



UNIVERSIDAD DE PANAMÁ
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
DEPARTAMENTO DE SUELOS Y AGUA

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA
ESCORRENTÍA SUPERFICIAL Y LA DESCARGA EN LA QUEBRADA LUTZ
DE LA ISLA BARRO COLORADO.**

ALDY NOEMI MARISCAL GONZÁLEZ

8-889-1345

**TRABAJO DE GRADUACIÓN PRESENTADO COMO REQUISITO PARA
OPTAR POR EL TÍTULO DE MAESTRIA EN MANEJO DE SUELOS Y AGUAS**

PANAMÁ, REPÚBLICA DE PANAMÁ

2025

APROBACIÓN

**UNIVERSIDAD DE PANAMÁ
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSTGRADO
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
DEPARTAMENTO DE SUELOS Y AGUA**

ALDY NOEMI MARISCAL GONZALEZ

8-889-1345

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA
ESCORRENTÍA SUPERFICIAL Y LA DESCARGA EN LA QUEBRADA LUTZ
DE LA ISLA BARRO COLORADO.**

COMITÉ EVALUADOR:

DR. CARLOS HIM

DIRECTOR

MGTR. NOE AGUILAR

ASESOR

MGTR. LEANNE URRIOLA

ASESOR

MGTR. LEANNE URRIOLA

COORDINADORA DE LA MAESTRÍA

PANAMÁ, REPÚBLICA DE PANAMÁ 2025

DEDICATORIA

El presente trabajo de graduación está dedicado a mi madre Dora González de Mariscal, mi padre Alcibiades Mariscal, mis abuelos Mercedes Ortega y Victor Manuel González por su apoyo y amor.

A mis familiares que ya no se encuentran entre nosotros mis abuelos Amparo Ospino de Mariscal (Q.E.P.D.) y José Mariscal (Q.E.P.D.), a mis tíos Leandro García (Q.E.P.D.) y Xenia de Barría (Q.E.P.D.), siempre los tendré presente.

A mi hermana Elsy Mariscal por siempre saber sacarme una sonrisa.

AGRADECIMIENTO

Agradezco al Programa de Monitoreo Físico del Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (STRI) por los conjuntos de datos proporcionados.

A mi asesor principal Dr. Carlos Him González por el tiempo y disposición para lograr completar esta investigación.

A mis amigos Yonelis Vásquez, Juan Vásquez, Manuel Ramos y Brian Harvey quienes me ayudaron y me brindaron su apoyo.

RESUMEN

Las consecuencias del cambio climático afectan muy significativamente a los ecosistemas tropicales, alterando patrones de precipitación, escorrentía y descarga de agua, lo que tiene implicaciones significativas para la disponibilidad y calidad de este recurso esencial.

Este estudio evalúa el impacto del cambio climático en la escorrentía superficial y la descarga en la quebrada Lutz de la isla Barro Colorado que ha mantenido una cobertura boscosa inalterada por más de 100 años bajo la administración del STRI.

Los datos de escurrimiento y escorrentía se basan en cinco décadas de registros hidrológicos y climáticos, lo que permite analizar tendencias históricas, identificar cambios asociados a El Niño y La Niña, y evaluar la influencia de factores como la cobertura vegetal, el tipo de suelo y los eventos climáticos extremos.

Los resultados revelan, como es de esperarse, una correlación entre los patrones de precipitación y la descarga, destacando las diferencias estacionales entre las temporadas seca y lluviosa. Además, se observan variaciones significativas durante los años de anomalías climáticas extremas. Estos hallazgos demuestran la importancia de monitorear y gestionar de manera sostenible los recursos hídricos en ecosistemas tropicales y, sobre todo, el papel crucial del bosque en la regulación de los procesos hidrológicos.

ABSTRACT

Climate change impacts on tropical ecosystems alter patterns of precipitation, runoff, and discharge, has significant implications for the availability and quality of this essential resource.

This study assesses the impact of climate change on surface runoff and discharge in the Lutz Creek of Barro Colorado Island, Panama, which has maintained an undisturbed forest cover for over 100 years under the administration of STRI.

Runoff and discharge data are based on five decades of hydrological and climate records, allowing for the analysis of historical trends, the identification of changes related to El Niño and La Niña, and the assessment of factors such as vegetation cover, soil type, and extreme weather events.

The results reveal, as expected, a correlation between precipitation patterns and discharge, highlighting the seasonal differences between the dry and rainy seasons. In addition, significant variations are observed during years of extreme weather anomalies. These findings demonstrate the importance of monitoring and sustainably managing water resources in tropical ecosystems and, above all, the crucial role of forests in regulating hydrological processes.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
ÍNDICE DE CONTENIDO	3
ÍNDICE DE CUADROS.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE ANEXOS.....	7
ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS.....	8
I. INTRODUCCIÓN.....	10
1.2 HIPÓTESIS	12
II. REVISIÓN DE LITERATURA	13
2.1 Características de la Isla Barro Colorado	13
2.2 Interacciones entre clima, vegetación y suelo en la regulación de la escorrentía superficial	16
2.3 Precipitación.....	19
2.4 Infiltración	20
2.4 Influencia de los bosques en la descarga y almacenamiento hídrico	22
2.5 Cambio Climático	23
III. ASPECTOS METODOLÓGICOS	28
3.1 Ubicación del área de estudio.....	28
3.1.1 Características de la estación Lutz.....	28
3.1.2 Características de la estación El Claro.....	29
3.2 Caracterización de la zona de estudio	30
3.2.1 Cobertura boscosa.....	30
3.2.2 Clima.....	33
3.2.3 Geología.....	33
3.2.4 Hidrología	37
3.6. Análisis estadístico de datos de descarga y precipitación	39
3.6.1 Obtención de datos de descarga y escorrentía en la cuenca Lutz	39

3.6.2 Obtención de datos de precipitación en la estación El Claro.....	40
3.7 Obtención y Preparación de Datos	41
3.7.1 Limpieza y Validación de Datos	42
3.7.2 Carga y Transformación en Power BI	42
3.7.3 Tablas y Gráficos en Excel	43
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
4.1 Análisis de Datos	46
4.1.1 Análisis de datos de descarga y escorrentía en Lutz	48
4.1.1.1 Variación de la descarga anual	48
4.1.1.2 Variación de la escorrentía anual	50
4.1.1.3 Variación de la descarga anual por temporada seca y temporada lluviosa	51
4.1.1.4 Tendencia de descarga y escorrentía por temporada.....	52
4.1.2 Análisis de datos de Precipitación y Descarga	56
4.1.2.1 Correlación entre los datos de Precipitación y Descarga anual	56
4.1.2.2 Correlación entre los datos de Precipitación y Descarga en Temporada Lluviosa	58
4.1.2.3 Correlación entre los datos de Precipitación y Descarga en Temporada Seca	59
4.1.2.4 Análisis de la Relación entre los datos de Precipitación y Descarga anual por Temporada seca y lluviosa.....	60
4.1.3 Análisis de datos de descarga en Lutz y datos de precipitación en El Claro según Fenómenos del niño y la niña por intensidad del evento anual.....	63
4.1.3.1 Registros de fenómenos de Niño y Niña, según NOAA en la región desde 1971 hasta la Actualidad.....	63
4.1.3.2 Relación entre los datos de Precipitación y Descarga anual en BCI según Fenómeno del Niño y la Niña por intensidad	64
4.1.3.3 Análisis de Cambios de la Descarga y Precipitación en BCI en la temporada seca	66
4.1.3.4 Análisis de Cambios de la Descarga y Precipitación en BCI en la temporada lluviosa.....	69
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	72
ANEXOS	75
BIBLIOGRAFÍA	91

