



*i*Presas  
Risk Analysis

**Nota**  
**Metodológica: Impacto del cambio climático en la carretera RN5 (Haití)**

Julio de 2018

**iPresas Risk Analysis**

Avda. del Puerto, 180, 1ºB

46023 – Valencia

Tel.: (34) 963 309 121

[www.ipresas.com](http://www.ipresas.com)

*Imagen de portada:*

---

Obra de drenaje destruida previsiblemente durante las inundaciones del año 2008. Intersección del río La Branle con la carretera RN5 alrededor del PK 11 desde su inicio en Carrefour Joffre.

## ÍNDICE DEL DOCUMENTO

---

1.	Introducción y alcance de los trabajos .....	9
2.	Conceptos Generales de Cambio Climático en la Zona de Estudio .....	11
2.1.	<i>Modelos Matemáticos Empleados en la Predicción de Cambio Climático .....</i>	<i>11</i>
2.2.	<i>Previsión del Impacto de Cambio Climático en la zona de estudio .....</i>	<i>14</i>
3.	Recomendaciones para incluir el Cambio Climático en el Diseño .....	15
3.1.	<i>Resumen de las Recomendaciones .....</i>	<i>15</i>
3.2.	<i>Recomendaciones para incluir el efecto del CC en: Tormentas de diseño.....</i>	<i>15</i>
3.3.	<i>Recomendaciones para incluir el efecto del CC en: Temperaturas de Diseño.....</i>	<i>23</i>
3.4.	<i>Recomendaciones para incluir el efecto del CC en: Usos del suelo.....</i>	<i>25</i>
	Referencias.....	35



## ÍNDICE DEL TABLAS

Tabla 1: Resumen de recomendaciones para incluir los efectos del cambio climático en el diseño de la carretera. ....	15
Tabla 2: Resumen de datos diarios de lluvia para cinco estaciones cercanas a la zona de estudio .....	19
Tabla 3: Ajuste mediante regresión polinómica de grado 2. Datos observados (y), Datos simulados (x). Bondad de ajuste .....	20
Tabla 4: Resumen del análisis de distribución de frecuencias. Parámetros de la distribución de Gumbel e Intensidad de lluvia diaria máxima (mm/h) para varios periodos de retorno y estaciones meteorológicas. ....	21
Tabla 5: Incremento porcentual respecto al escenario histórico de los valores de lluvia máxima diaria esperados para tres escenarios tendenciales de cambio climático, 6 periodos de retorno y cuatro estaciones meteorológicas .....	22
Tabla 6: Recomendación propuesta para incluir el efecto del CC en la elaboración de tormentas de diseño. Incremento porcentual respecto a escenario actual de la máxima precipitación (mm) en 24h esperada para varios periodos de retorno y estaciones meteorológicas. ....	23
Tabla 7: Resumen de las proyecciones para el cambio de temperatura (mínimas, media y máximas) en Haití. Modelo PRECIS (Provisión de Climas Regionales para Estudios de Impacto). RCM para Haití con una resolución de 25 km Rojo: Zona de estudio en bloque B1 y horizonte temporal final de siglo. (IADB, 2015).....	24
Tabla 8: Sistema de clasificación de usos del suelo (IGBP).....	26
Tabla 9: Valores de referencia del Número de Curva en función del uso del suelo y condición del mismo. ....	27



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Metodología seguida para el análisis de riesgos naturales en la carretera RN5.....	9
Figura 2: Modelo PRECIS Malla de 25x25 km. Zona de estudio (RN5) en bloque B1 cuadrantes 32-33-34-40-41. (IADB, 2015) .....	11
Figura 3: Ilustración esquemática de los escenarios IE-EE. (IPCC, 2000).....	12
Figura 4: Emisiones anuales de CO <sub>2</sub> provenientes de todas las fuentes de energía entre 1900-2100 en gigatoneladas de carbono (GtC/año). Escenarios de emisión IE-EE (IPCC, 2000).....	12
Figura 5: Proyección de la evolución en la radiación atmosférica y emisión de CO <sub>2</sub> para los cuatro escenarios RCPs y horizonte temporal 2000-2100.....	13
Figura 6: Gráfico (ZETAC vs Hurricane Model) que representa el porcentaje de incremento de intensidad de lluvia en huracanes del Atlántico por el calentamiento global para 100km desde el núcleo respecto a la situación actual para diferentes escenarios de emisión. (Knutson et al, 2013) .....	16
Figura 7: Intensidad de lluvia (mm/día) asociado a tormentas tropicales para clima presente, calentamiento global y diferencia entre escenarios. (Knutson T. J., 2010) .....	16
Figura 8: Trayectorias de los ciclones en Haití (BRGM, 2016). Radio de 100 km que engloba varias trayectorias del centro de huracanes en los últimos años y que incluye a la zona de estudio entre Gonaives y Port de Paix. ....	17
Figura 9: Proyecciones para el cambio en la frecuencia de una precipitación actual asociada a una tormenta de 24h y 20 años de periodo de retorno. Fuente: (IPCC, 2012) .....	17
Figura 10: Datos máximos anuales de lluvia diaria (mm en 24h) simulados del modelo climático CanESM2 para el periodo histórico 1950-2005. ....	19
Figura 11: Ajuste (Simulación CanESM2 vs Datos Observados) para la estación de Port de Paix.....	20
Figura 12: Registro anual de las temperaturas medias, máximas y mínimas en Haití (1901-2013) (IADB, 2015).....	23





## ACRÓNIMOS

---

BID: Banco Interamericano de Desarrollo

GCM: Modelos de Circulación Global

IDF: Intensidad Duración Frecuencia

IE-EE: Informe Especial de Escenario de Emisión

IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

MTPTC: Ministère des Travaux Publics, Transports et Communications.

RCM: Modelos de Circulación Regional

RCP: Representative Concentration Pathways

RN5: Carretera Nacional Número 5 de Haití



## 1. INTRODUCCIÓN Y ALCANCE DE LOS TRABAJOS

El presente informe describe el impacto del cambio climático en Haití y en la carretera nacional número cinco (RN5) del país en el marco del contrato *Consultoría para el análisis de riesgo de desastres y cambio climático, Haití, programa Transporte y Conectividad Departamental (HA-L1104)* para el Banco Interamericano de Desarrollo (BID). El objetivo de este contrato es realizar un análisis cuantitativo de los riesgos naturales que amenazan a la carretera nacional RN5, analizando diferentes alternativas de mejora y escenarios futuros, y basándose en un proceso de identificación de modos de fallo en la zona de estudio. Este proceso permitirá realizar recomendaciones para el diseño de nuevas obras de la carretera RN5, y realizar estudios más detallados de algunos de los fenómenos analizados como apoyo a la firma encargada del diseño de la carretera y acompañamiento del diseño de las obras.

En la Figura 1 se muestra la metodología seguida para realizar el proceso de análisis de riesgos naturales en la carretera RN5. Como se muestra en esta figura, las primeras fases de este proceso consistieron en la revisión de la información disponible y la realización de un modelo hidrológico-hidráulico complementario para mejorar el conocimiento sobre la vulnerabilidad de la carretera frente a inundaciones. A partir de esta revisión, se realizó una visita técnica y un proceso de Identificación de Modos de Fallo en febrero 2017, que permitieron obtener recomendaciones para el diseño y la gestión de esta infraestructura.

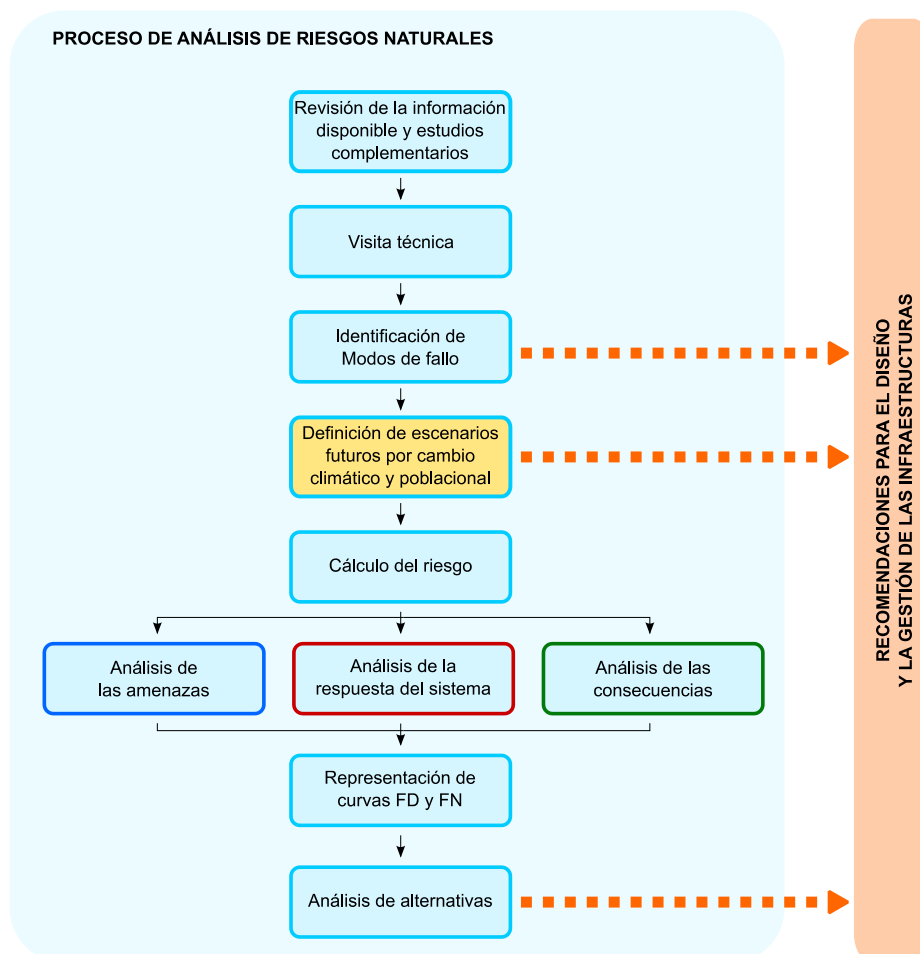


Figura 1: Metodología seguida para el análisis de riesgos naturales en la carretera RN5.

A partir de esta identificación de modos de fallo, se van a definir diferentes escenarios por cambio climático que permitirán estimar el riesgo tanto para el caso base como para diferentes alternativas para la mejora de esta carretera. Estos resultados serán representados en gráficos FD y FN y permitirán el análisis de diferentes alternativas para la carretera así como la obtención de recomendaciones para su diseño y gestión.

Por lo tanto, dentro de este proceso, el presente informe hace referencia al efecto del cambio climático sobre los riesgos naturales que afectan directamente a la infraestructura de estudio y la descripción detallada de cómo se debe considerar el mismo a la hora de plantear un nuevo diseño para esta, por lo que está directamente relacionado con el cuarto punto del proceso (en amarillo en la Figura 1). Como se muestra en esta figura, la definición de estos escenarios permite obtener recomendaciones para el diseño de las infraestructuras y que son detalladas en este informe.

En general, las proyecciones para Haití sobre el efecto del cambio climático prevén una disminución de más del 20% de los volúmenes de precipitación anuales y un aumento de las temperaturas de 3.50 grados para el final de siglo (2080-2099) (IADB, 2015). Sin embargo, al mismo tiempo se prevé un aumento en las intensidades de las precipitaciones durante eventos de tipo ciclónico, principal amenaza natural para la carretera RN5 que une las poblaciones de Gonaïves y Port de Paix.

