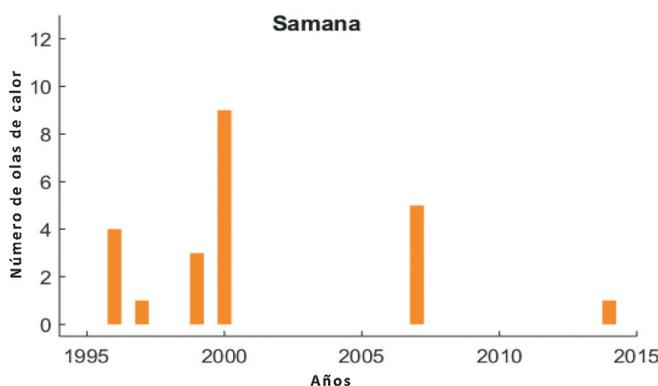


Figura 2

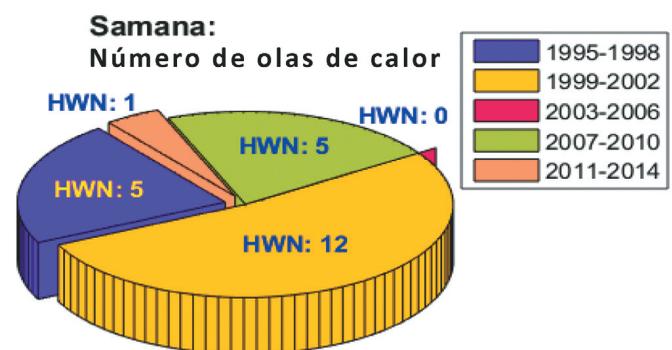


Figura 3

Proyecciones de ondas de calor

Las olas de calor se proyectaron usando la temperatura diaria del aire porque algunas estaciones meteorológicas no tienen datos de humedad relativa. Debido a esta restricción sólo la temperatura del aire se proyectó en el futuro utilizando estadística downscaling para representar la variación local en el futuro.

Para Samaná, existe un aumento de probabilidad en el número de ondas de calor más alto en el segundo periodo climático que se reducen a eventos calurosos entre 6 y 19 (figura 5). Además, esta provincia tiende a aumentar las olas de calor desde mediados del siglo XXI, pero con eventos más altos en los períodos 2071-2085 y 2086-2100 con 78 y 89 eventos, respectivamente (véase figura 6).

Conclusión

A partir de esta información, podemos determinar los períodos en los cuales vamos a ser afectados por una mayor cantidad de ondas de calor y podemos tomar las medidas necesarias para contrarrestar sus efectos. Las ondas de calor causan quemaduras en la piel, sarpullidos, deshidratación, sudoración excesiva, hipertermia y hasta la muerte. Algunas de las sugerencias a nivel personal para contrarrestar los efectos de estos eventos son:

- Uso de ropa ligera y de color claro,
- Beber abundante agua o líquidos,
- Evitar las actividades en el exterior en las horas más calurosas.

Además, existen otras medidas preventivas que puede ser llevada a cabo a nivel nacional, como la creación de programas de aclimatación al calor y centros de enfriamiento.

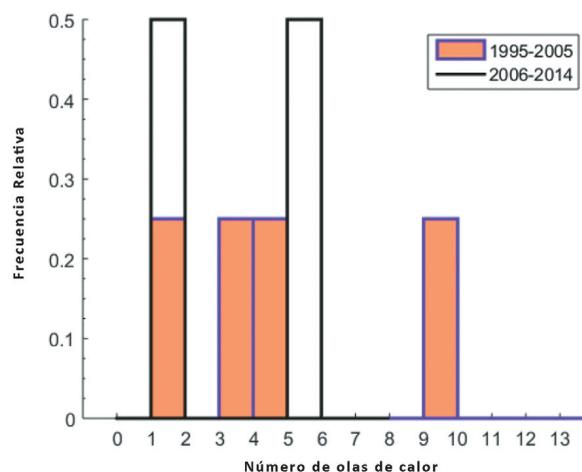


Figura 4

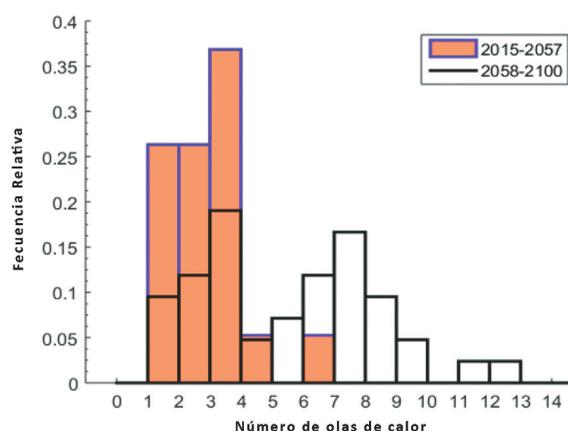


Figura 5

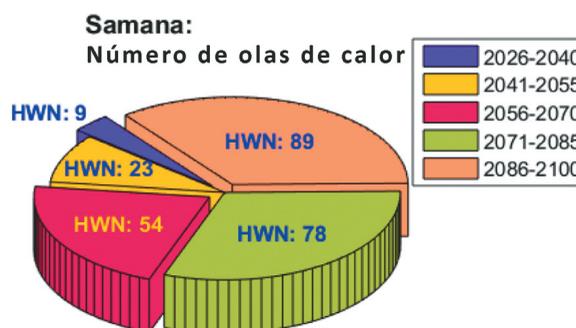


Figura 6

CONTACTO:

Rosaura Pimentel
Teléfono: 809-567-9271 ext 445
Email: rosaura.pimentel@intec.edu.do
Instituto Tecnológico de Santo Domingo
INTEC

Av. de Los Próceres, Los Jardines del Norte,
Santo Domingo, República Dominicana

Este material de difusión fue posible gracias al apoyo generoso provisto por el Pueblo estadounidense mediante la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y su receptor el Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC), según los términos de Acuerdo de Cooperación No. AID-517-A-15-00002 (Programa de Información Climática). El contenido y las opiniones aquí expresadas no reflejan necesariamente la posición o la política de USAID, y no se deberá inferir ninguna adopción oficial de las mismas.

PROGRAMA DE INFORMACIÓN CLIMÁTICA

SAMANÁ

Sequías

La sequía según su definición meteorológica se identifica cuando el índice de precipitación estándar (IPS) se encuentra entre -1.0 y -2.0. Cuando el IPS se encuentra entre -1.0 y -1.5 se establece que existe una sequía moderada, con un IPS entre -1.5 y -2.0 se tiene una sequía severa, mientras que para valores de IPS menores que -2.0, se desarrolla una sequía extrema (ver tabla 1).

El índice de sequía se analizó con una escala de tiempo de 3 meses utilizando datos del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés) con una resolución de 250 km. Este índice de sequía se calculó sobre toda la región del Caribe. El valor promedio sobre esta región amortigua la variabilidad espacial del índice en el Caribe pero proporciona la tendencia de sequía en promedio que tiene toda la región desde 1980 hasta el 2014. Se puede observar que a partir de 1990, los eventos de sequía son más frecuentes, intensificándose a partir del 2008 (ver figura 1).