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Rendimiento Específico Descarga (L/Seg/Km2).	48
Cuadro 2. Registros de Fenómenos de El Niño y La Niña, según la NOAA	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de perfil de suelo para cada una de las seis formas de suelo de la Isla Barro Colorado. Se muestra una cinta métrica como escala; wrb: clasificación de base de referencia mundial.....	14
Figura 2. Orthophoto de la Isla Barro Colorado	15
Figura 3. Mapa de la Isla de Barro Colorado delimitado por senderos	36
Figura 4. Visualización de datos de precipitación en Power Bi.....	45
Figura 5. Variación de la descarga anual en la quebrada Lutz (1972-2024)	49
Figura 6. Variación de la escorrentía anual	50
Figura 7. Variación de la descarga anual por temporada seca y temporada lluviosa	51
Figura 8. Tendencia de descarga y escorrentía por temporada	52
Figura 9. Correlación entre los datos de precipitación y descarga anual	56
Figura 10. Correlación entre los datos de precipitación y descarga en temporada lluviosa	58
Figura 11. Correlación entre los datos de precipitación y descarga en temporada seca ...	59
Figura 12. Relación entre los datos de precipitación y descarga anual por temporada seca y lluviosa.....	60
Figura 13. Relación entre los datos de precipitación y descarga anual en BCI según fenómeno del niño y la niña por intensidad	64
Figura 14. Descarga y precipitación en BCI en la temporada seca.....	66
Figura 15. Descarga y precipitación en BCI en la temporada lluviosa.....	69

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Precipitación, descarga y escorrentía anual.....	75
Anexo 2. Descarga anual en m ³ /min	76
Anexo 3. Descarga y escorrentía anual por temporada.....	78
Anexo 4. Precipitación anual por temporada.....	79
Anexo 5. Descarga anual por fenómeno	82
Anexo 6. Precipitación anual por fenómeno registrado.....	83
Anexo 7. Creación de tabla de calendario por temporada en Power BI	86
Anexo 8. Cálculo de descarga y precipitación por temporada en Power BI.....	88

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

ACP Autoridad del Canal de Panamá

BCI Barro Colorado Island

CEVARCAM Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático

DAP Diámetro a la altura del pecho

DAX Data Analysis Expressions.

LIDAR Laser Imaging Detection And Ranging

OMN Organización Meteorológica Mundial

ONU Organización de las Naciones Unidas

°C Grados Celsius

STRI Smithsonian Tropical Research Institute

et al. Y otros

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

Ha Hectárea

km Kilómetro

km/h Kilómetro por hora

km² Kilómetros cuadrado

l/m² Litros por metro cuadrado

m² Metros cuadrados

m²/ha Metros cuadrados por hectárea

m³ Metros cúbicos

m³/h Metros cúbicos por hora

m³/seg Metros cúbicos por segundo

mm/h Milímetros por hora

mm/seg Milímetros por segundos

g/cc gramos por centímetro cúbico, g/cm³

m.s.n.m. Metros sobre el nivel del mar

GCMs Modelos de Circulación General

RCMs Modelos Regionales de Clima

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration

PPT Lluvia

I. INTRODUCCIÓN

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el cambio climático es uno de los mayores desafíos que enfrenta la humanidad, con impactos significativos en los ecosistemas, la biodiversidad y la disponibilidad de recursos esenciales como el agua. Este fenómeno global, caracterizado por alteraciones en los patrones climáticos y un aumento en la frecuencia de eventos extremos, representa un reto crítico para la gestión sostenible de los recursos hídricos, especialmente en regiones tropicales con ecosistemas altamente diversos y frágiles.

La Isla Barro Colorado, ubicada en el Canal de Panamá, es conocida internacionalmente por ser un laboratorio natural donde por más de 100 años se han llevado a cabo diferentes estudios de biodiversidad, ecología, comportamiento animal, entre otros. Desde su establecimiento como reserva natural en 1923, esta isla ha servido como punto focal para investigaciones científicas, proporcionando valiosos datos sobre los procesos ecológicos e hidrológicos que ocurren en bosques tropicales húmedos. Entre sus componentes clave destaca la cuenca de la quebrada Lutz, un sistema hidrológico representativo que refleja las respuestas del agua superficial y subterránea ante variaciones climáticas.

El presente estudio se enfoca en evaluar los impactos del cambio climático en la escorrentía superficial y la descarga de agua en la quebrada Lutz. Este análisis busca identificar cambios en las tendencias hidrológicas a lo largo de cinco décadas de monitoreo continuo, correlacionando estos datos con eventos climáticos extremos, como los fenómenos de El Niño y La Niña, que han influido significativamente en la región.

Asimismo, se exploran los efectos de factores como la cobertura vegetal, el tipo de suelo y las variaciones en los patrones de precipitación, elementos cruciales para entender las dinámicas de almacenamiento y flujo del agua en la cuenca.

La relevancia de este trabajo radica en su contribución al conocimiento sobre la relación entre el cambio climático y los sistemas hidrológicos en áreas tropicales protegidas. Los resultados obtenidos pueden ayudar al diseño de estrategias de manejo adaptativo que mitiguen los efectos negativos del cambio climático, fomentando la conservación de la biodiversidad y la sostenibilidad de los recursos hídricos en Barro Colorado y ecosistemas similares.

Ante la preocupación mundial por la seguridad hídrica, esta investigación no solo destaca la importancia de los sistemas naturales como amortiguadores frente al cambio climático, sino también la necesidad de enfoques interdisciplinarios que integren datos climáticos, hidrológicos y ecológicos para abordar los desafíos ambientales del siglo XXI.

1.2 HIPÓTESIS

H1: Los datos históricos de la esorrentía superficial y descarga en la Quebrada Lutz de la Isla Barro Colorado permiten evaluar el impacto que ha tenido el Cambio Climático en la esorrentía superficial y la descarga en la Quebrada Lutz de Barro Colorado.

H0: Los datos históricos de la esorrentía superficial y descarga en la Quebrada Lutz de la Isla Barro Colorado no permiten evaluar el impacto que ha tenido el Cambio Climático en la esorrentía superficial y la descarga en la Quebrada Lutz de Barro Colorado.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Características de la Isla Barro Colorado

La Isla Barro Colorado se formó en 1914 como resultado de la construcción de la represa del río Chagres y la creación del Lago Gatún, la isla abarca aproximadamente 1500 hectáreas. Su elevación es de 137 metros sobre el nivel del lago, su cima es ancha, plana y está cubierta de basalto, crestas escarpadas y valles de rocas sedimentarias que contienen restos volcánicos. Según Dietrich (1982), los suelos de la isla son ricos en arcilla y tienen una profundidad promedio inferior a 50 cm.