En un sentido general, la disminución drástica de la pluviometría y el aumento considerable de las temperaturas tendrán como consecuencias en el país una exacerbación de fenómenos climáticos extremos tales como la sequía, diluvios o inundaciones cada vez más frecuentes. Por otro lado, es de esperar también una menor productividad agrícola, acceso más difícil al agua potable y migraciones de población a zonas próximas a puntos de agua, que pueden coincidir con zonas potencialmente inundables. Por este motivo, dentro del proceso de análisis de riesgos naturales y el acompañamiento del nuevo diseño de las obras, es importante considerar el efecto de cambio climático sobre las amenazas naturales que rodean a la infraestructura, especialmente su afección a las amenazas de inundación y temperaturas extremas.

En el presente trabajo se dan recomendaciones para cuantificar, siempre dentro de la incertidumbre presenta en este tipo de predicciones, el efecto del cambio climático en las precipitaciones durante tormentas tropicales (ciclones) para la región donde se ubica la infraestructura, así como el efecto sobre el uso del suelo en la región (por el aumento de temperaturas e incremento de la sequía) y las temperaturas extremas. En este sentido, esta cuantificación en las predicciones del impacto climático sobre la zona de actuación son útiles para el diseño detallado de las obras de rehabilitación y alternativa de trazado previstas.

Este trabajo y la redacción del presente informe han sido realizados por el equipo de iPresas compuesto por Adrián Morales Torres (Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos y Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente por la Universidad Politécnica de Valencia) e Ignacio Aranguren Rojas (Ingeniero Civil y Territorial por la Universidad Politécnica de Madrid).

## 2. CONCEPTOS GENERALES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA ZONA DE ESTUDIO

### 2.1. Modelos Matemáticos Empleados en la Predicción de Cambio Climático

Las predicciones relativas al cambio climático que se presentan en este informe están basadas en el análisis de escenarios de emisión de gases de efecto invernadero mediante dos tipos de modelos matemáticos: GCMs y RCMs.

Los Modelos de Circulación Global (GCMs) son una herramienta matemática para la representación de los procesos físicos y dinámicos presentes en la atmósfera, océanos, criósfera y superficie terrestre. Su consistencia en la representación de las condiciones actuales y pasadas del clima, los convierten en una herramienta muy útil para simular el clima del futuro bajo diferentes escenarios relativos a la concentración de gases de efecto invernadero.

Las proyecciones en los cambios de temperatura y precipitación para la región de Haití se extraen del conjunto de modelos CMIP5 presentados en el IPCC en el año 2013. En dicho informe se analizan los datos provenientes de más de 20 GCMs y se ha proyectado el cambio anual en la región de Haití hasta final de siglo, con especial énfasis en las proyecciones para el horizonte 2020-2039. Un ejemplo de modelo GCM es el modelo de cambio climático Canadian Earth System Model (CanESM2), el cual dispone las simulaciones de lluvia diaria (entre otros muchos campos) para los escenarios Histórico, RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5 a nivel global.

El principal inconveniente de los GCMs es su mala resolución relativa a la escala de la información requerida a nivel de diseño. El tamaño de Haití relativo al espaciado de la malla de los GCMs implica que todo el país se representa solo mediante unos pocos “rectángulos de cálculo”. En este contexto son importantes las técnicas de *downscaling*, que permiten obtener información más específica a regiones dentro del país sin devaluar la información obtenida de los GCMs, mediante la elaboración de Modelos de Circulación Regional (RCMs).

Las técnicas normalmente empleadas son estadísticas y dinámicas (desarrollan un RCM a partir de los datos del GCM en las condiciones de contorno). La escala de la información obtenida es normalmente de <100 km y desde la plataforma PRECIS (Provisión de Climas Regionales para Estudios de Impacto) existen datos disponibles de RCM para Haití con una resolución de 25 km (Taylor, 2013). La Figura 3 muestra la manera en la que Haití está representado en el modelo, obteniéndose a partir del mismo, resultados relacionados con la temperatura (media, mínima y máxima) y cambios en la precipitación. El modelo PRECIS usado en el Caribe está detallado en (IADB, 2015).

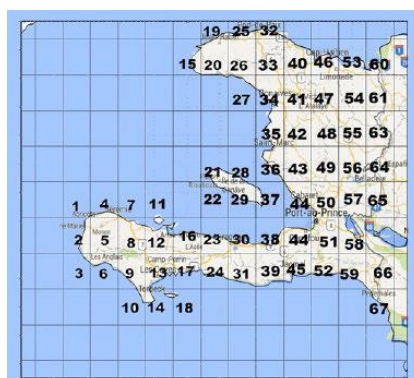


Figura 2: Modelo PRECIS Malla de 25x25 km. Zona de estudio (RN5) en bloque B1 cuadrantes 32-33-34-40-41. (IADB, 2015)

Los modelos GCM y RCM para Haití han basado la simulación en los escenarios propuestos por IE-EE (Informe Especial de Escenario de Emisión) y los RCPs (Representative Concentration Pathways).

Cada escenario IE-EE es una proyección plausible del mundo futuro, donde se exploran tendencias en las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de predicciones relativas al uso de la energía, el crecimiento demográfico, desarrollo económico y otros factores, excluyendo de forma explícita las políticas globales para reducir el efecto del calentamiento global. La Figura 3 muestra esquemáticamente los siete escenarios de emisión presentados en el IE-EE (Informe Especial de Escenarios de Emisiones).

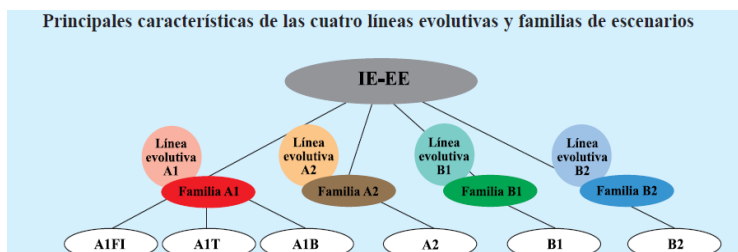


Figura 3: Ilustración esquemática de los escenarios IE-EE. (IPCC, 2000).

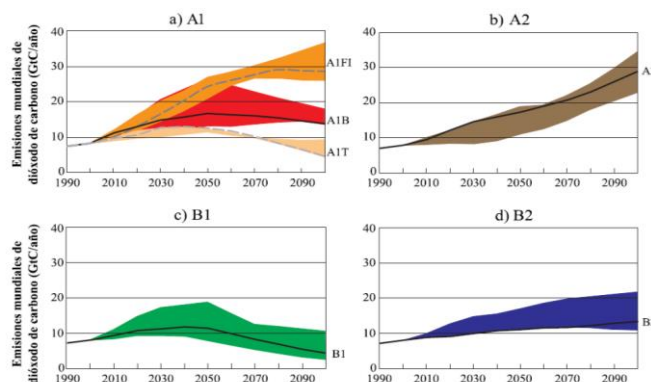


Figura 4: Emisiones anuales de CO<sub>2</sub> provenientes de todas las fuentes de energía entre 1900-2100 en gigatoneladas de carbono (GtC/año). Escenarios de emisión IE-EE (IPCC, 2000).

En la Figura 3 se plantean cuatro líneas evolutivas cualitativas (A1, A2, B1, B2).

- La familia A1 describe un mundo futuro con rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo a mediados de siglo y disminuye posteriormente e introducción de tecnologías nuevas y eficientes. Los tres grupos en que se divide esta familia, describen el desarrollo alternativo de tecnologías: A1FI (utilización intensiva de combustibles fósiles), A1B (equilibrado) y A1T (combustibles no de origen fósil).
- La familia A2 describe un mundo con una población en continuo crecimiento, con la autosuficiencia y conservación de identidad local como característica principal. Cambio tecnológico y crecimiento más comedido.
- La familia B1 presenta un mundo parecido a A1 respecto a cambios demográficos pero con cambios en las estructuras económicas hacia una economía de servicios y utilización de tecnologías más limpias.
- La familia B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. La población aumenta a un ritmo inferior a A2 y un cambio tecnológico menos rápido y diverso que en B1 y A1.

La Figura 4 muestra gráficamente las proyecciones para las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> provenientes de todas las fuentes de energía entre 1900-2100 en gigatoneladas de carbono (GtC/año) para los diferentes escenarios de emisión presentados en el IE-EE.

En el documento (IPCC, 2000) puede encontrarse más información respecto a los escenarios de emisión IE-EE considerados.

Por otro lado, el Informe del IPCC (AR5) se utilizan otros escenarios denominados RCPs que representan un conjunto de escenarios de mitigación y se seleccionan en función de diferentes objetivos en términos de radiación atmosférica para el año 2100: (2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 W/m<sup>2</sup>)

- RCP2.6: Pico de radiación en 3 W/m<sup>2</sup> y descenso hasta 2.6 W/m<sup>2</sup> en 2100.
- RCP4.5: Estabilización de la radiación sin rebasamiento en 4.5 W/m<sup>2</sup> después de 2100.
- RCP6.0: Estabilización de la radiación sin rebasamiento en 6.0 W/m<sup>2</sup> después de 2100.
- RCP8.5: Estabilización de la radiación sin rebasamiento en 8.5 W/m<sup>2</sup> después de 2100.

Estos escenarios no están directamente basados en tendencias socio-económicas como los escenarios IE-EE y, por su rango en la predicción, pueden ser representativos de políticas globales respecto a la emisión de gases de efecto invernadero. La Figura 5 muestra gráficamente la proyección de la evolución en la radiación atmosférica y emisión de CO<sub>2</sub> para los cuatro escenarios RCPs y horizonte temporal 2000-2100. Para más información respecto a los escenarios de emisión RCPs, consultar (Van Vuuren, 2011).

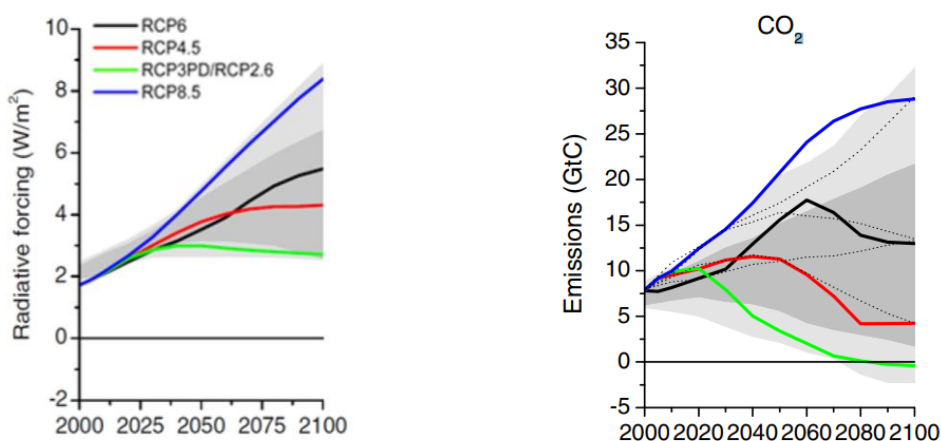


Figura 5: Proyección de la evolución en la radiación atmosférica y emisión de CO<sub>2</sub> para los cuatro escenarios RCPs y horizonte temporal 2000-2100.

En las siguientes secciones del documento, los resultados relativos a los RCMs, de los que se derivan las proyecciones de cambio climático en temperaturas y precipitaciones para Haití en (IADB, 2015), corresponden al escenario IE-EE A1B, y a los cuatro escenarios RCP's (2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 W/m<sup>2</sup>).

A continuación, en el Capítulo 2.2, se presenta un resumen de las principales proyecciones de cambio climático (para temperaturas, precipitaciones anuales y precipitaciones extremas) y los efectos de dichas proyecciones en la zona de estudio, basados en los escenarios de emisión y modelos climáticos explicados en este capítulo. Posteriormente, en el Capítulo 3, se establecen recomendaciones y una metodología para considerar dichas proyecciones en el diseño de las obras de rehabilitación y/o alternativas de diseño de la carretera RN5.