La provincia de Samaná tiene amplias fluctuaciones de SPI alcanzando sequías extremas en 2000, 2001 y 2010. Desde 2005, en Samaná se registró un pequeño número de sequías moderadas, pero después de 2010 se detectan nuevos episodios de sequía con una tendencia a intensificarse como se muestra en el informe anual SPI (ver figuras 2a y 2b).

Juntando las sequías moderadas, severas y extremas, la evolución temporal de la sequía fue cuantificada en varios períodos según el registro de tiempo disponible. Samaná aumentan los eventos de sequía en los últimos cuatro años (figura 3).

Tabla 1. Índice de precipitación estandarizada

IPS	CLASIFICACIÓN
>2.0	Extremadamente húmedo
1.5 A 1.99	Muy húmedo
1.0 A 1.49	Moderadamente húmedo
0 A 0.99	Ligeramente húmedo
0 A -0.99	Sequía leve
-1.0 A -1.49	Sequía moderada
-1.5 A -1.99	Sequía severa
<-2.0	Sequía extrema

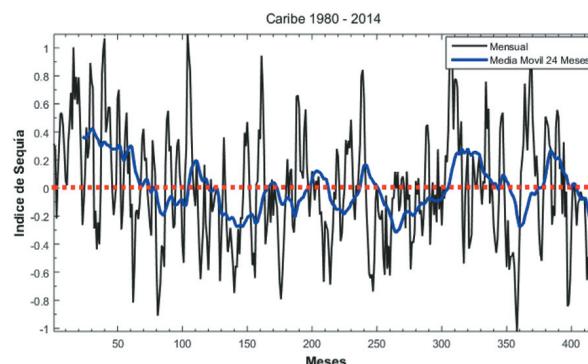


Figura 1

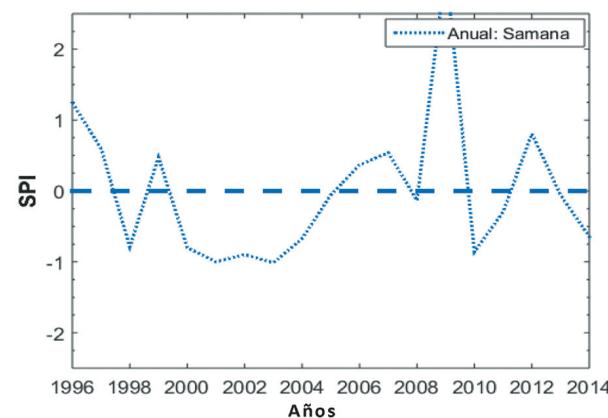


Figura 2a

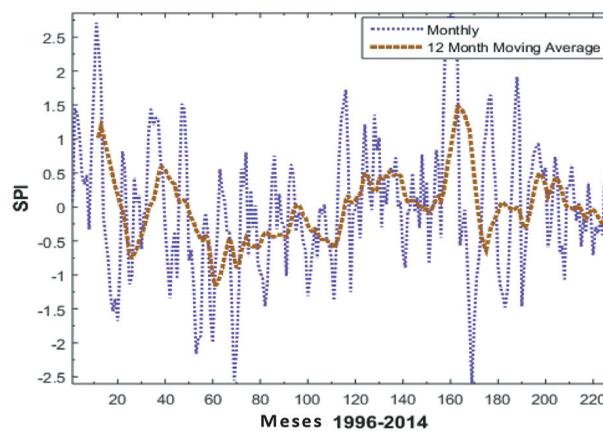
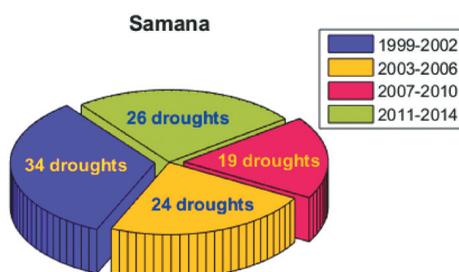


Figura 2b

Figura 3



Proyecciones de sequía

Se proyectaron eventos de sequía a lo largo del siglo XXI utilizando The Community Climate System Model (CCSM4) y el escenario RCP4.5, el cual es el más probable y puede alcanzar hasta 2°C a fines del siglo XXI. Se aplicó una reducción estadística a las salidas CCSM4 utilizando datos de precipitación de Samaná. Las series de tiempo de Samaná indican una tendencia de disminución de SPI con una tasa de -0,01 por año, pero con una disminución en la varianza SPI en las dos últimas décadas, lo que se traduce en una menor intensidad de sequía (véase la figura 4a). El análisis de frecuencia muestra un cambio claro en el SPI con un aumento en la probabilidad de desarrollar sequías leves (0,42) y disminución para los casos de sequías extremas, severas y moderadas y una intensificación de eventos húmedos (ver figura 4b). Además, el número de episodios de sequía aumenta drásticamente de 2056 a 2085 (218 eventos) para luego disminuir a 85 eventos en los últimos 15 años del siglo XXI (ver figura 4c).

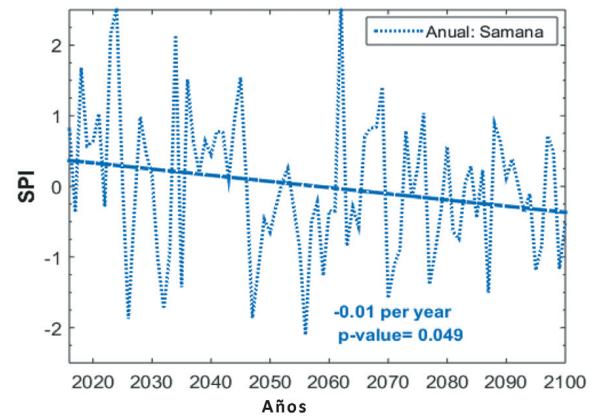


Figura 4a

Conclusión

A partir de esta información, podemos determinar los períodos en los cuales vamos a ser afectados por una gran cantidad de sequías y podemos tomar las medidas necesarias para contrarrestarlas. Las sequías impactan la agricultura, afectando la cosecha y la vegetación, modificando ecosistemas y hábitats. Como consecuencia de esto, la economía se ve afectada debido a la baja en la producción agrícola y ganadera, y los costos se incrementan debido a la importación. Sin embargo, estos efectos pueden minimizarse debido a las predicciones. La tabla 2 muestra algunas recomendaciones que pueden llevarse a cabo en temporadas de sequías.