Un estudio análisis de suelos identificó que existen seis principales formas de suelo: franco fino pedregoso y poco profundo, franco fino oscuro, gleyes, arcillas pesadas, arcillas pálidas expansivas y arcillas rojas ligeras. De estas, las arcillas rojas ligeras son las únicas características de un clima tropical, presentando una meteorización avanzada, bajos niveles de nutrientes y acidez significativa, características comunes en los trópicos (Dietrich, 1982).

Por otro lado, las otras formas de suelo están menos meteorizadas debido a procesos como mal drenaje (gleyes y suelos arcillosos pesados), retención de elementos químicos (suelos arcillosos pálidos expansivos) y la erosión que elimina materiales superficiales más meteorizados en áreas inclinadas (francos finos pedregosos y poco profundos). En conjunto, estos suelos presentan variabilidad en términos de desarrollo, drenaje, fertilidad y capacidad para almacenar materia orgánica (Yavitt, 2024).

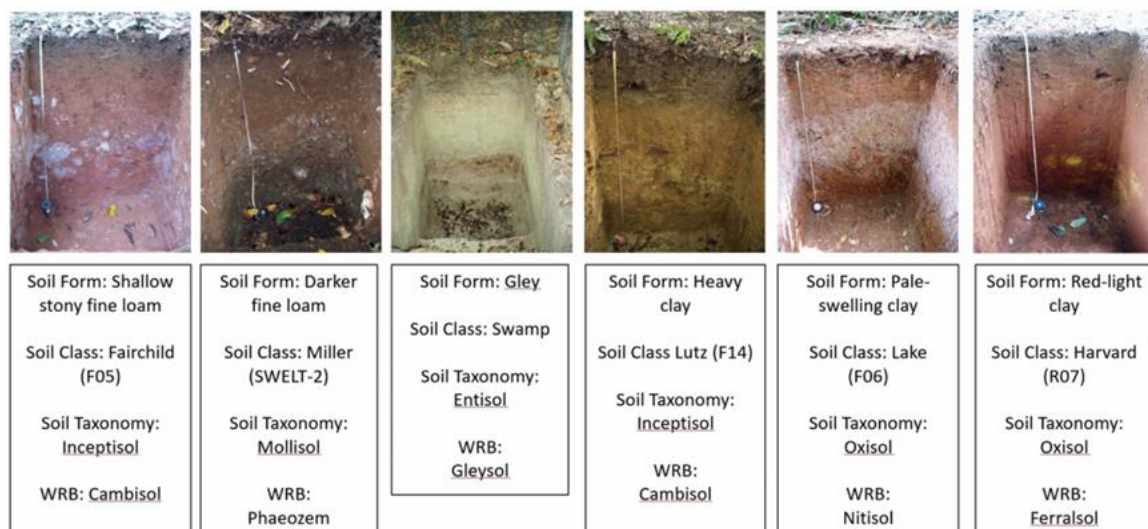


FIGURA 1. EJEMPLO DE PERFIL DE SUELO PARA CADA UNA DE LAS SEIS FORMAS DE SUELO DE LA ISLA BARRO COLORADO. SE MUESTRA UNA CINTA MÉTRICA COMO ESCALA; WRB: CLASIFICACIÓN DE BASE DE REFERENCIA MUNDIAL.

Fuente: Fuente: Yavitt (2024). Soils of Barro Colorado Island. Pág. 32.

Las raíces de las plantas en la isla están principalmente concentradas en los 10-20 cm superiores del suelo, aunque las raíces principales pueden penetrar en capas más profundas de saprolita y lecho rocoso erosionado, lo que permite a las especies adaptarse a las características particulares de los suelos tropicales poco profundos (Dietrich, 1982).

La vegetación de la Isla Barro Colorado fue descrita por Foster y Brokaw (1996), como un bosque húmedo tropical semideciduo que se ha mantenido prácticamente intacto desde que fue declarada reserva natural en 1923. Según Dente y Elsy (2024), el bosque está compuesto por una mezcla de bosques primarios y secundarios, con aproximadamente la mitad suroeste de la isla cubierta por bosque primario. Estudios recientes utilizando tecnología LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) han demostrado que, aunque

las diferencias estructurales entre los bosques primarios y secundarios han disminuido con el tiempo, todavía existen, siendo notable la mayor altura del dosel en los bosques primarios (Mascaro, 2012).

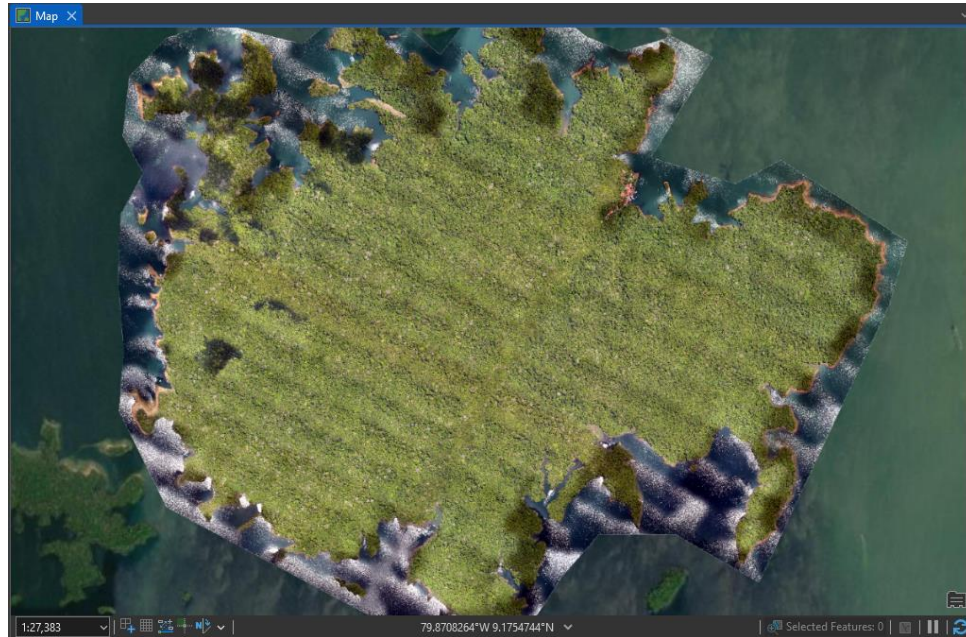


FIGURA 2. ORTHOPHOTO DE LA ISLA BARRO COLORADO

Fuente: Imagen obtenida de Smithsonian ForestGEO Barro Colorado Island LiDAR

Orthophoto 2023, at 50m resolution

La flora de la isla incluye géneros típicos de suelos tropicales ricos en nutrientes, como *Cedrela*, *Guarea* y *Trichilia* (Meliaceae); *Ficus* y otros géneros de la familia Moraceae; y especies emergentes como *Ceiba* (Bombacaceae) y *Inga* (Leguminosae). Foster (1996) destaca que los suelos arcillosos de la isla, derivados de rocas ígneas y sedimentarias, sostienen una vegetación mucho más rica en nutrientes minerales en comparación con otras regiones tropicales como la Amazonia y el sudeste asiático.