## 2.2. Previsión del Impacto de Cambio Climático en la zona de estudio

Una vez introducidos los modelos matemáticos y los escenarios en los que se basan las predicciones para el impacto del cambio climático en una región determinada, se presenta a continuación un resumen de la previsión del impacto de cambio climático en Haití y la zona de estudio. Las predicciones para Temperaturas y Precipitación anual están basados en lo especificado en (IADB, 2015) que se basan a su vez en análisis realizados por IPCC (2013) y (Moron et al, 2015), respectivamente. Las Proyecciones de cambio para las Precipitaciones durante eventos de huracanes se basan en lo especificado por (Knutson T. J., 2010) y (Knutson et al, 2013) (IPCC, 2012).

Los resultados de las proyecciones de cambio climático para Haití son consistentes (poca variación entre los diferentes escenarios de emisión) pese a la incertidumbre presente en este tipo de análisis (IADB, 2015). Las temperaturas (media, mínima y máxima) anuales muestran una tendencia lineal incremental, pudiendo llegar hasta los 3.5 grados de incremento en la zona de estudio a final de siglo. Por otro lado, el volumen de precipitación anual, a pesar de la importancia que tiene la variabilidad interanual de las precipitaciones en el país, presenta una tendencia a la sequía que puede suponer un 20% en la reducción de la precipitación total en la zona norte del país (donde se localiza la carretera RN5) para final de este siglo.

La combinación, en la zona de estudio, de una subida notable de temperaturas junto con la reducción de la precipitación anual media, en una zona con problemas históricos de deforestación, reducción de casi el 98% de la cobertura forestal del país a lo largo del siglo XX (BRGM, 2016), tendrá consecuencias que deben ser tomadas en consideración a la hora de diseñar o rehabilitar una infraestructura civil.

La consecuencia más evidente es la sequía y la desertización de las cuencas vertientes a la carretera RN5, que impacta directamente en el empobrecimiento de los usos del suelo de la zona de estudio. Este impacto es relevante y está relacionado con los inputs al modelo hidrológico. Un suelo empobrecido por la sequía tiene menor capacidad de infiltración e intercepción de lluvia, empobreciendo la condición hidráulica e incrementando el volumen de escorrentía para un mismo evento de precipitación de la cuenca (incremento del caudal pico).

Por otro lado, dado que la amenaza natural más importante sobre la infraestructura son las crecidas de los ríos tras eventos de precipitación intensa por episodios ciclónicos, es importante considerar, no sólo el impacto del cambio climático en el régimen de precipitaciones anuales sino también en eventos de precipitación extremos, como los huracanes que azotan al país cada pocos años. Los resultados de los estudios presentados por (Knutson T. J., 2010) y (Knutson et al, 2013) sugieren un incremento de la intensidad en las precipitaciones tras huracán de entre un 3 y 37% dependiendo de la distancia al centro del mismo.

Este incremento de la intensidad en la precipitación combinado con un uso de suelo empobrecido tiene como consecuencia un aumento notable de los caudales de avenida para los diferentes periodos de retorno considerados en un análisis hidrológico, y que debe estar presente a la hora de elaborar un modelo hidrológico que sirva para diseñar de forma óptima y segura un nuevo diseño de infraestructura en la zona de interés.

Una vez realizada la revisión cualitativa del impacto climático en la zona de estudio, se proponen recomendaciones concretas para tener en cuenta el impacto del calentamiento global de forma cuantitativa en un modelo hidrológico y que sirva a su vez de acompañamiento para el nuevo diseño de las obras de rehabilitación o trazado alternativo de la carretera RN5.



### 3. RECOMENDACIONES PARA INCLUIR EL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL DISEÑO

#### 3.1. Resumen de las Recomendaciones

La consideración de los efectos del cambio climático afecta a diferentes aspectos del diseño de la carretera RN5. Estos efectos se encuentran resumidos en la Tabla 1, y principalmente comprenden el cambio de temperaturas, la variación de precipitaciones extremas y las variaciones en el uso del suelo debido a posibles procesos de deforestación y desertificación.

Cambio climático previsto	Efecto sobre diseño carretera RN5	Metodología propuesta
<b>Mayores precipitaciones extremas durante ciclones y tormentas tropicales</b>	Mayores intensidades de precipitación y caudales pico para diseño de obras de pasos y obras de drenaje	Modificación de Tormentas de diseño a partir de predicciones elaboradas con datos simulados por modelos climáticos (CanESM2) y posteriormente ajustados a la zona de estudio.
<b>Mayores temperaturas</b>	Mayores temperaturas de diseño para evitar futuros problemas de durabilidad en el pavimento	Aumento de temperaturas de diseño a partir de predicciones existentes sobre efecto del cambio climático
<b>Procesos de desertificación por menores precipitaciones promedio y mayores temperaturas</b>	Mayores caudales pico para obras de paso y obras de drenaje debido a la mayor escorrentía en este tipo de suelo	Corrección del número de curva (CN) empleado para la estimación de la escorrentía teniendo en cuenta condiciones del suelo más empobrecidas

Tabla 1: Resumen de recomendaciones para incluir los efectos del cambio climático en el diseño de la carretera.

A continuación, se detallan las recomendaciones para incluir el Cambio Climático en el diseño de la carretera según el ámbito afectado (Tormentas de diseño, Temperaturas de Diseño y Usos del suelo). Primero se tratan los antecedentes y la información existente respecto al efecto del cambio climático sobre el ámbito en cuestión. Finalmente se propone una metodología para considerar dichos efectos en el diseño.

#### 3.2. Recomendaciones para incluir el efecto del CC en: Tormentas de diseño

##### Antecedentes

El IPCC en su Special Report on Extremes (2012), brinda algunos enunciados respecto a las proyecciones para futuros huracanes considerando el efecto del cambio climático que son de especial relevancia para la zona del Caribe, donde se sitúa Haití. Basado en el nivel de consistencia entre modelos y razonamiento físico se dice en el informe que es probable que la intensidad de lluvia durante los futuros ciclones tropicales vaya a aumentar.

También, en (Knutson T. R., 2013), las proyecciones de cambio climático en el Atlántico para el siglo XXI se tratan con técnicas de downscaling para explorar la robustez en los cambios de la actividad en futuros huracanes. Para final de siglo, tal y como se muestra en la Figura 6 (Knutson T. R., 2013) sitúa el incremento de intensidad de lluvia en el núcleo del huracán entre un +20%-+30% dependiendo del modelo climático y escenario de emisión considerado.

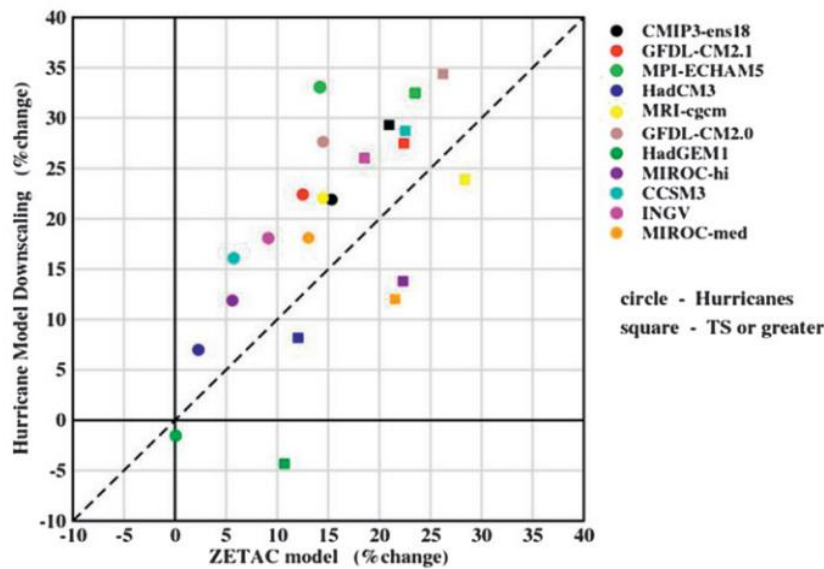


Figura 6: Gráfico (ZETAC vs Hurricane Model) que representa el porcentaje de incremento de intensidad de lluvia en huracanes del Atlántico por el calentamiento global para 100km desde el núcleo respecto a la situación actual para diferentes escenarios de emisión.

(Knutson et al, 2013)

En (Knutson T. J., 2010) se indica que los modelos climáticos son unánimes a la hora de pronosticar un incremento de vapor de agua en la atmósfera por el calentamiento global. Este hecho sumado al aumento de velocidad de los vientos realza la convergencia de humedad atmosférica, lo que a su vez está relacionado con el incremento de las intensidades de lluvia durante una tormenta tropical.

Los modelos climáticos que han examinado la intensidad de lluvia durante los ciclones son consistentes y robustos (poca sensibilidad a la variación de escenarios y condiciones de contorno) a la hora de proyectar un incremento en la misma en las zonas cercanas próximas al huracán de entre el 3% y 37% en función de la distancia al centro de este. Las proyecciones normalmente realizadas en base a los resultados de diferentes modelos climáticos (Figura 7) se encuentran en torno a un incremento porcentual del 20% dentro de un radio de 100 km (Knutson T. J., 2010).

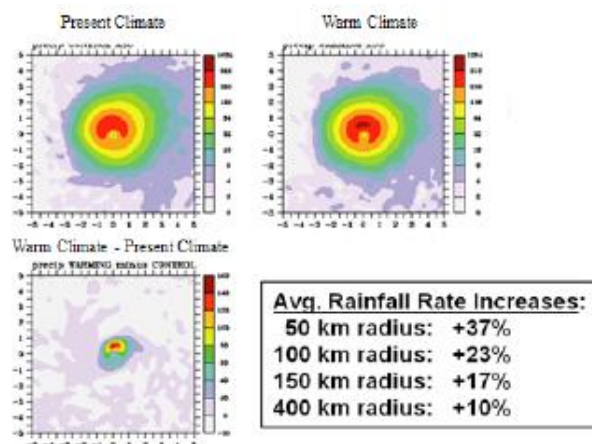


Figura 7: Intensidad de lluvia (mm/día) asociado a tormentas tropicales para clima presente, calentamiento global y diferencia entre escenarios. (Knutson T. J., 2010)

Observando las trayectorias de los ciclones que han pasado cerca de la zona de estudio en los últimos años (Figura 8), parece adecuado considerar que la zona de estudio (Carretera RN5 y cuencas vertientes,

parte norte del país haitiano) se encuentre en un radio de 100 km desde el centro de un huracán en su trayectoria cercana al país.