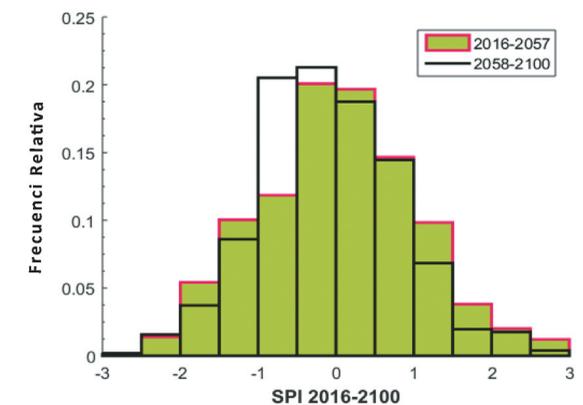


Figura 4b

Tabla 2. Recomendaciones en temporadas de sequía

Agricultura	Industrial	Doméstico	Manejo
Reduzca el riego en los parques municipales y el paisajismo.	Promover / reforzar la reducción en la frecuencia del lavado de ropa y de las torres en hoteles	Reducir la limpieza de las calles, la acera y el lavado automático	Aumentar el uso de agua reciclada
Derechos de riego de arrendamiento de agricultores	Imponga restricciones de riego en el paisaje al aire libre	Prohibir / limitar el llenado y el uso de piscinas	Reparar fugas en el sistema de distribución
Convierta las rociadas en un riego de bajo volumen donde sea apropiado	Promover / requerir la reducción de aire acondicionado refrigerado por agua	Desarrollar campañas de educación contra la sequía con estrategias de gestión de la demanda a largo plazo	Fomentar una intensa discusión pública y la participación de los medios de comunicación en relación con las formas de reducir el uso y reducir al mínimo los impactos.

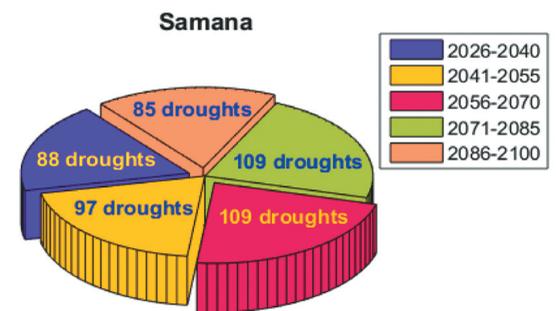


Figura 4c

CONTACTO:

Rosaura Pimentel
Teléfono: 809-567-9271 ext 445
Email: rosaura.pimentel@intec.edu.do
Instituto Tecnológico de Santo Domingo
INTEC

Av. de Los Próceres, Los Jardines del Norte,
Santo Domingo, República Dominicana

Este material de difusión fue posible gracias al apoyo generoso provisto por el Pueblo estadounidense mediante la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y su receptor el Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC), según los términos de Acuerdo de Cooperación No. AID-517-A-15-00002 (Programa de Información Climática). El contenido y las opiniones aquí expresadas no reflejan necesariamente la posición o la política de USAID, y no se deberá inferir ninguna adopción oficial de las mismas.

PROGRAMA DE INFORMACIÓN CLIMÁTICA

SANTIAGO

Ondas de calor

Los animales de sangre caliente, así como los seres humanos percibimos la pérdida de calor en vez de la temperatura del ambiente que nos rodea. Nuestro cuerpo pierde y gana energía debido a mecanismos de calor externos, sin embargo, nuestro organismo tiene la notable capacidad de regular su propia temperatura.

Una onda de calor se define como un periodo prolongado de alta temperatura en combinación con una excesiva humedad relativa. Formalmente, las ondas de calor se pueden definir como un evento en donde el máximo índice de calor excede por lo menos dos días consecutivos el valor de 105 °F (40.5 °C), mientras que el mínimo índice de calor debe exceder los 80 °F (26.7 °C) en esos días consecutivos. Las ondas de calor también tienen un impacto en la demanda de energía y genera un alto peligro de daño de órganos y muerte.

Para el Caribe, se recolectó y analizó datos provenientes del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés), cubriendo un periodo desde 1948 al 2014. En la temporada de lluvia tardía (Agosto – Noviembre), se detectó el mayor número de ondas de calor, localizadas en el Sur Oeste del Atlántico Norte, las Antillas Mayores con especial énfasis en Puerto Rico, el Este de República Dominicana y el lado este de Cuba (ver figura 1).

Desde 1997, en la provincia de Santiago, se detectan ondas de calor por primera vez. Con el tiempo, los eventos de agotamiento por calor aumentan, particularmente en 2010 (véase la figura 2a).

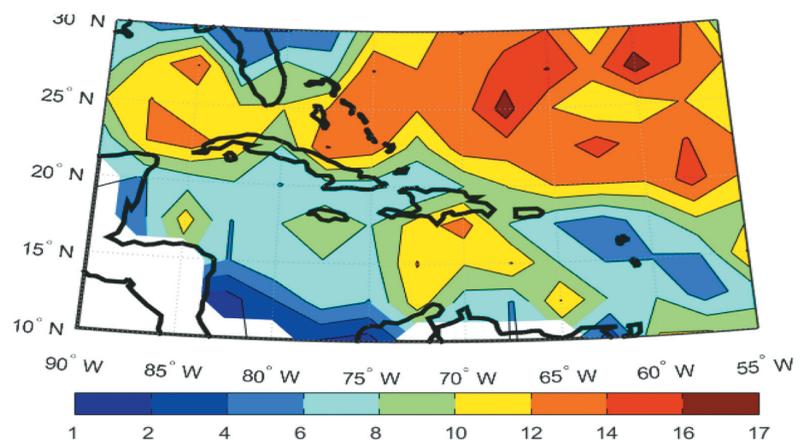


Figura 1

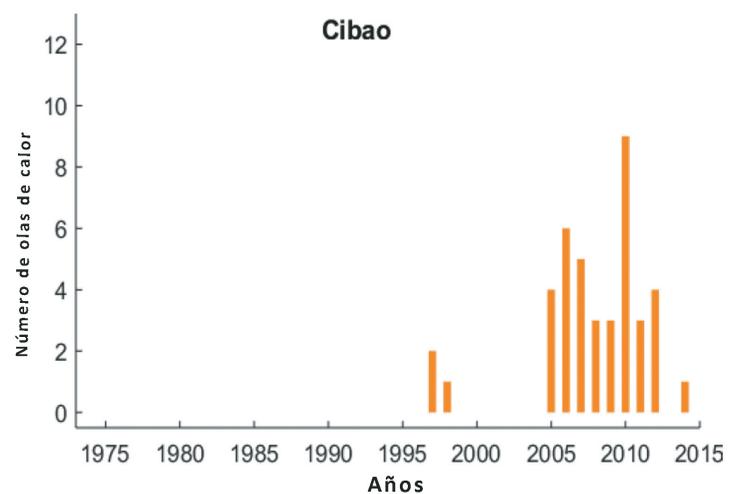


Figura 2a

Por otra parte, cero olas de calor caracterizan el período 1975-1995, 3 olas de calor caracterizan el período 1995-2004 y un aumento acelerado en los últimos 10 años con 38 eventos de días calurosos (figura 2b).

Proyecciones de ondas de calor

Las ondas de calor se proyectaron usando la temperatura diaria del aire porque algunas estaciones meteorológicas no tienen datos de humedad relativa. Debido a esta restricción sólo la temperatura del aire se proyectó.