El dosel de la isla tiene una altura promedio de 25 a 35 m, con emergentes que alcanzan los 45 m, según Zimmermann (2012) en su estudio sobre la vegetación del área encontró que una hectárea contiene aproximadamente 98 especies de árboles y 1140 troncos mayores a 5 cm de diámetro, con un área basal promedio de 35 m²/ha.

En cuanto al clima, Barro Colorado podemos decir que tiene un régimen climático típico de las tierras bajas tropicales. La temperatura media anual es de 27 °C, con un rango de temperatura diurna promedio de 9 °C. La isla recibe alrededor de 2600 mm de precipitación anual, de los cuales el 90% ocurre durante la temporada de lluvias, que se extiende de mayo a diciembre. Durante la estación seca, los vientos alisios inhiben las tormentas convectivas, marcando los ritmos climáticos estacionales (Dietrich, 1982).

2.2 Interacciones entre clima, vegetación y suelo en la regulación de la escorrentía superficial

En los ecosistemas naturales, las plantas interactúan con el suelo, el aire y el agua de formas complejas que influyen significativamente en los procesos hidrológicos. La primera interacción es al caer la lluvia sobre una masa forestal, la primera influencia de ésta es la intercepción. Según el carácter de la precipitación y la densidad de la masa, queda retenida en la cubierta de copas una cantidad variable de agua, que se evapora sin llegar al suelo. Según Wilm (1948), datos experimentales obtenidos para diversos climas y tipos de bosques indican que la cantidad de lluvia interceptada por una cubierta de copa es función del espacio de almacenamiento que exista en la superficie de la vegetación cuando comience la lluvia. Un bosque espeso de árboles con copa alta y densa interceptará, según

esto, la máxima cantidad de agua descargada por una tormenta; la mínima interceptación corresponderá a la cubierta clara de una vegetación rala.

Aparte de la clase y densidad de la vegetación, la interceptación es menor a medida que avanza la tormenta y que va empapándose la cubierta de copas. Al final de una tormenta intensa y prolongada las copas sólo retienen una cantidad de agua apenas suficiente para compensar la evaporación que durante el aguacero se produce en la superficie de las hojas. Una vez que la lluvia ha atravesado la cubierta de copas, toda el agua o parte de ésta penetra en el suelo. Una parte de esta agua ocupa los espacios de almacenamiento formados por los poros del suelo, llenando los espacios capilares y después, si existe un volumen suficiente de agua, los espacios mayores no capilares. A medida que el aguacero se acerca a su fin, el agua contenida en los espacios no capilares se filtra por gravedad llegando a los espacios más profundos, al nivel freático, o a través de corrientes subterráneas, hasta los cursos de agua. El agua restante queda retenida en el suelo venciendo la fuerza de gravedad y toda ella o parte de esta se restituye a la atmósfera por evaporación directa o transpiración a través de las raíces y de las copas de los árboles. El volumen de agua consumida de esta suerte varía según la temperatura, humedad y movimiento del aire, y también según el volumen del agua almacenada en el suelo, la amplitud y profundidad de los sistemas radicales y el período de tiempo que transcurra entre dos lluvias.

Las raíces de las plantas desempeñan un papel esencial al aumentar la permeabilidad del suelo y al atravesar su superficie, donde actúan como pequeñas barreras que ralentizan el flujo superficial, reduciendo así su velocidad y capacidad erosiva (Dietrich, 1982).

Un factor erosivo clave en los bosques tropicales es el impacto de las gotas de lluvia, como señalan Ruxton (1967) y Tricart (1972). Sin embargo, el agua que se acumula detrás de las raíces expuestas disminuye la frecuencia del impacto de las gotas en la superficie del suelo, lo que ayuda a mitigar la erosión. Además, el bosque tropical ofrece múltiples servicios ambientales: proporciona sombra, regula temperaturas extremas, reduce la acción del viento y la erosión, intercepta parte de la lluvia y contribuye a aumentar la humedad relativa, al tiempo que disminuye la escorrentía superficial (Lee, 1980).

La profundidad y textura del suelo son claves para determinar su capacidad para almacenar agua, lo que influye en la disponibilidad hídrica para las plantas. El crecimiento de raíces, el desarraigo de árboles y las actividades de fauna edáfica contribuyen al equilibrio entre la erosión y la formación de suelo. Este proceso, a su vez, regula la topografía y afecta las tasas de escorrentía durante las precipitaciones (Leigh, 1982).

En la isla de Barro Colorado, las lluvias intensas y breves, comunes entre abril y diciembre, provocan la saturación de los suelos, generando descargas en pequeños barrancos. Al finalizar la temporada lluviosa, la vegetación extrae agua más rápido de lo que las lluvias de la estación seca la reponen, lo que conduce a un progresivo secado del suelo y al desarrollo de grietas profundas. Este fenómeno puede inducir estrés hídrico en la vegetación, dependiendo del nivel de agua almacenada en el suelo y las necesidades hídricas de las plantas (Dietrich, 1982).

Durante la temporada de lluvias, la capacidad de infiltración del suelo tropical puede disminuir debido a la compactación y pérdida de macroporos generados por raíces y fauna edáfica. Esto puede conducir a la formación de flujo superficial de saturación, que

Dietrich (1982) estima representa aproximadamente el 20% del escurrimiento total en la cuenca de la quebrada Lutz. Además, estudios de Kursar (1995) en suelos montmorilloníticos de la isla indican que, a medida que avanza la temporada húmeda, las vías de flujo en el suelo se deterioran, reduciendo su capacidad de infiltración. Este efecto es parcialmente revertido durante la estación seca, cuando la biota edáfica restaura la estructura del suelo y los macroporos.

Por otro lado, Stallard (1999) documenta que los macroporos asociados con raíces densas son fundamentales para la infiltración de agua en los suelos arcillosos de la cuenca de la quebrada Lutz, donde las pruebas de conductividad hidráulica muestran altas tasas de permeabilidad en las zonas superficialmente enraizadas. Aproximadamente entre el 6% y el 10% de la precipitación en la cuenca se pierde en almacenamiento subterráneo profundo, contribuyendo eventualmente al flujo base de los arroyos mediante manantiales y filtraciones subterráneas.

La relación entre vegetación, suelo y clima es crítica para entender la dinámica de la esorrentía superficial en un contexto de cambio climático, especialmente en regiones como la isla de Barro Colorado.

2.3 Precipitación

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), las variaciones espaciales y temporales de la precipitación son parámetros hidrológicos fundamentales que, se describen utilizando promedios climatológicos, valores extremos y distribuciones de frecuencia. Estos varían según la ubicación, la topografía y las características de las masas de aire. Sin embargo, al interpretar los datos de precipitación local, es crucial considerar

sus limitaciones inherentes y evaluar su consistencia en relación con datos obtenidos en áreas circundantes. Aunque las mediciones en estaciones individuales representan puntos específicos y pueden carecer de representatividad para áreas más amplias, estas mediciones son herramientas valiosas para identificar patrones de variabilidad temporal y espacial de la precipitación.