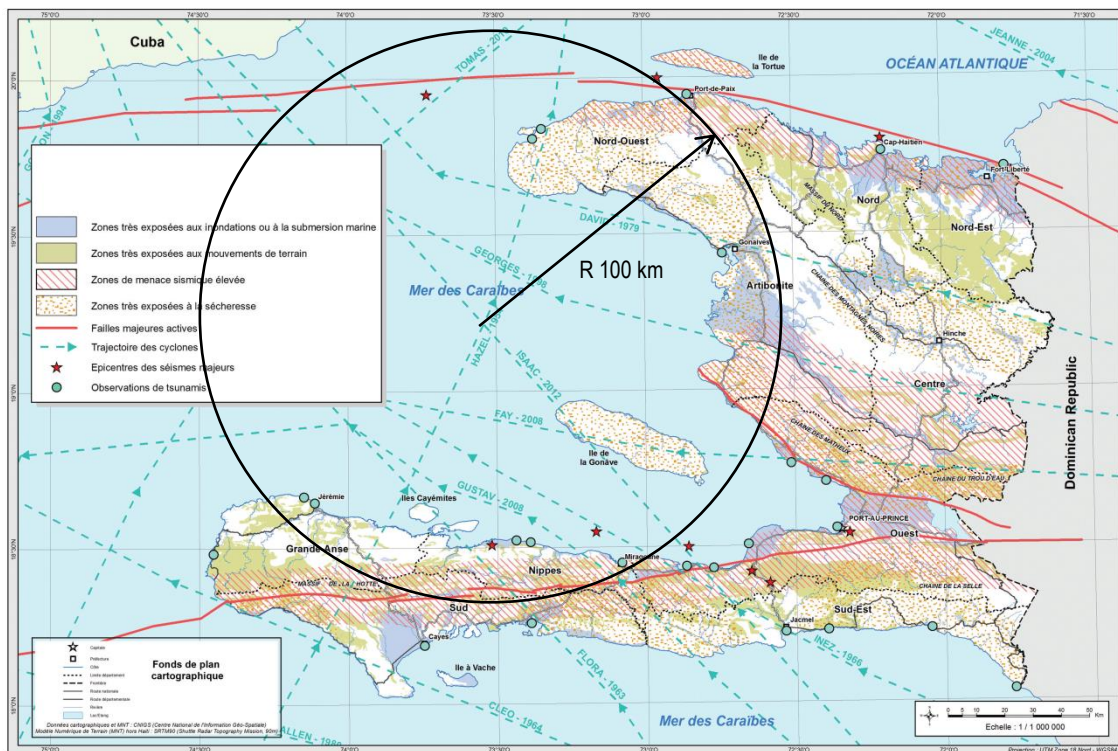


Figura 8: Trayectorias de los ciclones en Haití (BRGM, 2016). Radio de 100 km que engloba varias trayectorias del centro de huracanes en los últimos años y que incluye a la zona de estudio entre Gonaïves y Port de Paix.

Con todas estas premisas el incremento porcentual esperado para la intensidad de la precipitación durante un evento ciclónico en la zona de estudio es del 20%.

También en este contexto, el IPCC presentó en 2012 (IPCC, 2012) una proyección de futuros cambios en la máxima precipitación asociada a una tormenta de duración 24 horas y periodo de retorno de 20 años para la región de Centroamérica. Las barras resultan de proyecciones medias para dos horizontes temporales (2046-2065 y 2081-2100) y para tres escenarios de emisión diferentes, en orden de menor a mayor emisión (B1 azul, A1B verde, A2 rojo). Las proyecciones del IPCC sugieren que la precipitación máxima diaria asociada a un periodo de retorno de 20 años podría darse con una frecuencia de entre 5 a 15 años debido al calentamiento global. Los resultados se muestran en la Figura 9.

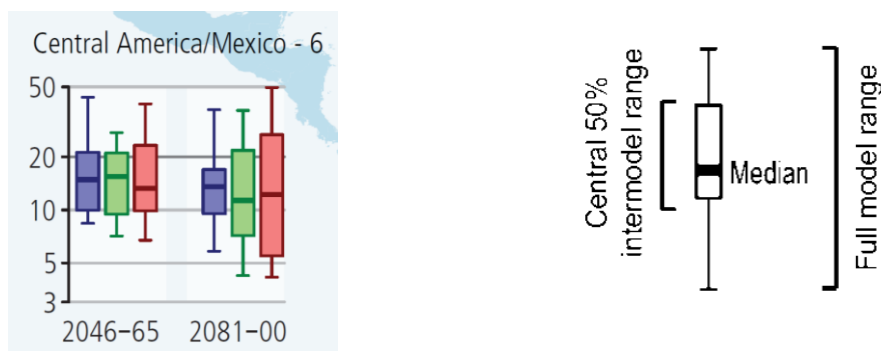


Figura 9: Proyecciones para el cambio en la frecuencia de una precipitación actual asociada a una tormenta de 24h y 20 años de periodo de retorno. Fuente: (IPCC, 2012)

En el horizonte 2081-2100, las predicciones sugieren que la precipitación máxima diaria asociada a un periodo de retorno de 20 años podría darse con una frecuencia de entre 7-20 años con un intervalo de confianza del 50%.

Como conclusión y siempre según los estudios consultados relativos al efecto del cambio climático en la intensidad de la precipitación en eventos extremos sobre la zona de actuación (Haití, Atlántico Norte) se resumen las dos predicciones para el horizonte temporal 2081-2100:

- P1: Incremento de la intensidad de las precipitaciones para eventos de tipo extremo (ciclones y tormenta tropical) del orden del 20% dentro de un radio de aproximadamente 100 km desde el centro del huracán. (Knutson T. J., 2010) y (Knutson et al, 2013).
- P2: Incremento de la frecuencia de la intensidad de precipitación asociada a un periodo de retorno de 20 años, que en el futuro coincidirá con la 10 años de periodo de retorno según lo especificado por (IPCC, 2012).

### Metodología propuesta

Las proyecciones de cambio climático anteriores para Precipitaciones Extremas conforman enunciados generales (Knutson T. J., 2010) (Knutson et al, 2013) (IPCC, 2012) , válidos para la zona del Caribe donde se sitúa el país Haitiano. Sin embargo, es posible construir proyecciones más específicas para la zona de interés utilizando datos de modelos globales (GCM) y técnicas de *downscaling* para ajustarlas a la zona de proyecto.

La metodología empleada para obtener proyecciones representativas para la zona de interés se resume a continuación:

1. Descargar y analizar los datos simulados del modelo GCM de cambio climático Canadian Earth System Model\* (CanESM2), que dispone las simulaciones de lluvia diaria (mm en 24h) para los escenarios Histórico, RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5 a nivel global, y ajustarlos a los datos registrados en la zona de estudio (RCM) para obtener los incrementos esperados respecto a la lluvia máxima diaria para diferentes periodos de retorno y estaciones meteorológicas.
2. Los resultados del análisis anterior relativos a los escenarios tendenciales (RCP2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5) se comparan con varios enunciados realizados por expertos (IPCC, 2012) (Knutson T. J., 2010) (Knutson et al, 2013) respecto a proyecciones para futuros huracanes considerando el efecto del cambio climático y que son de especial relevancia para Haití.
3. Se selecciona el escenario tendencial (RCP2.6, RCP4.5 o RCP8.5) que mejor se ajuste a las proyecciones estimadas por los expertos para la zona de interés para actualizar las tormentas de diseño.

El análisis y ajuste de los datos simulados en escenario tendencial con los datos históricos (Paso 1) se muestra a continuación:

Primero, es necesario obtener datos máximos históricos anuales de lluvia diaria en la zona de interés. En este proyecto se ha tenido acceso a datos pluviométricos diarios de registros históricos para varias estaciones en puntos cercanos a la zona de proyecto. La Tabla 2 muestra el periodo de registro histórico y las coordenadas geográficas para cada una de las estaciones a las que se ha tenido acceso.

\*Datos Modelo Climático CanESM2 (<http://climate-modelling.canada.ca/climatemodeldata/cgcm4/CanESM2/index.shtml>)

Estación	Coordenadas	Número de años	Periodo de registro histórico	Máximo diario absoluto (mm)
<b>Gonaives</b>	19°27'1.42"N 72°41'0.83"O	51	1949-1951, 1953-1956, 1960-2001	99.5
<b>Gros Morne</b>	19°40'21.38"N 72°41'6.45"O	33	1923, 1925, 1931-1932, 1939-1968, 1978-1979	138
<b>Bassin Bleau</b>	19°47'0.36"N 72°47'58.61"O	27	1939-1952, 1967-1969, 1977-1986	321
<b>Port de Paix</b>	19°56'3.44"N 72°49'50.04"O	39	1948-1986	252
<b>Petite Riviere</b>	19°51'0.00"N 72°41'0.00"O	76	1923, 1925, 1931-32, 1939-2010	412

Tabla 2: Resumen de datos diarios de lluvia para cinco estaciones cercanas a la zona de estudio

Después, se descargan los datos simulados del modelo climático (CanESM2) para el periodo histórico correspondiente a los datos de lluvia de los registros disponibles y para las coordenadas más cercanas a la zona de estudio. En este caso, se han descargado los datos de lluvia diaria (en mm) para el periodo 1950-2005 (No existen simulaciones para años anteriores a 1950).

Se busca analizar el efecto del cambio climático en eventos de precipitación extrema, por tanto, se extraen los máximos anuales de lluvia diaria de los datos descargados. Los valores de lluvia máxima diaria se muestran en la Figura 10

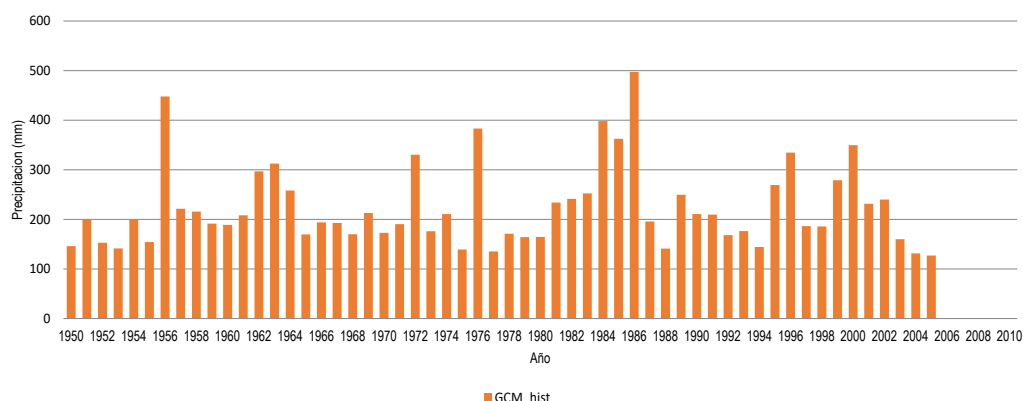


Figura 10: Datos máximos anuales de lluvia diaria (mm en 24h) simulados del modelo climático CanESM2 para el periodo histórico 1950-2005.

Los valores de los datos máximos simulados descargados no coinciden con los máximos observados en el mismo periodo para las diferentes estaciones meteorológicas de la zona de estudio. Por ello, se procede a realizar un ajuste mediante regresión, comparando los datos máximos anuales de lluvia diaria observados en las estaciones con los datos máximos anuales de lluvia diaria simulados en el modelo, para el mismo periodo histórico. El proceso de ajuste consiste en ordenar ambas series de datos máximos (para el mismo periodo histórico) de menor a mayor y obtener la expresión matemática que las relaciona. Se ha observado que esta relación tiene forma de polinomio de segundo grado.

Como ejemplo se muestra la regresión estimada para la estación de Port de Paix. La Tabla 3 muestra la bondad del ajuste para cada una de las estaciones, así como los coeficientes del polinomio de segundo grado resultado de la regresión.