En Santiago, los episodios de olas de calor aumentan muy rápidamente hasta mediados del siglo XXI y permanecen en torno a 6 eventos por año en promedio. La distribución del número de ondas de calor señala un cambio marcado en el número de ondas de calor con mayor probabilidad de obtener números de eventos más grandes en el segundo período (2058-2100). La probabilidad de tener entre 6 y 10 eventos es de 0,43. Además, las ondas de calor aumentan muy rápidamente en el período climático 2071-2085 con 81 eventos, mientras que al final del siglo XXI (2086-2100) el número de eventos llega a 94 (ver figura 3).

Conclusión

A partir de esta información, se puede determinar los períodos en los cuales la población se verá afectada por una mayor cantidad de ondas de calor y así poder tomar las medidas necesarias para contrarrestar sus efectos. Las ondas de calor causan quemaduras en la piel, sarpullidos, deshidratación, sudoración excesiva, hipertermia y hasta la muerte. Algunas de las sugerencias a nivel personal para contrarrestar los efectos de estos eventos son:

- Uso de ropa ligera y de color claro,
- Beber abundante agua o líquidos,
- Evitar las actividades en el exterior en las horas más calurosas.

Además, existen otras medidas preventivas que puede ser llevada a cabo a nivel nacional, como la creación de programas de aclimatación al calor y centros de enfriamiento.

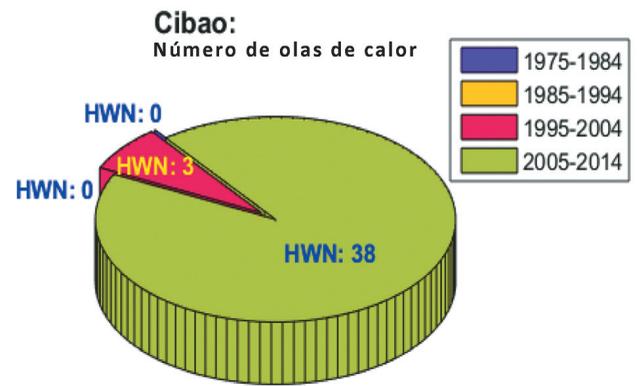


Figura 2b

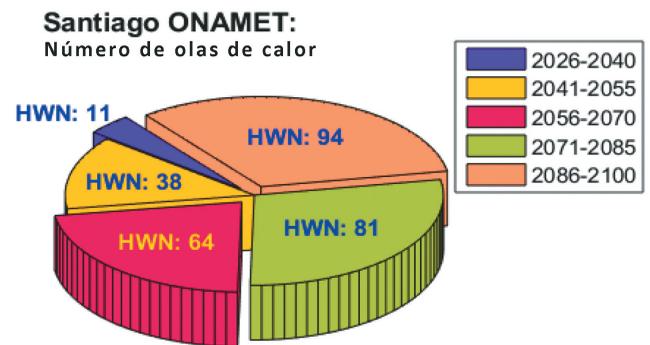


Figura 3

CONTACTO:

Rosaura Pimentel
Teléfono: 809-567-9271 ext 445
Email: rosaura.pimentel@intec.edu.do
Instituto Tecnológico de Santo Domingo
INTEC

Av. de Los Próceres, Los Jardines del Norte,
Santo Domingo, República Dominicana

Este material de difusión fue posible gracias al apoyo generoso provisto por el Pueblo estadounidense mediante la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y su receptor el Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC), según los términos de Acuerdo de Cooperación No. AID-517-A-15-00002 (Programa de Información Climática). El contenido y las opiniones aquí expresadas no reflejan necesariamente la posición o la política de USAID, y no se deberá inferir ninguna adopción oficial de las mismas.

PROGRAMA DE INFORMACIÓN CLIMÁTICA

SANTIAGO

Eventos de Sequía

La sequía según su definición meteorológica se identifica cuando el índice de precipitación estándar (IPS) se encuentra entre -1.0 y -2.0. Cuando el IPS se encuentra entre -1.0 y -1.5 se establece que existe una sequía moderada, un IPS entre -1.5 y -2.0 se tiene una sequía severa, mientras que para valores de IPS menores que -2.0, se desarrolla una sequía extrema (ver Tabla 1).

El índice de sequía se analizó con una escala de tiempo de 3 meses utilizando datos del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés) con una resolución de 250 km. Este índice de sequía se calculó sobre toda la región del Caribe. El valor promedio sobre esta región amortigua la variabilidad espacial del índice en el Caribe pero proporciona la tendencia de sequía en promedio que tiene toda la región desde 1980 hasta el 2014. Se puede observar que a partir de 1990, los eventos de sequía son más frecuentes, intensificándose a partir del 2008 (ver figura 1).

Juntando las sequías moderadas, severas y extremas, la evolución temporal de la sequía fue cuantificada en varios períodos según el registro de tiempo disponible. Santiago muestra una disminución en los episodios de sequía con 17 eventos en los últimos cuatro años (estación ONAMET), pero con una disminución más alta y más rápida en Cibao (ver figuras 2a y 2b).

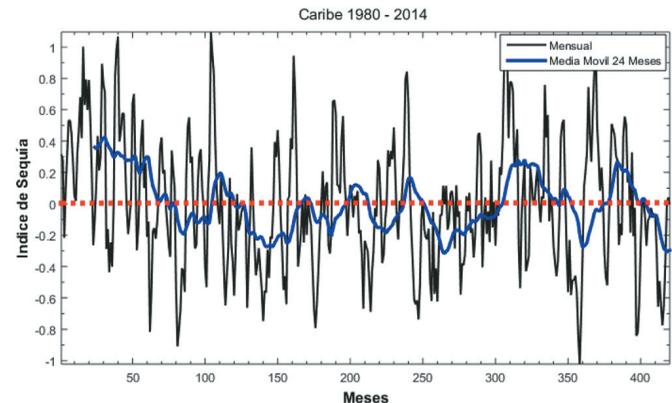


Figura 1

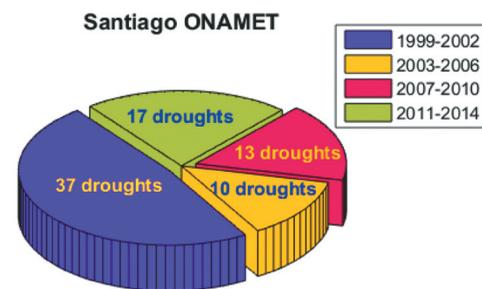


Figura 2a

Tabla 1. Índice de precipitación estandarizada

IPS	CLASIFICACIÓN
>2.0	Extremadamente húmedo
1.5 A 1.99	Muy húmedo
1.0 A 1.49	Moderadamente húmedo
0 A 0.99	Ligeramente húmedo
0 A -0.99	Sequía leve
-1.0 A -1.49	Sequía moderada
-1.5 A -1.99	Sequía severa
<-2.0	Sequía extrema

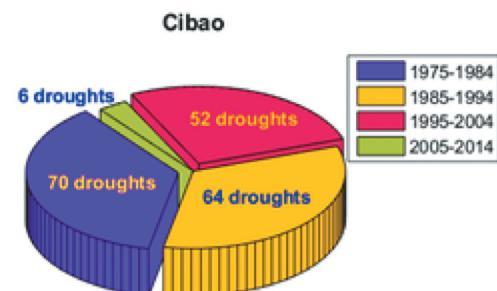


Figura 2b

Se proyectaron eventos de sequía a lo largo del siglo XXI utilizando *The Community Climate System Model (CCSM4)* y el escenario RCP4.5. Se utilizó este escenario debido a que es el más probable ya que puede alcanzar hasta 2°C a finales del siglo XXI. Santiago representa una región con tendencia a intensificar los eventos de sequía bajo el escenario RCP4.5. En contraste con Santo Domingo, estas provincias evidencian una tendencia a desarrollar sequías más fuertes a finales del siglo XXI (ver figura 3). El aumento de probabilidad de ocurrencia de sequía se observa en el período futuro de 2058 a 2100 con una probabilidad de 0,2 para desarrollar sequías suaves y 0,1 / 0,06 para generar sequías moderadas/severas. La evolución temporal de los eventos de sequía muestra un aumento en los eventos de sequía que han producido 101 eventos en los últimos 10 años del siglo XXI. El segundo déficit más alto se proyecta en la década de 2041-2055 (figura 4).