La precipitación anual o mensual, promediada durante treinta años, se define como precipitación normal. En el contexto de la hidrología y la silvicultura, la relevancia de este indicador depende en gran medida de la variabilidad estacional de la precipitación, que influye directamente en los procesos ecológicos y en el balance hídrico de un área determinada. El rango normal corresponde al tercio central de la distribución climatológica de la precipitación trimestral.

2.4 Infiltración

La infiltración se refiere al movimiento descendente del agua a través de la superficie del suelo mineral. Su velocidad, expresada comúnmente en unidades como milímetros por hora (mm/h), está influenciada por diversos factores, incluidos la intensidad de la precipitación y las características del suelo. Por ejemplo, en suelos desnudos, la velocidad de infiltración no puede superar la intensidad de la precipitación, mientras que en áreas forestales está limitada por la "precipitación efectiva". En condiciones naturales, la infiltración del agua en los suelos forestales se da bajo la influencia combinada de la gravedad y la atracción capilar, aunque en algunos casos puede ser promovida por la presión del agua estancada sobre la superficie. La capa superior del suelo, al ser la más

permeable, permite una infiltración inicial rápida, pero una vez saturada, la infiltración depende de la permeabilidad de las capas más profundas.

Las altas capacidades de infiltración observadas en áreas forestales explican por qué el flujo rápido representa un porcentaje reducido de la descarga total en estas zonas. Además, la cobertura forestal disminuye las tasas máximas de descarga, estabilizando los flujos hidrológicos. Según Lee (1980), esta capacidad de infiltración está directamente relacionada con características como la porosidad del suelo y su contenido de materia orgánica, mientras que se ve negativamente afectada por factores como la densidad aparente del suelo y su contenido de arcilla. Sin embargo, factores externos pueden alterar significativamente la capacidad de infiltración. Por ejemplo, el impacto de las gotas de lluvia puede deteriorar la estructura del suelo, provocando que partículas finas bloqueen los poros, reduciendo así la infiltración. En condiciones de humedad elevada, el espacio poroso del suelo puede llenarse completamente de agua, impidiendo una mayor infiltración. También se observa que, en suelos excepcionalmente secos, una condición hidrofóbica puede disminuir la capacidad de infiltración. Por el contrario, terrenos con vegetación suelen ser más absorbentes, ya que la hojarasca y las raíces mejoran la porosidad y estabilizan la estructura del suelo. Bajo la cobertura forestal, estos efectos son aún más marcados, ya que las raíces profundas aumentan la capacidad de almacenamiento de agua y favorecen mayores tasas de infiltración.

Hidrológicamente, la infiltración es fundamental, ya que regula la transición entre las aguas superficiales de rápido movimiento y las aguas subterráneas de flujo más lento. Las propiedades físicas del suelo, su compactación, contenido de humedad, permeabilidad

de las capas subyacentes y el microclima local son factores clave que influyen en la capacidad de infiltración. En suelos forestales no perturbados, las condiciones suelen ser óptimas, aunque esta capacidad puede variar significativamente en respuesta a tormentas, cambios estacionales y actividades de manejo forestal.

Stallard (1999) concluye que el agua que se infiltra y no se evapora ni transpira, luego ingresa al flujo subterráneo. Las principales vías de infiltración en los suelos arcillosos son los macroporos, generalmente asociados con los sistemas radiculares. Las pruebas de conductividad hidráulica muestran consistentemente una alta permeabilidad asociada con un enraizamiento denso. Otros creadores de macroporos incluyen lombrices de tierra e insectos, como las hormigas cortadoras de hojas, que excavan el suelo a gran escala. Además, en los estudios desarrollados por Stallard (1999) muestran un balance hídrico a largo plazo para la cuenca de captación de Lutz Creek muestra que entre el 6% y el 10% de la precipitación entrante se pierde en el almacenamiento profundo de agua subterránea. Otra parte del agua se dirige hacia caminos de flujo profundos que eventualmente emergen de manantiales y se filtran adyacentes al canal del arroyo.

2.4 Influencia de los bosques en la descarga y almacenamiento hídrico

Los ecosistemas forestales desempeñan un papel crucial en el almacenamiento de agua subterránea y la regulación de la descarga. En general, los bosques presentan mayores tasas de evaporación y transpiración que otros tipos de cobertura vegetal, lo que puede resultar en una reducción del caudal de los ríos bajo condiciones climáticas similares.

Durante los períodos secos, la descarga depende principalmente del flujo base, alimentado por el almacenamiento de agua subterránea, lo que hace que un menor caudal en arroyos forestales sea indicativo de una disminución en dicho almacenamiento.

Además, la vegetación forestal tiene un efecto dual: reduce la evaporación directa al proteger el suelo, pero incrementa la extracción de agua desde capas profundas, especialmente en períodos secos. Esto genera un equilibrio entre el mantenimiento de la humedad superficial y el agotamiento de las reservas subterráneas, dependiendo de factores como la profundidad del sistema radicular y la duración de la temporada de crecimiento.

Por otro lado, los bosques mejoran la capacidad de infiltración del suelo debido a la presencia de hojarasca y raíces, aunque esta ventaja puede reducirse en condiciones de mayor secado previo. También generan variaciones en la distribución de la precipitación a través de mecanismos como el flujo por tallos, que concentra el agua en la base de las raíces, maximizando las oportunidades de recarga del suelo (Lee, 1980).

2.5 Cambio Climático

El monitoreo de los diferentes parámetros climáticos en la Isla Barro Colorado es esencial, ya que proporciona datos relevantes para múltiples proyectos centrados en la respuesta de los bosques tropicales al cambio climático. Este fenómeno, definido por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) como una serie de cambios a largo plazo en las temperaturas y patrones climáticos, puede tener causas naturales como variaciones en la actividad solar o erupciones volcánicas. Sin embargo, desde el siglo XIX, las actividades

humanas, como la quema de combustibles fósiles, se han convertido en el principal impulsor del cambio climático (ONU, 2022).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) señala que el calentamiento de la atmósfera, el océano y la tierra ha ocurrido a un ritmo sin precedentes en al menos 2,000 años, causando cambios rápidos y generalizados en todos los sistemas climáticos y ambientales. Este calentamiento está vinculado a eventos meteorológicos extremos, como olas de calor, precipitaciones intensas, sequías y ciclones tropicales, con un impacto creciente desde el siglo XX (IPCC, 2022). La temperatura global en superficie ha aumentado más rápidamente desde 1970 que en cualquier otro período similar de los últimos 2,000 años, alcanzando niveles nunca registrados en la última década (2011–2020).

En regiones como Centroamérica, el cambio climático está generando impactos significativos. Según el IPCC (2022), se prevé una disminución de hasta un 30% en las precipitaciones, lo que reducirá drásticamente la disponibilidad de agua per cápita en la región, proyectándose una caída del 82% al 90% para el año 2100 (CEPAL, 2012). Además según Manes (2021), se anticipa una contracción de la distribución de especies nativas en Mesoamérica debido al aumento de la aridez, afectando negativamente la biodiversidad.