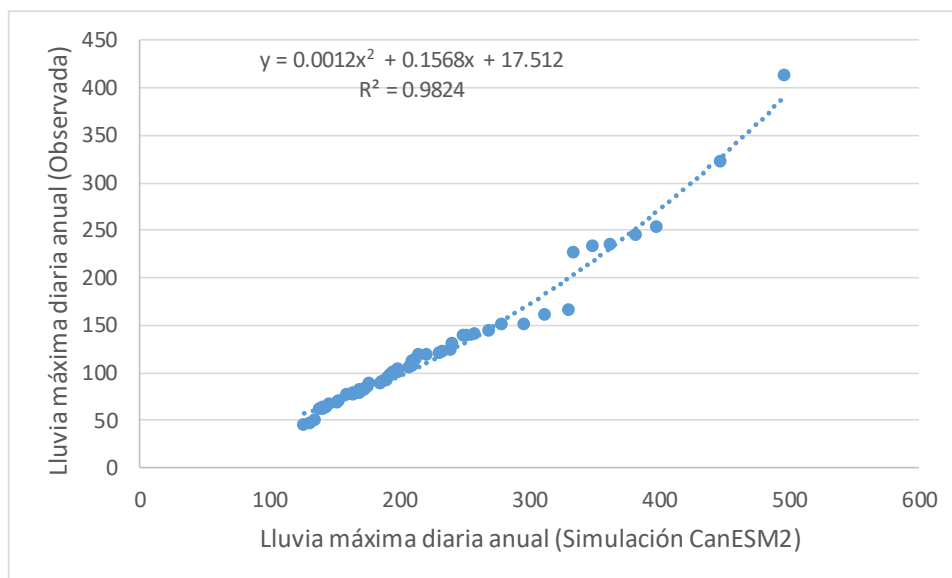


Figura 11: Ajuste (Simulación CanESM2 vs Datos Observados) para la estación de Port de Paix

$y = ax^2 + bx + c$				
	a	b	c	R²
<b>Petite Riviere</b>	0.0012	0.1568	17.512	0.9824
<b>Port de Paix</b>	0.0004	0.3541	-10.468	0.9379
<b>Bassin Bleau</b>	0.0002	0.1139	22.863	0.9146
<b>Gros Morne</b>	-0.0017	1.4075	-134.81	0.9734
<b>Gonaives</b>	-0.0004	0.4179	-19.428	0.9846

Tabla 3: Ajuste mediante regresión polinómica de grado 2. Datos observados (y), Datos simulados (x). Bondad de ajuste

Una vez obtenido el ajuste mediante regresión para calibrar la simulación a los datos observados en la zona de estudio, se procede a descargar los datos simulados por el modelo CanESM2 para los escenarios tendenciales de cambio climático (definidos por los escenarios RCP's ya explicados).

Los datos simulados (descargados) para los escenarios tendenciales necesitan ajustarse a la zona de estudio correspondiente. Para ello, se utiliza la regresión polinómica obtenida en el paso anterior en función de la estación meteorológica correspondiente.

Con los datos simulados ajustados para cada escenario tendencial (RCP2.5, RCP4.6, RCP8.6) y cada estación meteorológica (En este caso: *Gonaives*, *Gros Morne*, *Bassin Bleau* y *Port de Paix*), se procede a realizar de nuevo un análisis de distribución de frecuencias para conocer cuál es la lluvia máxima diaria asociada a diferentes periodos de retorno para cada una de las estaciones consideradas en el estudio en escenario tendencial.

Los datos se han ajustado empleando la distribución de Gumbel. Los parámetros de la distribución que mejor se ajustan a cada estación en cada escenario RCP tendencial, así como las intensidades de lluvia diaria máxima para diferentes periodos de retorno se muestran en la Tabla 4.

Estación	Escenario	Parámetros Gumbel		Intensidad lluvia 24h (mm/h)					
		$\mu$ (Location)	$\sigma$ (Scale)	T2	T5	T10	T25	T50	T100
Petite Riviere	Histórico	-70.84	60.02	3.84	6.58	8.38	<u>10.67</u>	12.37	14.05
	RCP2.6	-73.82	23.08	3.43	4.52	5.24	6.15	6.83	7.50
	RCP4.5	-113.66	51.07	5.52	7.93	9.52	11.54	13.04	14.53
	RCP8.5	-117.68	57.38	5.78	8.49	<u>10.28</u>	12.55	14.23	15.90
Port de Paix	Histórico	-61.28	43.79	3.22	5.29	6.66	<u>8.39</u>	9.67	10.95
	RCP2.6	-55.90	18.13	2.61	3.46	4.03	4.75	5.28	5.80
	RCP4.5	-87.06	36.65	4.19	5.92	7.06	8.51	9.59	10.65
	RCP8.5	-89.71	40.91	4.36	6.29	<u>7.57</u>	9.19	10.39	11.58
Bassin Bleu	Histórico	-54.99	24.87	2.67	3.85	4.62	<u>5.61</u>	6.33	7.06
	RCP2.6	-46.10	6.88	2.03	2.35	2.57	2.84	3.04	3.24
	RCP4.5	-57.93	14.21	2.70	4.24	5.30	6.63	7.63	8.61
	RCP8.5	-58.99	15.89	2.71	4.39	<u>5.50</u>	6.90	7.94	8.98
Gros Morne	Histórico	-47.49	29.84	2.43	3.84	4.78	<u>5.95</u>	6.83	7.70
	RCP2.6	-42.14	24.23	2.13	3.27	4.03	4.98	5.69	6.40
	RCP4.5	-79.35	38.43	3.89	5.71	6.91	8.43	9.55	10.67
	RCP8.5	-80.52	41.86	3.99	<u>5.97</u>	7.28	8.93	10.16	11.38
Gonaives	Histórico	-45.22	14.65	2.11	2.80	3.26	<u>3.84</u>	4.27	4.69
	RCP2.6	-35.89	8.69	1.63	2.04	2.31	2.65	2.91	3.16
	RCP4.5	-50.26	14.16	2.31	2.98	3.42	3.98	4.40	4.81
	RCP8.5	-50.92	15.30	2.36	3.08	<u>3.56</u>	4.16	4.61	5.05

Tabla 4: Resumen del análisis de distribución de frecuencias. Parámetros de la distribución de Gumbel e Intensidad de lluvia diaria máxima (mm/h) para varios periodos de retorno y estaciones meteorológicas.

Con el objetivo de ayudar a la interpretación de los resultados obtenidos para la lluvia máxima diaria esperada en los escenarios tendenciales de cambio climático, la Tabla 5 muestra los resultados de la tabla anterior en términos porcentuales respecto al escenario base (histórico).

Estación	Escenario	Periodo de retorno (años)						Media
		T2	T5	T10	T25	T50	T100	
Petite Riviere	RCP2.6	-11%	-31%	-37%	-42%	-45%	-47%	<b>-36%</b>
	RCP4.5	44%	21%	14%	8%	5%	3%	<b>16%</b>
	RCP8.5	50%	29%	23%	18%	15%	13%	<b>25%</b>
Port de Paix	RCP2.6	-19%	-35%	-39%	-43%	-45%	-47%	<b>-38%</b>
	RCP4.5	30%	12%	6%	1%	-1%	-3%	<b>8%</b>
	RCP8.5	35%	19%	14%	10%	7%	6%	<b>15%</b>
Bassin Bleu	RCP2.6	-24%	-39%	-44%	-49%	-52%	-54%	<b>-44%</b>
	RCP4.5	1%	10%	15%	18%	20%	22%	<b>14%</b>
	RCP8.5	2%	14%	19%	23%	25%	27%	<b>18%</b>
Gros Morne	RCP2.6	-13%	-15%	-16%	-16%	-17%	-17%	<b>-16%</b>
	RCP4.5	60%	49%	45%	42%	40%	39%	<b>46%</b>
	RCP8.5	64%	55%	52%	50%	49%	48%	<b>53%</b>
Gonaives	RCP2.6	-23%	-27%	-29%	-31%	-32%	-33%	<b>-29%</b>
	RCP4.5	10%	6%	5%	4%	3%	2%	<b>5%</b>
	RCP8.5	12%	10%	9%	8%	8%	8%	<b>9%</b>

Tabla 5: Incremento porcentual respecto al escenario histórico de los valores de lluvia máxima diaria esperados para tres escenarios tendenciales de cambio climático, 6 periodos de retorno y cuatro estaciones meteorológicas

En base a los resultados obtenidos en la Tabla 4 y la Tabla 5 se busca ahora seleccionar un escenario tendencial como representativo para la zona de estudio (Paso 2), que se utilizará para realizar las simulaciones hidrológicas e hidráulicas previas al análisis cuantitativo de riesgo.

Considerando las dos predicciones (P1 y P2) para el horizonte temporal 2081-2100 según los estudios consultados, el escenario tendencial RCP8.5 (simulado con el modelo climático CanESM2 y ajustado a los datos históricos específicos de la zona de interés) es el que mejor se adecua a las mismas. Se muestran las dos predicciones y las similitudes con lo proyectado por el escenario RCP8.5:

- P1: Incremento de la intensidad de las precipitaciones para eventos de tipo extremo (ciclones y tormenta tropical) del orden del 20% dentro de un radio de aproximadamente 100 km desde el centro del huracán. (Knutson T. J., 2010) y (Knutson et al, 2013).

El escenario tendencial RCP8.5, que supone un incremento medio de alrededor del 25% de la lluvia máxima diaria con respecto al escenario histórico (que varía en función de la estación meteorológica), está acorde a las proyecciones de cambio climático que estiman los expertos para la zona del Atlántico.

- P2: Incremento de la frecuencia de la intensidad de precipitación asociada a un periodo de retorno de 20 años, que en el futuro coincidirá con la 10 años de periodo de retorno según lo especificado por (IPCC, 2012).

Las proyecciones del escenario tendencial RCP8.5 en la zona de interés, tal y como se muestra en los valores subrayados en la Tabla 4 están acorde a las proyecciones de cambio climático que estima (IPCC, 2012) para la zona del Atlántico.



Por tanto, para la elaboración de tormentas de diseño en escenario tendencial (RCP8.5), se propone aumentar proporcionalmente el valor máximo de precipitación en 24 h esperada en escenario histórico en función de la estación meteorológica y periodo de retorno considerado según la Tabla 6. Estos porcentajes se han obtenido aplicando la metodología propuesta en este capítulo.

Estación	Escenario	Periodo de retorno (años)						Media
		T2	T5	T10	T25	T50	T100	
Petite Riviere	RCP8.5	50%	29%	23%	18%	15%	13%	<b>25%</b>
Port de Paix	RCP8.5	35%	19%	14%	10%	7%	6%	<b>15%</b>
Bassin Bleau	RCP8.5	2%	14%	19%	23%	25%	27%	<b>18%</b>
Gros Morne	RCP8.5	64%	55%	52%	50%	49%	48%	<b>53%</b>
Gonaives	RCP8.5	12%	10%	9%	8%	8%	8%	<b>9%</b>

Tabla 6: Recomendación propuesta para incluir el efecto del CC en la elaboración de tormentas de diseño. Incremento porcentual respecto a escenario actual de la máxima precipitación (mm) en 24h esperada para varios periodos de retorno y estaciones meteorológicas.

### 3.3.Recomendaciones para incluir el efecto del CC en: Temperaturas de Diseño

#### Antecedentes

El IPCC (2013), estima un incremento de  $0.85\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.20\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una tendencia lineal durante el intervalo temporal 1880-2012. También el IPCC (2007) estima que la temperatura anual media de las islas del Caribe ha aumentado  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante el periodo 1990-1995. Las Figura 12 muestra gráficamente la tendencia de calentamiento regional para el país, donde las temperaturas medias incrementan a un ritmo de  $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}$  por década en el último siglo. ( $0.10\text{ }^{\circ}\text{C}$ / década para las temperaturas máximas y  $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ / década para las mínimas).

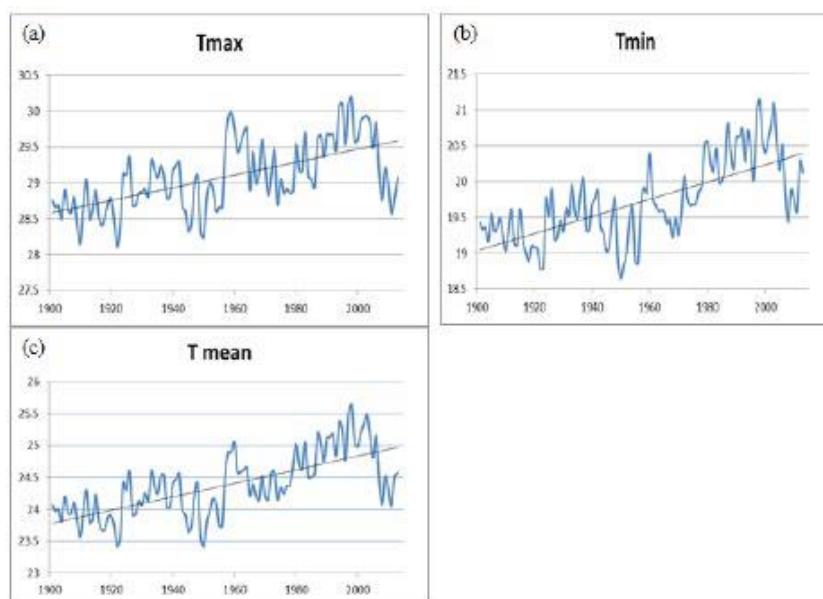


Figura 12: Registro anual de las temperaturas medias, máximas y mínimas en Haití (1901-2013) (IADB, 2015).