Conclusión

A partir de esta información, podemos determinar los periodos en los cuales vamos a ser afectados por una gran cantidad de sequias y podemos tomar las medidas necesarias para contrarrestarlas. Las sequias impactan la agricultura, afectando la cosecha y la vegetación modificando ecosistemas y hábitats. Como consecuencia de esto, la economía se ve afectada debido a la baja en la producción agrícola y ganadera, y los costos se incrementan debido a la importación. Sin embargo, estos efectos pueden minimizarse debido a las predicciones. La tabla 2 muestra algunas recomendaciones que pueden llevarse a cabo en temporadas de sequías.

Tabla 2. Recomendaciones en temporadas de sequía

Agricultura	Industrial	Doméstico	Manejo
Reduzca el riego en los parques municipales y el paisajismo.	Promover / reforzar la reducción en la frecuencia del lavado de ropa y de las torres en hoteles	Reducir la limpieza de las calles, la acera y el lavado automático	Aumentar el uso de agua reciclada
Derechos de riego de arrendamiento de agricultores	Imponga restricciones de riego en el paisaje al aire libre	Prohibir / limitar el llenado y el uso de piscinas	Reparar fugas en el sistema de distribución
Convierta las rociadas en un riego de bajo volumen donde sea apropiado	Promover / requerir la reducción de aire acondicionado refrigerado por agua	Desarrollar campañas de educación contra la sequía con estrategias de gestión de la demanda a largo plazo	Fomentar una intensa discusión pública y la participación de los medios de comunicación en relación con las formas de reducir el uso y reducir al mínimo los impactos.

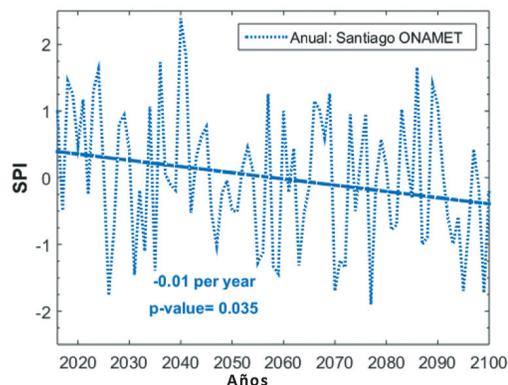


Figura 3

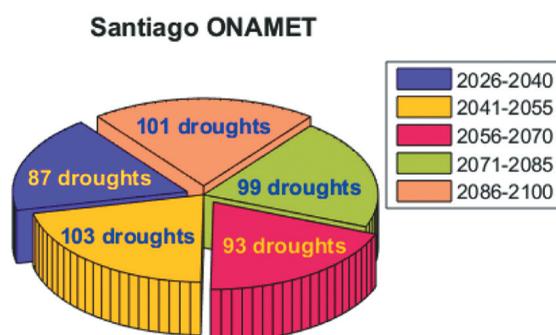


Figura 4

CONTACTO:

Rosaura Pimentel
Teléfono: 809-567-9271 ext 445
Email: rosaura.pimentel@intec.edu.do
Instituto Tecnológico de Santo Domingo
INTEC

Av. de Los Próceres, Los Jardines del Norte,
Santo Domingo, República Dominicana

Este material de difusión fue posible gracias al apoyo generoso provisto por el Pueblo estadounidense mediante la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y su receptor el Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC), según los términos de Acuerdo de Cooperación No. AID-517-A-15-00002 (Programa de Información Climática). El contenido y las opiniones aquí expresadas no reflejan necesariamente la posición o la política de USAID, y no se deberá inferir ninguna adopción oficial de las mismas.

PROGRAMA DE INFORMACIÓN CLIMÁTICA



USAID
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS
UNIDOS DE AMÉRICA

The City College
of New York



intec
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SANTO DOMINGO

Análisis de Inundación

Riesgo de inundación en zonas al margen del río Ozama, República Dominicana

Santo Domingo, posee uno de los ríos más caudalosos del país, el Río Ozama, donde la cuenca del río abarca 2,686 kilómetros cuadrados y recorre 148 kilómetros. Este estudio se enfoca en 4.38 kilómetros del río antes de desembocar en el mar Caribe, tal como se muestra en la (ver figura 1).

La modelación de ríos está dividida en dos componentes. En el primer componente se define la geometría del río y de los puentes, mientras que en el segundo se establece los caudales a analizar. En el tramo del río seleccionado se encuentran dos principales puentes, Francisco del Rosario Sánchez y Juan Bosch, cuyas dimensiones y áreas se introdujeron en *Hydrologic Engineering Center and River Analysis System* (HEC-RAS), teniendo en cuenta las pilastras, la longitud y ancho del puente, así como su altura máxima y mínima, tal como se muestra en la figura 2.

En el segundo componente, se estimó el caudal máximo que se puede esperar una vez cada 25, 50, 75 y 100 años y se introdujo en HEC-RAS. De este modo se genera un perfil para cada período (25, 50, 75, y 100). El perfil número uno corresponde al caudal máximo correspondiente a 25 años, el perfil número dos corresponde a 50 años, etc. Para cada perfil, se calcularon áreas de inundación con el fin de identificar los