Los bosques tropicales también se ven afectados, experimentando disminuciones en su productividad primaria debido al incremento de temperaturas, la reducción de precipitaciones y las sequías. Un calentamiento de 3°C podría transformar grandes áreas de selva tropical en pastizales de sabana (IPCC, 2022). La deforestación y la degradación forestal exacerban estas problemáticas al reducir las reservas de carbono, la biodiversidad

y los servicios ecosistémicos esenciales, como la regulación climática y el ciclo hidrológico (Jia, 2019). Esto, a su vez, incrementa la vulnerabilidad del paisaje frente al cambio climático, incluso en áreas protegidas.

La deforestación en los trópicos genera importantes alteraciones en el ciclo hidrológico, incluyendo una reducción en las precipitaciones y un aumento de la escorrentía superficial. En el Amazonas, por ejemplo, ha contribuido a una disminución del 1.3%-2.3% en las precipitaciones y un retraso en la estación húmeda (Douville, 2021). Los Modelos de Circulación General (GCMs) y los Modelos Regionales de Clima (RCMs) sugieren que la deforestación a gran escala en las regiones tropicales podría causar un aumento en las temperaturas locales de hasta $+0.61^{\circ}\text{C}$, lo cual intensificaría las estaciones secas y prolongaría las sequías (Jia, 2019).

Por otro lado, fenómenos climáticos como El Niño y La Niña, vinculados a variaciones en la temperatura del Océano Pacífico, también juegan un papel crucial en la variabilidad climática. Durante episodios de El Niño, se observa un aumento en las temperaturas de la superficie del mar y patrones alterados de precipitación, con lluvias intensificadas en ciertas regiones y sequías en otra (Center, 2022). El impacto de estos eventos puede intensificarse con el calentamiento global, aumentando la frecuencia y severidad de fenómenos extremos.

Los bosques tropicales, aunque resilientes en muchos aspectos, enfrentan la posibilidad de alcanzar "puntos de inflexión", donde su capacidad de recuperación ante perturbaciones climáticas disminuye significativamente. A pesar de su capacidad para adaptarse a variabilidad climática moderada, como se ha observado en plántulas y bosques

secundarios, el impacto acumulativo del cambio climático, la deforestación y otros factores podría provocar extinciones rápidas y cambios irreversibles en su estructura y función. (Poorter, 2016; Verbessell, 2016)

En este contexto, la mitigación de gases de efecto invernadero y la reducción de la deforestación son esenciales para preservar la biodiversidad, garantizar la provisión de servicios ecosistémicos críticos y reforzar la resiliencia de los bosques tropicales frente a las perturbaciones climáticas (Díaz, 2019; Saatchi, 2021). Solo mediante una acción concertada se podrá enfrentar el desafío del cambio climático y sus impactos en los sistemas forestales y los medios de vida que dependen de ellos.

El más reciente informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (2023) prevé una intensificación del ciclo hidrológico global entre 2015 y 2050, proyectando incrementos en la precipitación (+3%), la evapotranspiración (+2%) y el escurrimiento (+6%), este último vinculado directamente con el caudal de los ríos.

De acuerdo con Müller (2024), investigadores del Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático (CEVARCAM) de la Universidad Nacional del Litoral (UNL) y del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), un incremento global del 6% en el escurrimiento sugiere una tendencia al alza en la descarga de los ríos hacia los océanos, una dinámica evidente en simulaciones realizadas desde el año 2000. Esto indica que el ciclo hidrológico experimentará cambios significativos, lo que resultará en un aumento del caudal en algunos ríos. Müller (2024) explican también que la razón por la que, en un escenario de calentamiento global, habría mayor precipitación en algunas regiones es debido a que el aumento de la temperatura de los océanos facilita la

evaporación, aumentando la cantidad de agua que pasa a la atmósfera. Esto implica una atmósfera con mayor humedad y facilidad para la generación de nubes. Como resultado, se producen lluvias más intensas y frecuentes sobre los continentes, principalmente en zonas tropicales, como consecuencia se incrementan los caudales de los ríos.

III. ASPECTOS METODOLÓGICOS

3.1 Ubicación del área de estudio

El sitio de estudio hidrológico de la Microcuenca de la quebrada Lutz, está ubicada en la vertiente Noreste del BCI, ubicado en medio del Lago Gatún en la parte central de la República de Panamá (presa a las 9-09042.835800norte, 79-50015.669900W). La cuenca está sustentada por un lecho de arenisca fosilífera y tobácea del Oligoceno, rico en calcita, y suelos ricos en arcilla (esmetíticos) recubren una espesa saprolita (Johnsson, 1989; Baillie, 2007). El estudio se estableció en 1972 como parte de un programa más amplio de monitoreo ambiental en la isla (Windsor, 1990).

El tamaño de la Microcuenca de la quebrada Lutz es de 9.69 hectáreas. La cuenca se caracteriza por laderas empinadas que desembocan rápidamente en el arroyo (Larsen, 2021).

3.1.1 Características de la estación Lutz

Construida en 1972, la torre Lutz tenía originalmente 42 m de altura. En octubre de 2001, la torre se elevó a 48 m debido al aumento de la altura del bosque circundante que se produjo durante los 30 años anteriores.

La estación consta de un transecto meteorológico vertical a través del dosel forestal con sensores de temperatura y humedad a 1, 20, 42 y 48 m. Hay sensores de radiación solar, un anemómetro y un atmómetro EtGage en el nivel más alto de la torre. También se toman

mediciones manuales de temperatura máxima y mínima y humedad relativa al mediodía en la torre Lutz.

El vertedero en forma de V ubicado cerca de la base de la torre mide la escorrentía de la mayor parte de la cuenca de la quebrada Lutz. Los datos se registran utilizando un registrador gráfico y un burbujeador de presión base. Un técnico realiza registros diarios de la altura con fines de calibración.

3.1.2 Características de la estación El Claro

Los datos de precipitación provienen de “El Claro” este es un pequeño claro cubierto de pasto ubicado entre el borde del bosque y los cimientos de varios antiguos edificios de laboratorios. La estación se estableció en 1972 y fue la estación meteorológica original administrada por el STRI. Una estación más antigua establecida en 1929 y operada por la Autoridad del Canal de Panamá está ubicada cerca de la orilla del lago Gatún.

La estación El Claro registra la precipitación manual y electrónica (balde basculante), la temperatura y la humedad manuales y electrónicas, la presión barométrica electrónica, así como la evapotranspiración potencial manual (atmómetro EtGage). (Smithsonian Tropical Research Institute, 2024)

3.2 Caracterización de la zona de estudio

3.2.1 Cobertura boscosa

3.2.1.1 Estructura de la vegetación de Barro Colorado

Salvo algunas excepciones, la vegetación de Barro Colorado ha sido protegida de tala desde que la isla fue declarada reserva en 1923. En 1930, la mitad de la isla era bosque joven que crecía en áreas que fueron taladas en un pasado, mientras que el resto estaba cubierto por bosques mucho más antiguos (Enders, 1935). En bosques más jóvenes, una parcela de una hectárea contiene aproximadamente 110 especies representadas por tallos de más de 2,5 m de diámetro a la altura del pecho DAP (Lang, 1971). Tanto en bosques jóvenes como viejos, una hectárea contiene entre 50 y 65 especies de árboles de más de 20 cm de DAP (Milton, 1978; Thorington, 1982).