Estos datos se han empleado en GCMs y RCMs para establecer proyecciones de cara al futuro próximo. El resumen de estas proyecciones se muestra a continuación:

- De los GCMs, se concluye que las temperaturas medias anuales van a incrementar para final de siglo para cualquiera de los escenarios de emisión considerados (0.66-0.78 °C para la década de los 2020s, 0.80-1.11°C para 2030s, 0.92-1.86°C para 2050s y 0.87-3.32°C para 2081-2100).
- Los RCMs sugieren un incremento todavía mayor de las temperaturas para las regiones interiores del país que las estimadas por los GCMs, ya que estos últimos se obtienen a través de un cálculo medio de todo el territorio. Para el bloque 41 (B1), próximo a la zona de actuación (Tabla 7), las proyecciones medias son 1.19-1.42 °C para 2020, 1.49-1.79°C para 2030, 1.99-2.49 °C 2050 y 2.82-3.62 °C para final de siglo.
- Para todos los modelos estudiados en (IADB, 2015) los incrementos esperados para las temperaturas mínimas, máxima y media con respecto a la situación de control son similares como se muestra en la Tabla 7.

Block	2020s			2030s			2050s			End of Century 2081 - 2100		
	Tmin	Tmean	Tmax	Tmin	Tmean	Tmax	Tmin	Tmean	Tmax	Tmin	Tmean	Tmax
<b>A</b>	1.51	1.38	1.39	1.91	1.77	1.78	2.56	2.42	2.53	3.77	3.63	3.86
	1.54	1.40	1.59	1.80	1.96	2.02	2.65	2.53	2.69	3.84	4.02	4.02
<b>B1</b>	1.21	1.19	1.16	1.54	1.49	1.45	2.06	1.99	2.06	2.96	2.82	2.68
	1.57	1.42	1.73	1.97	1.79	1.79	2.67	2.49	2.67	3.91	3.62	3.62
<b>B2</b>	1.56	1.37	1.42	1.96	1.74	1.77	2.51	2.41	2.46	3.63	3.57	2.68
	1.68	1.43	1.76	2.07	1.81	2.13	2.70	2.89	2.56	4.01	4.11	3.83
<b>B3</b>	1.40	1.36	1.16	1.74	1.70	1.53	2.32	2.35	2.55	3.36	3.47	3.81
	1.55	1.42	1.45	1.95	1.80	1.87	2.62	2.52	2.70	3.80	3.70	4.05
<b>C</b>	1.23	1.17	1.08	1.55	1.47	1.38	2.28	1.99	2.16	3.32	2.91	3.12
	1.54	1.38	1.43	1.92	1.72	1.76	2.67	2.42	2.76	3.71	3.42	3.72

Tabla 7: Resumen de las proyecciones para el cambio de temperatura (mínimas, media y máximas) en Haití. Modelo PRECIS (Provisión de Climas Regionales para Estudios de Impacto). RCM para Haití con una resolución de 25 km Rojo: Zona de estudio en bloque B1 y horizonte temporal final de siglo. (IADB, 2015)

Con todo lo anterior, es evidente que el cambio climático tendrá un impacto considerable en el incremento de temperaturas (mínimas, medias y máximas) en todo el país, aumentando el riesgo de aparición de fenómenos climáticos extremos como la sequía y la desertización; impacto en los usos del suelo en la zona de actuación; y posible impacto en el pavimento asfaltado de la futura carretera. Este aumento de temperaturas deberá ser tratado en posteriores etapas del proyecto como una variable a considerar en el diseño del pavimento de la infraestructura. Adicionalmente, se debe considerar la influencia de dicho incremento en el cambio de usos del suelo próximos a la zona de estudio.

### Metodología propuesta

El diseño y construcción de pavimentos en carretera están fuertemente influenciados por los efectos climatológicos tales como la temperatura o la humedad. Los daños típicos asociados a la temperatura están relacionados con los daños en la capa más superficial (rodamiento). Se distinguen normalmente dos tipos de pavimentos (rígidos y flexibles), cada uno con sus problemas específicos.

En pavimentos flexibles aparecen problemas del tipo: agrietamiento en las carpetas de rodamiento: roderas o ahuellamiento; y baches abiertos. En pavimentos rígidos aparecen problemas como: agrietamiento: asentamiento; y desprendimiento de bloques de concreto.

Para considerar el factor temperatura en el diseño del pavimento se pueden utilizar metodología SUPERPAVE (SHRP, 1994). Esta metodología establece ensayos orientados a medir las propiedades reológicas y relacionarlas con el grado desempeño (PG) que tienen frente a los tres tipos de fallo más clásicos que ocurren en los pavimentos durante su vida útil (ahuellamiento, agrietamiento por fatiga, y agrietamiento térmico). Además, SUPERPAVE define para los cementos asfálticos tradicionales una nueva clasificación por Grado de Desempeño, también denominada Clasificación PG (Performing Grading).

Con las especificaciones SUPERPAVE, los ensayos a los ligantes se realizan a distintas temperaturas, lo que permite identificar la temperatura crítica en la que cada ensaye alcanza su valor límite especificado. De esta manera se puede establecer un rango de temperaturas dentro del cual un asfalto puede desempeñarse adecuadamente.

Es en la selección de este rango donde se recomienda considerar el impacto del cambio climático en el incremento de las temperaturas para la zona de estudio del proyecto. Dadas las proyecciones presentadas por los modelos climáticos se recomienda considerar un aumento de las temperaturas máximas a las que estará sometido el pavimento de 3.5 °C para final de siglo.

### 3.4. Recomendaciones para incluir el efecto del CC en: Usos del suelo.

#### Antecedentes

El ciclo anual de lluvia en el noroeste del Caribe surge como resultado de cambios longitudinales y latitudinales del Anticiclón de las Azores, la intensidad de los vientos en el eje ecuatorial y del ciclo anual de las temperaturas de mar. Este conjunto de factores da como resultado una estación lluviosa entre abril y noviembre con picos en mayo-junio y septiembre-noviembre (IADB, 2015).

Al contrario de lo que ocurre con el registro histórico de temperaturas en el país, no existe una tendencia lineal en los datos para aproximar el registro de precipitaciones anuales en el país. El registro está marcado por la variabilidad interanual (Fenómeno el Niño/La Niña principalmente) y variación entre décadas.

No obstante, tanto los GCMs como los RCMs han derivado proyecciones sobre la influencia del clima en el régimen de precipitaciones anuales para Haití, cuyas conclusiones son las siguientes (IADB, 2015).

- De los GCMs, el escenario que se presenta es una tendencia a años más secos a partir de 2020 con una disminución en la precipitación del 3-4%. Se estima que el año 2030 será hasta un 6% más seco y en 2050 hasta un 17%. A final de siglo, en el escenario más severo (RCP8.5) se estima una disminución en la precipitación de hasta el 20%.
- El cambio en la lluvia estival será el primer causante de la tendencia seca mientras que la lluvia durante la estación seca prevé pequeños incrementos o ningún cambio.
- Las proyecciones de los RCMs reflejan también una tendencia de disminución de precipitaciones desde el 2020 hasta mitad de siglo. Para el bloque 41, próximo a la zona de actuación (Figura 2), las proyecciones son -4.36% para 2020, -4.91 % para 2030, -8.45% 2050 y -21.2% para 2081-2100.

Con todo lo anterior, es evidente que el cambio climático tendrá un impacto considerable en el decrecimiento de precipitaciones anuales en todo el país, que junto al aumento de temperatura (Ver 3.2), puede aumentar de forma potencial el riesgo de aparición de fenómenos climáticos extremos como la sequía y la desertización, con el consecuente impacto en los usos del suelo en la zona de actuación.

Al contrario de lo que ocurre con la temperatura y la precipitación, no se conocen análisis detallados sobre el impacto del calentamiento global en el cambio en los usos del suelo. Sin embargo, parece lógico asumir

que la escasez de agua y aumento de temperaturas en la zona de estudio incrementará el riesgo de sequía y desertización, empobreciendo los suelos, la capacidad de retención e impactando en la relación precipitación-escorrentía para un evento hidrológico que puede desencadenar en un aumento del riesgo de inundación durante eventos de precipitación extrema.

## Metodología

El método del número de curva propuesto por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, es usado globalmente (NRCS, 2004) para determinar la relación entre precipitación y escorrentía dado un evento de lluvia y tiene en cuenta la influencia de los usos del suelo en la misma. El número de curva es un valor adimensional entre 0 y 100 que depende del tipo de suelo, tipo de cobertura y condición hidráulica (National Resources Conservation Service, 1986). De modo que cuanto mayor sea su valor, menor es la capacidad de infiltración y mayor es el volumen de precipitación que se transforma directamente en escorrentía.

Para la determinación de los usos del suelo se ha utilizado un mapa global de 500 m de resolución dado por el LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center) controlado por la NASA y USGS. Específicamente, se ha tenido acceso al conjunto de mapas de usos del suelo MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), que contiene 5 tipos de capas según diferentes sistemas de clasificación para escoger, el propuesto por el International Geosphere Biosphere Programme (IGBP), el propuesto por Universidad de Maryland y los propuestos por LAI/fPAR, NPP y PFT.

En el caso de este proyecto se ha optado por el sistema de clasificación de usos del suelo propuesto por IGBP, por cubrir un mayor espectro de usos (hasta 16 tipos diferentes). Los diferentes tipos de usos de suelo contemplados en este sistema de clasificación se muestran en la Tabla 8

Clase	Uso de Suelo	
1	<i>Evergreen Needleleaf forest</i>	Bosque perenne (hoja de aguja)
2	<i>Evergreen Broadleaf forest</i>	Bosque perenne (hoja ancha)
3	<i>Deciduous Needleleaf forest</i>	Bosque caducifolio (hoja aguja)
4	<i>Deciduous Broadleaf forest</i>	Bosque caducifolio (hoja ancha)
5	<i>Mixed forest</i>	Bosque mixto
6	<i>Closed shrublands</i>	Matorrales Cerrados
7	<i>Open shrublands</i>	Matorrales abiertos
8	<i>Woody savannas</i>	Sabanas arboladas
9	<i>Savannas</i>	Sabanas
10	<i>Grasslands</i>	Pastizales
11	<i>Permanent wetlands</i>	Humedales permanentes
12	<i>Croplands</i>	Cultivos
13	<i>Urban and built-up</i>	Urbano
14	<i>Natural vegetation mosaic</i>	Mosaico vegetación natural
15	<i>Snow and Ice</i>	Nieve y Hielo
16	<i>Barren or sparsely vegetated</i>	Estéril o Escasamente Vegetado

Tabla 8: Sistema de clasificación de usos del suelo (IGBP)

El mapa de uso de suelo con la clasificación anterior se ha descargado en formato raster para la zona de estudio con resolución 500 m, donde cada uso del suelo está representado con el valor que le corresponde a su clase (Cultivos tienen un valor de 12 por ejemplo). Con un análisis mediante herramientas GIS es posible determinar el porcentaje de cada valor (cada uso del suelo) en cada sub-cuenca de interés. La mayor parte de los usos del suelo presentes en la zona de estudio son los correspondientes a las clases 12, 13 y 14, esto es: Cultivos, Urbano y Mosaico de vegetación natural.