Figura 1 Área de estudio del río Ozama en Santo Domingo

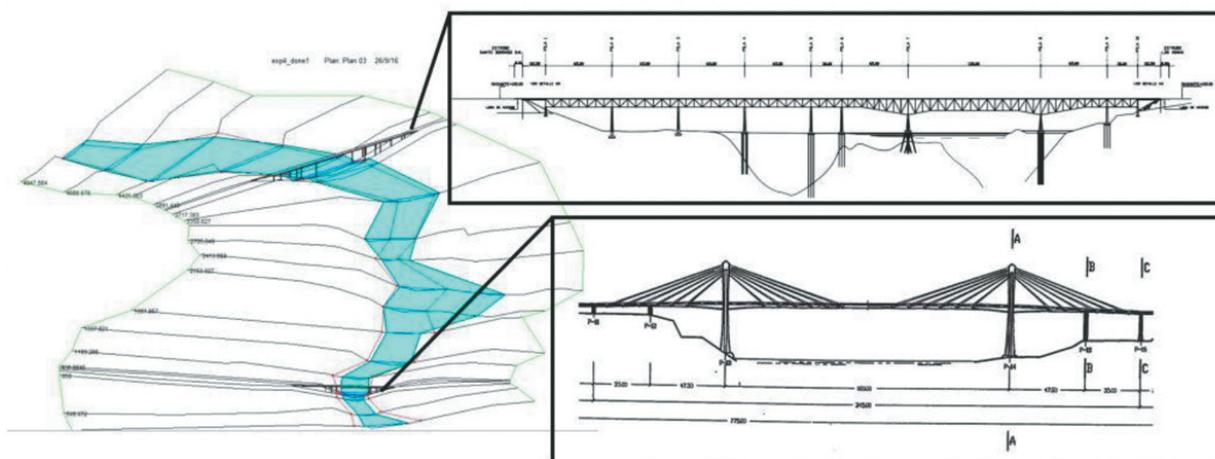


Figura 2 muestra los puentes Francisco del Rosario Sánchez y Juan Bosch y sus respectivas localizaciones en el modelo.

barrios que serían afectados por estos caudales. La Tabla 1 muestra las zonas afectadas para cada perfil.

La comparación de las áreas de inundación correspondiente a diferentes períodos de retorno indica que el Río Ozama es altamente sensible a elevaciones repentinas de caudales debido a eventos de tormenta. Con un período de retorno de 25 años, gran parte del área inundable es cubierta por el agua, mientras que para períodos de retorno mayores el incremento en el área inundado es relativamente pequeño. La particular geometría de las secciones transversales del Río Ozama, debido a que atraviesa la ciudad, ocasiona que un caudal de flujo no muy grande inunde rápidamente el lecho del río y su llanura de inundación cercana a la orilla del río. Luego esta llanura de inundación se expande rápidamente ocasionando que caudales mayores generen elevaciones pequeñas de la superficie del agua. Es por esto por lo que la cantidad de agua requerida para inundar áreas relativamente pequeñas es cada vez mayor.



Conclusión

A partir de esta información, podemos identificar las zonas más vulnerables a inundaciones. Lo que nos permite, tomar medidas de acción cuando se aproximen eventos con caudales picos de tal magnitud. Posibles medidas serían la construcción de estructuras de retención, políticas y planeamiento urbano, mejorar la resiliencia, disminuir la vulnerabilidad de las personas ubicadas en las zonas inundables, y contribuir a la mejora o el mantenimiento de las condiciones hidro-morfológicas de los ríos.

Tabla 1. Zonas vulnerables para cada perfil o período de retorno.

Perfiles	Período de Retorno (años)	Caudal (m³/s)	Área (Km²)	Zonas Afectadas
1	25	382.5014	1.485	Gualey, Los Guandules, La Ciénega, Barrio Oxígeno, Rivera del Ozama.
2	50	465.5128	1.524	Gualey, Los Guandules, La Ciénega, Barrio Oxígeno, Rivera del Ozama.
3	75	518.0513	1.548	Gualey, Los Guandules, La Ciénega, Barrio Oxígeno, Rivera del Ozama, Atarazana.
4	100	557.2511	1.554	Gualey, Los Guandules, La Ciénega, Barrio Oxígeno, Rivera del Ozama, Atarazana, Barrio Dique

CONTACTO:

Rosaura Pimentel
 Teléfono: 809-567-9271 ext 445
 Email: rosaura.pimentel@intec.edu.do
 Instituto Tecnológico de Santo Domingo
 INTEC

Av. de Los Próceres, Los Jardines del Norte,
 Santo Domingo, República Dominicana

Este material de difusión fue posible gracias al apoyo generoso provisto por el Pueblo estadounidense mediante la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y su receptor el Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC), según los términos de Acuerdo de Cooperación No. AID-517-A-15-00002 (Programa de Información Climática). El contenido y las opiniones aquí expresadas no reflejan necesariamente la posición o la política de USAID, y no se deberá inferir ninguna adopción oficial de las mismas.

PROGRAMA DE INFORMACIÓN CLIMÁTICA

SANTO DOMINGO

Ondas de calor

Los animales de sangre caliente, así como los seres humanos percibimos la pérdida de calor en vez de la temperatura del ambiente que nos rodea. Nuestro cuerpo pierde y gana energía debido a mecanismos de calor externos, sin embargo, nuestro organismo tiene la notable capacidad de regular su propia temperatura.

Una onda de calor se define como un período prolongado de alta temperatura en combinación con una excesiva humedad relativa. Formalmente, las ondas de calor se pueden definir como un evento en donde el máximo índice de calor excede por lo menos dos días consecutivos el valor de 105 °F (40.5 °C), mientras que el mínimo índice de calor debe exceder los 80 °F (26.7 °C) en esos días consecutivos. Las ondas de calor también tienen un impacto en la demanda de energía y genera un alto peligro de daño de órganos y puede causar la muerte.

Para el Caribe, se recolectó y analizó datos provenientes del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés), cubriendo un período desde 1948 al 2014. En la temporada de lluvia tardía (agosto – noviembre), se detectó el mayor número de ondas de calor, localizadas en el Suroeste del Atlántico Norte, las Antillas Mayores con especial énfasis en Puerto Rico, el Este de República Dominicana y el lado Este de Cuba (ver figura 1).

Las ondas de calor se calcularon usando el índice de calor en estaciones con humedad relativa o datos de punto de rocío. Santo Domingo no muestra el desarrollo de eventos de olas de calor pasados, pero desde 1997 las olas de calor comienzan a surgir e intensificarse (ver figura 2a). De 1975 a 1994 no se observaron olas de calor, pero en los últimos 10 años (2005-2014) 36 olas de calor impactaron a esta provincia (figura 2b).