3.2.1.2 Altura del bosque de Barro Colorado

La altura del bosque no es uniforme según Bennett (1963), quien afirma que el estrato superior del bosque más antiguo tiene un promedio de 23 a 30 m de altura (la cifra inferior probablemente se refiere a la altura promedio de la parte inferior de las copas de los árboles), mientras que la capa superior de los bosques más jóvenes El bosque tiene un promedio de 23 a 30 m de altura.

Los diagramas de perfil de Knight (1963), muestran árboles de dosel en bosques más antiguos, en su mayoría de entre 30 y 40 m de altura, con emergentes ocasionales que se aproximan a los 50, y árboles de dosel en bosques más jóvenes, en su mayoría de entre 20 y 30 m, con ocasionales individuos acercándose a 40 m. Los árboles de los barrancos

tienden a ser más altos que los de las llanuras. El bosque alrededor de la torre en Lutz Creek, una zona de transición entre el bosque viejo y el joven tiene 34 m de altura.

Foster (1982) midió 146 árboles de *Tachigalia versicolor* (Leguminosae) al nivel del dosel en el bosque más antiguo; Oscilaban entre 20 y 47 m de altura, con una media de 33 m. Si se incluye la altura de regeneración en los claros de caída de árboles, la altura promedio del dosel en los bosques más viejos podría ser casi tan baja como la de los bosques más jóvenes.

3.2.1.3 Densidad y diversidad del bosque

Los bosques de la Isla Barro Colorado presentan una notable variación en la densidad de tallos y en la proporción de árboles grandes dependiendo de su antigüedad. En los bosques maduros, se encuentran entre 1,900 y 2,000 tallos por hectárea con un diámetro mayor a 2.5 cm a la altura del pecho (DAP), mientras que en los bosques más jóvenes esta densidad aumenta a 2,600-2,700 tallos por hectárea (Lang, 1971; Knight, 1975). En cuanto a árboles de mayor porte, es decir, aquellos con un DAP superior a 20 cm, los bosques jóvenes en maduración albergan aproximadamente 170 por hectárea, mientras que los bosques antiguos presentan cerca de 160 por hectárea, con una mayor proporción de ejemplares de gran tamaño (Lang, 1971; Thorington, 1982; Putz, 1982).

La flora de Barro Colorado abarca especies típicas de diversas zonas climáticas, lo que refleja la transición entre ambientes húmedos y secos. Según Croat (1978), especies como *Cespedezia macrophylla* (Ochnaceae), *Drypetes standleyi* (Euphorbiaceae), *Vantanea occidentalis* (Humiriaceae) y *Symphonia globulifera* son características de

bosques húmedos, mientras que especies como *Sterculia apetala* (Sterculiaceae), *Bombacopsis quinata* (Bombacaceae) y *Astronium graveolens* (Anacardiaceae) predominan en bosques secos. Algunas especies, como *Ceiba pentandra* (Bombacaceae), *Spondias mombin* (Anacardiaceae) y *Hura crepitans* (Euphorbiaceae), muestran una tolerancia climática más amplia, adaptándose a diversos gradientes.

Los registros paleobotánicos de los últimos 35,000 años obtenidos del área que ahora forma parte del Lago Gatún sugieren que el bosque de tierras bajas ha permanecido en la región desde entonces, a pesar de variaciones en las condiciones locales, como el cambio de manglares a pantanos de agua dulce en la cuenca baja del río Chagres (Bartlett, 1973).

En cuanto a la cronología de los bosques, se estima que los bosques jóvenes comenzaron a regenerarse hacia 1880, coincidiendo con la disminución del tráfico fluvial y ferroviario tras el auge de la fiebre del oro, y la actividad de construcción inicial del Canal de Panamá. Según los estudios históricos de (Kenoyer, 1929; Standley, 1933; Chapman, 1938), estos bosques probablemente se originaron en áreas previamente utilizadas para agricultura migratoria y pastoreo. Por otro lado, los bosques antiguos tienen una antigüedad estimada de entre 300 y 400 años, basándose en la comparación del tamaño y crecimiento de árboles como el *Dipteryx panamensis*, cuya tasa de incremento diametral sugiere una longevidad de hasta 500 años (Lang, 1971; Chapman, 1938).

3.2.2 Clima

El clima en Barro Colorado es marítimo tropical, caracterizado por estaciones bien definidas: una temporada húmeda de mayo a diciembre y una temporada seca de enero a abril. Las temperaturas medias mensuales presentan poca variación, con una temperatura media anual de 25,9 °C. Las temperaturas mensuales oscilan entre 25,2 °C y 26,6 °C.

La precipitación media anual es de 2645 mm (± 490 mm) y varía entre 1699 mm y 4487 mm. Durante la estación seca, la precipitación promedio es de 143 mm (± 229 mm), mientras que en la estación húmeda alcanza los 2522 mm (± 424 mm).

La evapotranspiración promedio diaria es de 3,6 mm/día ($\pm 0,3$ mm/día), alcanzando 5,2 mm/día en la estación seca y disminuyendo a 2,8 mm/día en la estación lluviosa. En promedio, el 34% de la precipitación anual registrada se transforma en escorrentía superficial, con valores que oscilan entre el 16% y el 53%.

Estudios realizados en la cuenca de captación del área, como el de Kinner (2004), han demostrado que una porción sustancial de la lluvia se infiltra hacia aguas subterráneas profundas. Estos modelos, que integran rutas de flujo de tormentas mediante análisis hidrológicos y geoquímicos, resaltan la importancia de la infiltración y el almacenamiento subterráneo en la dinámica hídrica del área.

3.2.3 Geología

3.2.3.1 Descripción de la Cuenca de la Quebrada Lutz

La cuenca de Lutz, con una extensión de 9.69 hectáreas y una forma aproximada de diamante, presenta una topografía variada. La mitad oriental de la cuenca está sustentada

por limolita rica en vidrio volcánico, con pendientes que alcanzan una longitud de aproximadamente 50 metros y un promedio de inclinación de 25°. Una estrecha cresta divide el drenaje en esta zona. Por su parte, la parte central-sur de la cuenca, situada entre los dos brazos principales del arroyo, tiene pendientes inferiores a 9° y está atravesada por numerosos canales.

En la mitad occidental de la cuenca, las laderas están compuestas principalmente de conglomerados y aglomerados basálticos, con pendientes promedio de 15° y longitudes superiores a 90 metros en muchas zonas. Esta área se caracteriza por la presencia de siete cicatrices de deslizamientos de tierra, que modifican drásticamente la topografía y el drenaje del suelo. Los suelos son ricos en arcilla, con una profundidad promedio de 50 cm sobre una sacrolita de conglomerado basáltico. En condiciones de humedad promedio del 40% en peso, la densidad aparente seca del suelo, basada en siete muestras, es de 0,8 g/cc, con una desviación estándar de 0,2 g/cc (Dietrich, 1982).