La Tabla 9 elaborada por (National Resources Conservation Service, 1986) muestra valores de referencia del Número de Curva en función del uso del suelo y condición hidrológica especificados por IGBP. Según

(Fredline Illorme, 2014) se considera la cuenca vertiente próxima a Gonaives en escenario actual como un suelo con condición hidráulica perteneciente al Grupo C.

MODIS land cover classification		CN for different HSG			
ID	IGBP land cover type	A	B	C	D
0	Water	N/A	N/A	N/A	N/A
1	Evergreen Needleleaf Forest	34	60	73	79
2	Evergreen Broadleaf Forest	30	58	71	77
3	Deciduous Needleleaf Forest	40	64	77	83
4	Deciduous Broadleaf Forest	42	66	79	85
5	Mixed Forest	38	62	75	81
6	Closed Shrublands	45	65	75	80
7	Open Shrublands	49	69	79	84
8	Woody Savannas	61	71	81	89
9	Savannas	72	80	87	93
10	Grasslands	49	69	79	84
11	Permanent Wetlands	30	58	71	78
12	Croplands	67	78	85	89
13	Urban and Built-Up	80	85	90	95
14	Cropland/Natural Vegetation Mosaic	52	69	79	84
15	Snow and Ice	N/A	N/A	N/A	N/A
16	Barren or Sparsely Vegetated	72	82	83	87
255	Fill Value/Unclassified	N/A	N/A	N/A	N/A

Tabla 9: Valores de referencia del Número de Curva en función del uso del suelo y condición del mismo.

(National Resources Conservation Service, 1986)

Para más información respecto a las características propias de las Coberturas, los tipos de Suelo y las condiciones hidráulicas, se puede consultar el documento (National Resources Conservation Service, 1986).

El número de curva para cada sub-cuenca se calcula mediante una suma ponderada de la distribución de los usos del suelo en la misma con el valor del CN asignado a cada uso del suelo presente en la sub-cuenca:

$$CN = \sum_i^n \frac{A_i}{A_t} * CN_i$$

Donde CN (número de curva de la sub-cuenca),  $A_i$  área del uso del suelo  $i$  en la sub cuenca,  $A_t$  área total sub-cuenca y  $CN_i$  Numero de Curva del uso del suelo  $i$ .

Considerando lo ya expuesto en anteriores capítulos de este informe, se prevé una fuerte desertización por el cambio climático en la zona de estudio. Es por tanto adecuado pensar en un futuro empobrecimiento del suelo y el paso de una condición de tipo *C* a tipo *D*, con valores del CN más elevados. En este contexto, la condición hidráulica *D* queda definida en (National Resources Conservation Service, 1986) como un suelo con una cobertura vegetal de menos del 50%, muy pastoreada y sin mantillo (Capa superior del suelo formada principalmente por materia orgánica en descomposición).

Se recomienda, por tanto, actualizar el número de curva (CN) a cada tipo de uso de suelo para considerar el empobrecimiento del suelo debido al calentamiento global (cambio de Condición del suelo de *C* a *D*). Una vez actualizado el valor del CN, se debe volver a aplicar la expresión presentada en este capítulo.

## METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE RIESGOS Y RESUMEN DE RECOMENDACIONES REALIZADAS PARA LA CARRETERA RN5 (HAITÍ) – JULIO 2018

### Introducción

El **riesgo** se define como la combinación de tres conceptos: qué puede pasar, cómo de probable es que pase y cuáles son sus consecuencias. Aplicando al caso concreto de una carretera afectada por amenazas naturales, el qué puede pasar se refiere al fallo de la carretera o alguna de sus partes. El cómo de probable es que pase es la combinación de la probabilidad de que se presenten unas determinadas amenazas naturales y la probabilidad condicional de fallo de la carretera una vez producidas dichas amenazas (lo que se conoce como respuesta del sistema). Por último, las consecuencias son aquellas que se deriven del fallo de la infraestructura incluyendo consecuencias económicas (directas e indirectas) y pérdida de vidas si fuera el caso.

Para representar este riesgo se utilizan generalmente curvas FD (Frecuencia-Daños), donde el eje horizontal representa las consecuencias (D) y el eje vertical representa la probabilidad de que se superen dichas consecuencias (F). De esta forma, el riesgo económico total (en unidades económicas por año) es equivalente al área bajo la curva. Estas curvas se estiman modelizando diferentes casos de amenazas naturales, analizando la vulnerabilidad de la estructura para estas amenazas y estimando las consecuencias que se producirían.

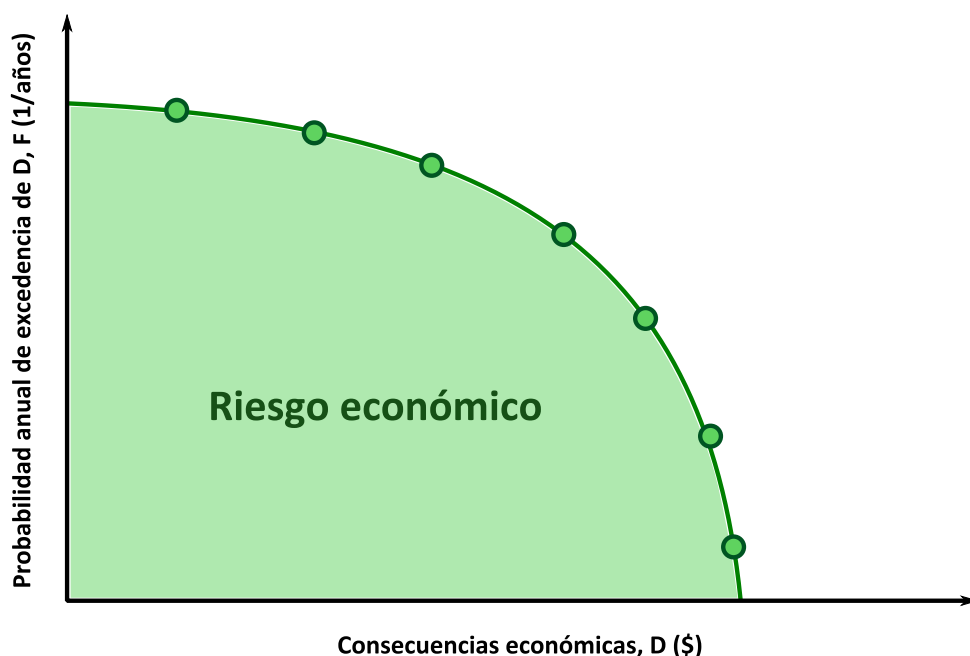


Figura 13: Ejemplo de curva Frecuencia-Daños para cuantificar el riesgo frente a desastres naturales.

En la Figura 1, se resume la metodología propuesta para realizar un análisis cuantitativo de los riesgos naturales que amenazan a la carretera nacional RN5 de Haití, incluyendo el análisis del efecto del cambio climático y la realización de un proceso de identificación de modos de fallo en la zona de estudio. Este proceso permitirá realizar recomendaciones para el diseño de nuevas

obras de la carretera RN5, y realizar estudios más detallados de algunos de los fenómenos analizados como apoyo a la firma encargada del diseño de la carretera y acompañamiento del diseño de las obras. En amarillo, se muestran los apartados directamente relacionados con el cálculo del riesgo y su utilización para el diseño de la carretera, y que por lo tanto, serán implementados en los próximos meses.

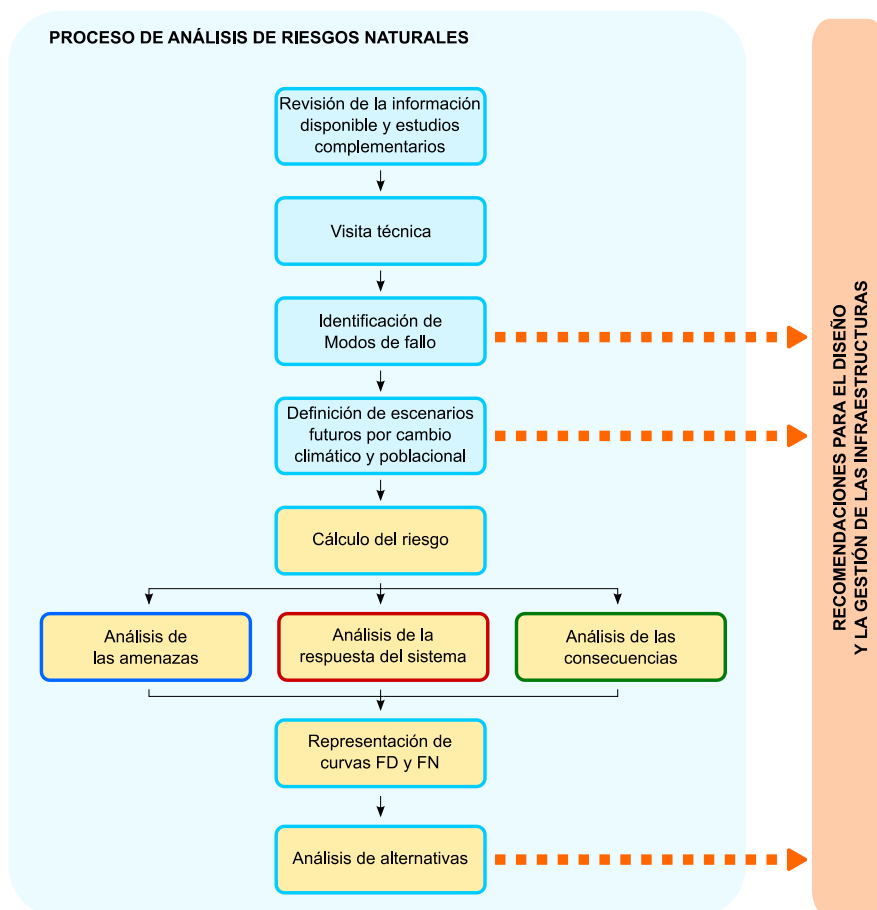


Figura 14: Metodología seguida para el análisis de riesgos naturales en la carretera RN5.

### Identificación de Modos de Fallo

Como se muestra en la figura anterior, tras la visita técnica y la revisión de la información disponible, se realizó una sesión de Identificación de Modos de Fallo para la carretera RN5 el día 23 de febrero en Puerto Príncipe. En las sesiones de trabajo se identificaron 21 modos de fallo grupales relacionados con los riesgos naturales que afectan a la zona de actuación, principalmente asociados a riesgo por inundación, riesgo por fallos geotécnicos y riesgo por fallo en el sistema de gestión a partir de las propuestas de todos los participantes. Los modos de fallo se agruparon en fallos en el trazado de la carretera (A1-A5), fallos en las obras de drenaje (B1-B4), fallos en las obras de paso (C1-C3), fallos en terraplén/desmonte (D1-D5) y fallos en el sistema actual de gestión de riesgos (E1-E3). Estos modos de fallo se encuentran descritos en detalle en el *Informe de Identificación de Modos de Fallo y Visita Técnica de la carretera RN5 (Haití)*. La *Tabla 10* muestra un resumen de los modos de fallo identificados.



Modo de Fallo	Grado
A1: Inundación a gran escala y deterioro del pavimento de la carretera.	B
A2: Erosión de trazado en pendiente por escorrentía	C
A3: Asentamiento de solera por lavado de finos en cimentación	D
A4: Licuefacción del suelo bajo carretera	D
A5: Asentamiento de trazado por formación de cavidades cársticas.	D
B1: Colmatación de drenaje longitudinal por sedimentos	C
B2: Colmatación de drenaje transversal por sedimentos	C
B3: Erosión al pie de obras de drenaje transversal	C
B4: Fallo obra de drenaje transversal por falta de capacidad	C
C1: Asentamiento por erosión en apoyos/cimentación de puentes	C
C2: Derrumbe de obra de paso por empuje hidrodinámico	B
C3: Derrumbe de obra de paso por sollicitación sísmica	E
D1: Deslizamiento de terraplén bajo carretera	C / E
D2: Deslizamiento de desmonte sobre carretera	C / E
D3: Caída de rocas sobre carretera	D
D4: Fallo del talud inducido por erosión	C
D5: Derrumbe de gaviones en los márgenes del cauce	C
E1: Asentamientos informales en zonas inundables	B
E2: Permanencia en zonas potencialmente inundables	B
E3: Mal funcionamiento de sistemas de alerta	B

Tabla 10: Clasificación Modos de Fallo. Carretera RN5 (Haití).