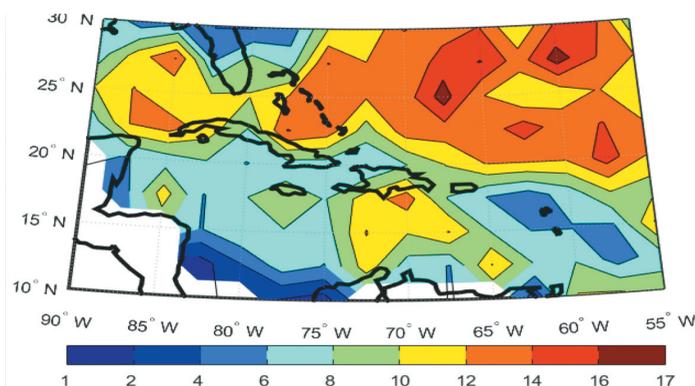


Figura 1

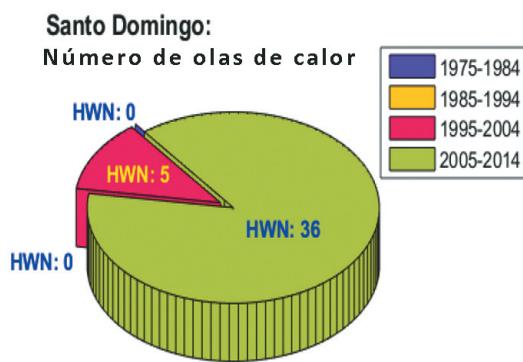


Figura 2a

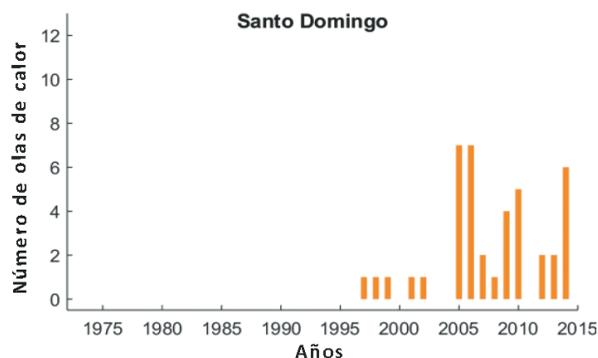


Figura 2b

Proyecciones de ondas de calor

Santo Domingo proyecta un aumento continuo de las olas de calor, particularmente después de mediados y al final del siglo XXI (figura 3a). Además, hay un cambio en la distribución del número de ondas de calor con mayor probabilidad de tener mayor número de eventos. En el segundo período climático (2058-2100) surge la probabilidad de tener incluso 14 eventos por mes mientras que en el primer período (2015-2057) el máximo corresponde a 7 eventos por meses (figura 3b). La evolución temporal de las ondas de calor indica una clara tendencia a aumentar con la mayor ocurrencia de eventos en los últimos 15 años (90 eventos) del siglo XXI. Después de mediados de siglo, el segundo mayor número de ondas de calor se detecta con 65 eventos (figura 3c).

Conclusión

A partir de esta información, podemos determinar los periodos en los cuales vamos a ser afectados por una mayor cantidad de ondas de calor, y así podemos tomar las medidas necesarias para contrarrestar sus efectos. Las ondas de calor causan quemaduras en la piel, sarpullidos, deshidratación, sudoración excesiva, hipertermia y hasta la muerte. Algunas de las sugerencias a nivel personal para contrarrestar los efectos de estos eventos son:

- Uso de ropa ligera y de color claro,
- Beber abundante agua o líquidos,
- Evitar las actividades en el exterior en las horas más calurosas.

Además, existen otras medidas preventivas que pueden ser llevadas a cabo a nivel nacional, como la creación de programas de aclimatación al calor y centros de enfriamiento.

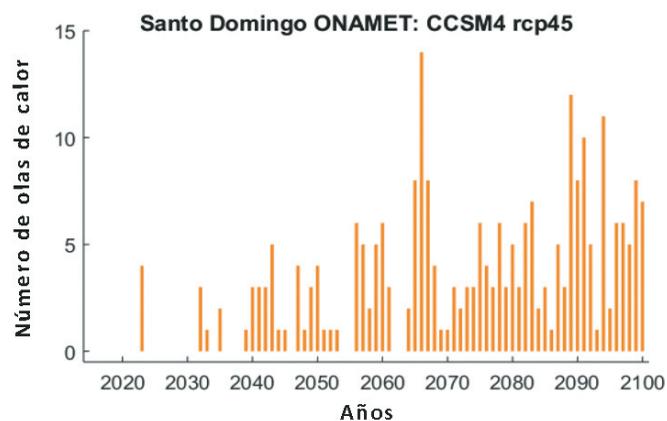


Figura 3a

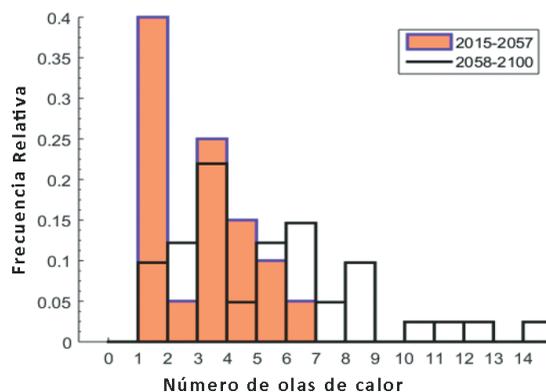


Figura 3b

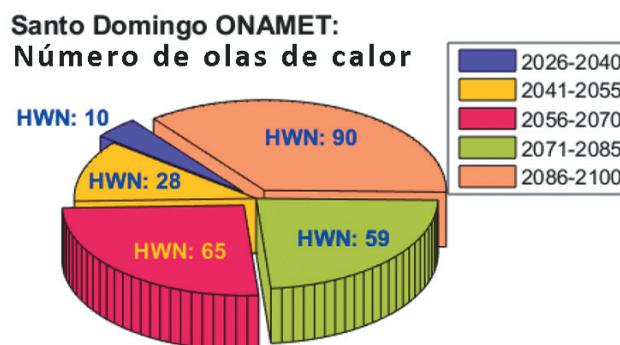


Figura 3c

CONTACTO:

Rosaura Pimentel
Teléfono: 809-567-9271 ext 445
Email: rosaura.pimentel@intec.edu.do
Instituto Tecnológico de Santo Domingo
INTEC

Av. de Los Próceres, Los Jardines del Norte,
Santo Domingo, República Dominicana

Este material de difusión fue posible gracias al apoyo generoso provisto por el Pueblo estadounidense mediante la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y su receptor el Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC), según los términos de Acuerdo de Cooperación No. AID-517-A-15-00002 (Programa de Información Climática). El contenido y las opiniones aquí expresadas no reflejan necesariamente la posición o la política de USAID, y no se deberá inferir ninguna adopción oficial de las mismas.

PROGRAMA DE INFORMACIÓN CLIMÁTICA



SANTO DOMINGO

Sequías

La sequía según su definición meteorológica se identifica cuando el índice de precipitación estándar (IPS) se encuentra entre -1.0 y -2.0. Cuando el IPS se encuentre entre -1.0 y -1.5 se establece que existe una sequía moderada, un IPS entre -1.5 y -2.0 se tiene una sequía severa, mientras que para valores de IPS menores que -2.0, se desarrolla una sequía extrema (ver tabla 1).

El índice de sequía se analizó con una escala de tiempo de 3 meses utilizando datos del Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés) con una resolución de 250 km. Este índice de sequía se calculó sobre toda la región del Caribe. El valor promedio sobre esta región amortigua la variabilidad espacial del índice en el Caribe pero proporciona la tendencia de sequía en promedio que tiene toda la región desde 1980 hasta el 2014. Se puede observar que, a partir de 1990, los eventos de sequía son más frecuentes, intensificándose a partir del 2008 (ver figura 1).

Juntando las sequías leves, moderadas, severas y extremas, la evolución de la sequía temporal se cuantificó en varios períodos de acuerdo con el registro de tiempo disponible. Las provincias de Santo Domingo indican una tendencia a disminuir los eventos de sequía hasta el 2004, pero posteriormente se observa una intensificación con 30 sequías en la estación ONAMET de Santo Domingo y 49 en la estación Santo Domingo - NCDC (ver figuras 2a y 2b).

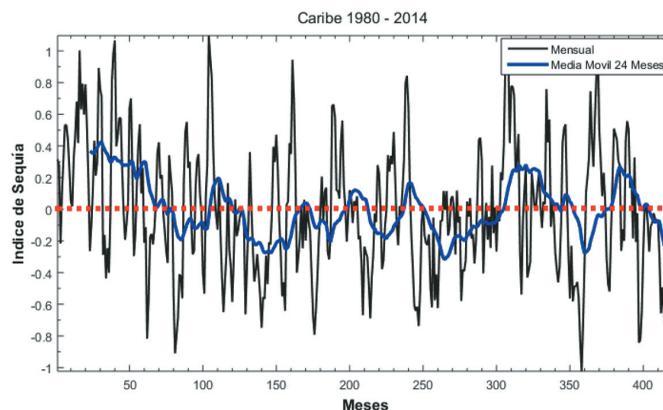


Figura 1

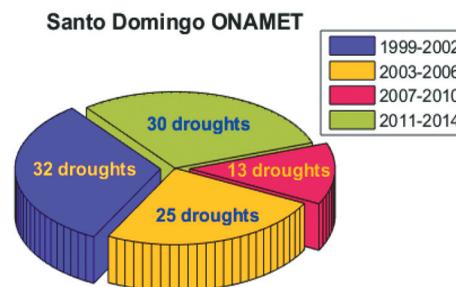


Figura 2a

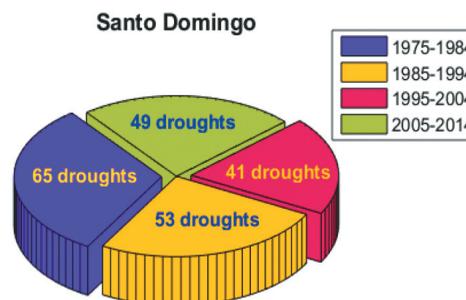


Figura 2b

Tabla 1. Índice de precipitación estandarizada

IPS	CLASIFICACIÓN
>2.0	Extremadamente húmedo
1.5 A 1.99	Muy húmedo
1.0 A 1.49	Moderadamente húmedo
0 A 0.99	Ligeramente húmedo
0 A -0.99	Sequía leve
-1.0 A -1.49	Sequía moderada
-1.5 A -1.99	Sequía severa
<-2.0	Sequía extrema

En Santo Domingo, *The Community Climate System Model (CCSM4)* proyecta una disminución de la tasa de 0.01 por año, lo que se traduce en una tendencia a intensificar los eventos de sequía. Además, el análisis de frecuencia representa un aumento en la probabilidad futura para desarrollar sequías leves (0.35) y severas (0.04) en el segundo período (2058-2100). En el primer período futuro (2016-2057) predomina la sequía leve y moderada (véase la figura 3a). Además, el desarrollo de sequías leves a extremas se dividió en períodos de 15 años. El número de sequías aumenta continuamente de 2016 a 2085 con 105 eventos de sequía comienzan a disminuir hasta 89 eventos que corresponden a una tendencia a estabilizar la concentración de CO₂ en la atmósfera. 3b).

Conclusión

A partir de esta información, podemos determinar los periodos en los cuales vamos a ser afectados por una gran cantidad de sequías y podemos tomar las medidas necesarias para contrarrestarlas. Las sequías impactan la agricultura, afectando la cosecha y la vegetación modificando ecosistemas y hábitats. Como consecuencia de esto, la economía se ve afectada debido a la baja en la producción agrícola y ganadera, y los costos se incrementan debido a la importación. Sin embargo, estos efectos pueden minimizarse debido a las predicciones. La tabla 2 muestra algunas recomendaciones que pueden llevarse a cabo en temporadas de sequías.

Tabla 2. Recomendaciones en temporadas de sequía

Agricultura	Industrial	Doméstico	Manejo
Reduzca el riego en los parques municipales y el paisajismo.	Promover / reforzar la reducción en la frecuencia del lavado de ropa y de las torres en hoteles	Reducir la limpieza de las calles, la acera y el lavado automático	Aumentar el uso de agua reciclada
Derechos de riego de arrendamiento de agricultores	Imponga restricciones de riego en el paisaje al aire libre	Prohibir / limitar el llenado y el uso de piscinas	Reparar fugas en el sistema de distribución
Convierta las rociadas en un riego de bajo volumen donde sea apropiado	Promover / requerir la reducción de aire acondicionado refrigerado por agua	Desarrollar campañas de educación contra la sequía con estrategias de gestión de la demanda a largo plazo	Fomentar una intensa discusión pública y la participación de los medios de comunicación en relación con las formas de reducir el uso y reducir al mínimo los impactos.

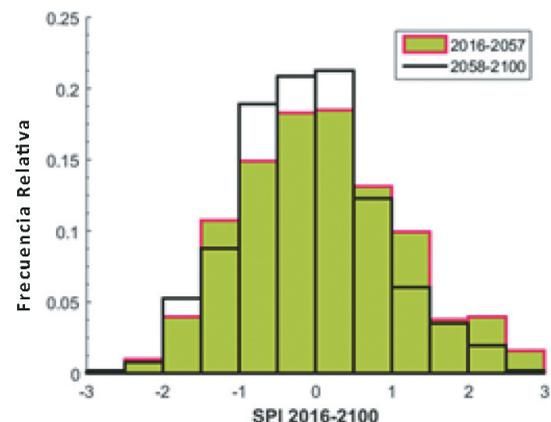


Figura 3a

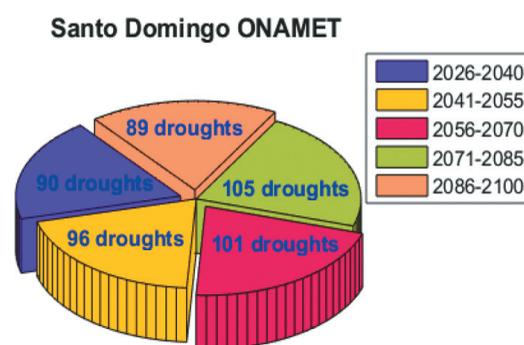


Figura 3b

CONTACTO:

Rosaura Pimentel
Teléfono: 809-567-9271 ext 445
Email: rosaura.pimentel@intec.edu.do
Instituto Tecnológico de Santo Domingo
INTEC

Av. de Los Próceres, Los Jardines del Norte,
Santo Domingo, República Dominicana

Este material de difusión fue posible gracias al apoyo generoso provisto por el Pueblo estadounidense mediante la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y su receptor el Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC), según los términos de Acuerdo de Cooperación No. AID-517-A-15-00002 (Programa de Información Climática). El contenido y las opiniones aquí expresadas no reflejan necesariamente la posición o la política de USAID, y no se deberá inferir ninguna adopción oficial de las mismas.

PROGRAMA DE INFORMACIÓN CLIMÁTICA

Esta edición de *Clima Futuro en la República Dominicana*, del Programa USAID - INTEC de Información Climática, se terminó de imprimir en febrero de 2018, en los talleres gráficos de Editora Búho, S.R.L., Santo Domingo, República Dominicana.

PROGRAMA DE —————
INFORMACIÓN CLIMÁTICA