Una vez identificados los potenciales modos de fallo que pueden afectar la infraestructura es necesario realizar una clasificación de los mismos para determinar el grado de relevancia de cada uno de ellos y su posterior inclusión (o no) en la fase cuantitativa de proyecto.

La misión principal de un análisis de riesgo cuantitativo es priorizar y/o introducir recomendaciones que impliquen una reducción de riesgo significativa en la infraestructura estudiada. Por ello, en la fase cuantitativa se deben incluir aquellos modos de fallo que, por alta probabilidad de ocurrencia y/o consecuencias graves tras fallo por amenazas naturales, entrañen un alto riesgo para el proyecto y cuya mitigación sea prioritaria y deba ser analizada en más detalle.

Para los modos de fallo cuya ocurrencia sea poco probable y/o sólo impliquen consecuencias más localizadas, un análisis cuantitativo puede no ser necesario, ya que la propia identificación de los mismos permite establecer recomendaciones de mejora y/o modificaciones en el diseño que disminuyan el riesgo de la infraestructura significativamente. No obstante, si se considera interesante, se pueden realizar análisis cuantitativos para optimizar las recomendaciones propuestas (por ejemplo, para determinar las dimensiones óptimas de una obra de drenaje o de protección contra la erosión).



Así, los modos de fallo identificados han sido clasificados en base a los siguientes grados:

- **Grado A:** El modo de fallo afecta directamente a infraestructuras que tienen, como una de sus funciones principales, la protección frente a amenazas naturales. La reducción de la probabilidad de este modo de fallo es una de las principales misiones de la infraestructura prevista.
- **Grado B:** El modo de fallo se considera factible para el diseño previsto de la infraestructura, su ocurrencia puede generar una destrucción total y generalizada y/o la pérdida completa de función de la infraestructura por un periodo de tiempo largo. La ocurrencia del modo de fallo supone elevadas consecuencias sociales, medioambientales y/o económicas. En este caso, el análisis de riesgo puede introducir cambios significativos en el diseño de la infraestructura y/o plantear la necesidad de otras medidas adicionales.
- **Grado C:** El modo de fallo es factible para el diseño previsto de la infraestructura pero su ocurrencia puede generar solamente un daño parcial y localizado en la infraestructura sin producir elevadas consecuencias sociales, medioambientales y/o económicas. Un análisis de riesgo cuantitativo para estos modos de fallo no se considera necesario pues la fase cualitativa de identificación de estos modos de fallo ya permite introducir cambios pequeños en el diseño de la infraestructura y/o establecer recomendaciones respecto a comprobaciones adicionales y/o el mantenimiento de la infraestructura.
- **Grado D:** El modo de fallo no es factible y su aparición no se considera razonable para el diseño actual de la infraestructura o sus consecuencias son muy bajas. Para estos modos de fallo, no se considera necesario realizar estimaciones de riesgo cuantitativo. Sin embargo, todavía es necesario documentarlos y explicar las razones que se consideran para clasificarlos así. En cualquier caso, la identificación de estos modos de fallo puede servir para realizar recomendaciones sobre vigilancia y mantenimiento.
- **Grado E:** Modos de fallo para los que la información disponible resulta insuficiente para determinar la factibilidad del modo de fallo aunque no pueden ser descartados si su ocurrencia tuviera elevadas consecuencias sociales, medioambientales y/o económicas. Las recomendaciones relacionadas con este tipo de modos de fallo se basan en realizar nuevas campañas de investigación o estudios adicionales con el fin de caracterizar mejor la factibilidad de su ocurrencia.

De esta forma, los resultados del proceso de identificación y clasificación de modos de fallo se utilizarán como input para desarrollar un modelo de riesgo cuantitativo para calcular y analizar los riesgos naturales que amenazan a la carretera RN5 en Haití, centrado en los modos de fallo clasificados como A y B.

### Recomendaciones realizadas para el diseño de la carretera RN5 en los últimos meses

Se han realizado las siguientes recomendaciones a considerar dentro del nuevo diseño de la carretera RN5 entre las poblaciones de Gonaives y Port de Paix:

- Consideración del impacto del cambio climático en:
  - El incremento de precipitaciones asociadas a eventos de huracanes mediante el análisis y ajuste de los datos máximos simulados de lluvia diaria por el modelo climático global CanESM2 en escenario de emisión RCP8.5 en la zona de interés. Se ha consensuado con el equipo de diseño la utilización de los valores extremos

de precipitación resultantes de estos modelos para tener en cuenta el efecto del cambio climático en el diseño, en lugar del efecto sobre las precipitaciones promedio.

- En los usos del suelo en la zona de estudio, actualizando el valor del Número de Curva asociado a los usos presentes en las cuencas vertientes según la clasificación IGBP (16 tipos de suelo), previendo un cambio de condición C en escenario actual a condición D (empobrecimiento) en escenario tendencial debido a los procesos previstos de sequía.
- En el incremento de temperaturas en la zona de estudio para el diseño/construcción de pavimentos de la carretera, considerando en los cálculos de diseño un aumento de temperaturas máximas de 3.5 °C.
- Pavimentación y asfaltado en la carretera RN5. En las zonas potencialmente inundables se recomienda contemplar el uso de materiales resistentes a una inundación como, por ejemplo, el hormigón.
- Dada la actividad histórica registrada por la Falla Septentrional, se recomienda llevar a cabo una comprobación estructural frente a sismo de los principales puentes de la carretera, especialmente los localizados en la zona norte.
- Durante el diseño (especialmente para la nueva variante) se propone analizar la estabilidad de los potenciales deslizamientos de tierra alrededor de las obras para que se definan los puntos de control durante la construcción y se incluya, dentro de las obras de construcción, la estabilización de los taludes con mayor riesgo de deslizamiento.

### Otras recomendaciones relacionadas con la gestión de las obras y el riesgo de inundación en la zona

Por otro lado, se realizan las siguientes recomendaciones a considerar dentro del sistema de gestión de la carretera RN5 entre las poblaciones de Gonaives y Port de Paix:

- Las infraestructuras presentes en la carretera RN5 (obras de drenaje y obras de paso) deberían ir acompañados de un plan de mantenimiento y vigilancia, de forma que se evite la degradación de las mismas y se reparen las erosiones localizadas.
- Se propone que el desarrollo de las nuevas medidas de protección frente a inundaciones se acompañe de un plan de emergencias junto a un sistema de aviso a la población local en caso de inundación que mejore el existente.
- Se recomienda realizar una rehabilitación hidrológico-forestal de las cuencas vertientes, recuperando la cubierta vegetal en las mismas. Gracias a esta rehabilitación se podrán disminuir los volúmenes de escorrentía y sedimentos, reducir sus caudales pico, reduciendo de esta forma los riesgos de inundación en las zonas próximas a la carretera.
- Se recomienda un plan de gestión y concienciación para impedir el vertido de basuras sobre el río y la carretera, acompañado de la concienciación a la población sobre la importancia de mantener las obras de drenaje y los cauces limpios para reducir el riesgo de inundación y mejorar su estado ecológico.

- Se propone una mejora en el sistema de recogida de datos de lluvia (intensidad y volumen) así como del nivel y caudal de los principales cauces que intersectan la carretera a lo largo de su trazado mediante la instalación de estaciones pluviométricas en las cuencas vertientes y estaciones de aforo (medida de nivel de agua y caudal).
- Mayor control de los desarrollos urbanos en las zonas inundables, evitando la aparición de nuevos asentamientos informales en las zonas cercanas a la carretera con mayor potencial de inundación.

### Propuestas consensuadas para incluir en el análisis de riesgo cuantitativo

A partir de las diferentes reuniones realizadas, se ha considerado interesante realizar los siguientes análisis de riesgo cuantitativos con el objetivo de introducir recomendaciones y optimizar los trabajos de diseño de la nueva carretera desde el punto de vista del riesgo ante amenazas naturales:

- Analizar cuantitativamente el riesgo hidrológico existente en todas las obras de paso principales del trazado (grandes puentes), considerando el efecto del cambio climático en las condiciones hidrológicas de los cauces con el objetivo de comparar el riesgo actual existente con el riesgo en escenario tendencial y analizar su seguridad.
- Analizar cuantitativamente el riesgo hidrológico en una obra de drenaje transversal seleccionada (culvert) considerando el efecto del cambio climático y diferentes capacidades de diseño, con el objetivo de determinar las dimensiones óptimas comparando el coste de inversión y la reducción del riesgo. Si se requiere, este análisis puede ser luego aplicado a otras obras de drenaje en el trazado.
- Analizar cuantitativamente el riesgo por inundación general tras crecida del río en el tramo Carrefour Joffre – Gros Morne considerando el efecto del cambio climático, con el objetivo de caracterizar el riesgo hidrológico existente en esta zona crítica y que justifique la necesidad de incluir una alternativa al trazado existente en este tramo.

**Esta lista se irá actualizando en base a las necesidades de diseño que puedan surgir en las próximas fases del proyecto.**

### ¿Para qué otros aspectos puede ser útil el análisis de riesgos en el diseño de una carretera en las próximas fases?

- Analizar diferentes amenazas naturales (inundaciones, geológicas...) en las mismas unidades y comparar el efecto de cada una de ellas.
- Decidir sobre diferentes trazados de la carretera con el fin de tomar la mejor opción desde el punto de vista de reducción de riesgo.
- Analizar el nivel de protección requerido frente a inundaciones en puntos concretos, comparando los costes por inundación y los costes de inversión.
- Analizar el efecto y la eficiencia de otras medidas de reducción de riesgo que se estén planteando para proteger a la carretera.
- Estudiar cómo los planes de rehabilitación hidrológico-forestal de las cuencas ayudarán a reducir el riesgo en esta zona, con el fin de justificar más este tipo de planes.



## REFERENCIAS

---

- BRGM. (2016). *Atlas des Menaces Naturelles en Haiti*.
- Fredline Illorne, V. W. (2014). *Regional Rainfall Frequency and Ungauged Basin Analysis for Flood Risk Assessment in Haiti*.
- Hansen, M. D. (1998). *UMD global land cover classification, 1 kilometer, 1.0*. Univ. of Maryland.
- IADB. (2015). *Historical and future climatic changes*.
- IPCC. (2000). *Informe Especial de Escenarios de Emisiones*.
- IPCC. (2012). *Special Reports on Extremes*.
- Knutson et al, \*. J.-S. (2013). *Dynamical Downscaling Projections of Twenty-First-Century Atlantic Hurricane Activity: CMIP3 and CMIP5 Model-Based Scenarios*.
- Knutson, T. J. (2010). *Tropical cyclones and climate change*.
- Knutson, T. R. (2013). *Dynamical Downscaling Projections of Twenty-First-Century Atlantic Hurricane Activity: CMIP3 and CMIP5 Model-Based Scenarios*.
- Moron et al, F. R.-J. (2015). *Interannual and intra-annual variability of rainfall in Haiti*.
- National Resources Conservation Service. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds*.
- NRCS. (2004). *National Engineering Handbook. C10: Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall*.
- SHRP. (1994). *Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave). The Product of the SHRP. Strategic Highway Research Program*.
- Taylor, M. A. (2013). *The PRECIS-Caribbean Story: Lessons and Legacies*.
- Van Vuuren, J. E.-F. (2011). *The representative concentration pathways: an overview*.