3.2.3.2 Características del Suelo en la Cuenca de la Quebrada Lutz

La cuenca combina facies marinas de la formación Caimito con laderas pronunciadas, lo que genera un suelo arcilloso pesado y poco profundo. Este suelo presenta un subsuelo predominantemente marrón o rojizo, con manchas hidromórficas grises y óxidos mezclados con fragmentos de roca gris oscuro y azulada parcialmente erosionada.

Según Yavitt (2024), el suelo en la región de la quebrada Lutz se clasifica como un Inceptisol según la Taxonomía de Suelos y como un Cambisol según el sistema WRB. Este tipo de suelo presenta altos niveles de calcio intercambiable (77 cmol kg⁻¹) y magnesio

intercambiable (13 cmol kg^{-1}), mientras que el potasio intercambiable, con $0,9 \text{ cmol kg}^{-1}$, es el más alto registrado en Barro Colorado.

Además, la combinación de drenaje deficiente en laderas poco profundas y menor intensidad de erosión (afectando aproximadamente el 20% del área) resulta en un suelo arcilloso de tipo expansivo con un tono pálido.

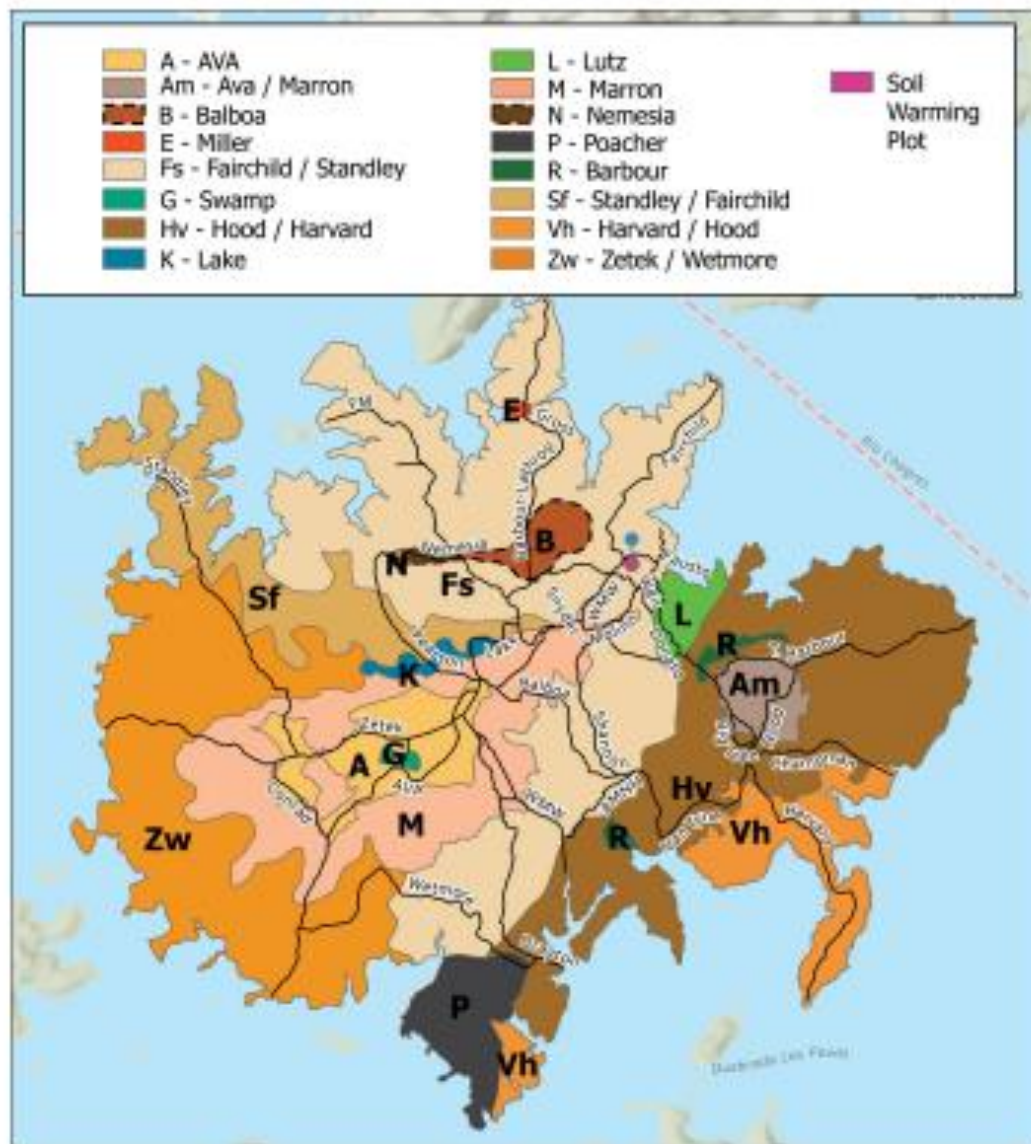


FIGURA 3. MAPA DE LA ISLA DE BARRO COLORADO DELIMITADO POR SENDEROS

Fuente: Yavitt (2024). Soils of Barro Colorado Island. Pag. 33.

3.2.4 Hidrología

El balance hídrico de la cuenca del arroyo Lutz, realizado por STRI se analizó considerando tres componentes principales: la entrada, el almacenamiento y la salida de agua. Para estimar el flujo de agua, se utilizó un registro gráfico del nivel del agua en un estanque con dimensiones aproximadas de 8 metros de largo, 6 metros de ancho y 1,5 metros de profundidad, ubicado detrás de un vertedero con muesca de 120 V. Este sistema permitió calcular el flujo estacional y comprender las dinámicas hídricas de la cuenca.

El almacenamiento de agua y la humedad del suelo se evaluaron mediante la recolección de muestras de los 5 cm superiores del suelo, utilizando una barrena de 2 cm de diámetro. Las muestras fueron pesadas antes y después del secado, lo que permitió determinar el contenido de humedad del suelo. Desde 1975, se tomaron cinco muestras pareadas de manera semanal a lo largo de un transecto de 10 metros en una ladera con una pendiente de 15°. Este sitio se seleccionó como índice representativo de los suelos de la cuenca (Dietrich, 1982).

La hidrología de la cuenca está fuertemente influenciada por la interacción entre los lechos de roca, el suelo y los organismos forestales. Para evaluar la formación del suelo y su relación con la hidrología, se consideraron las tasas de erosión química de la roca madre, determinadas en función de los factores climáticos, y la intensidad de la perturbación biológica, como la actividad de insectos excavadores y el crecimiento y extensión de las raíces de los árboles. Estas interacciones desempeñan un papel fundamental en la formación del manto delgado de suelo en la cuenca de la quebrada Lutz.

Durante la temporada de lluvias, las precipitaciones iniciales se infiltran en las grietas del subsuelo, generando una escorrentía superficial mínima. Sin embargo, cuando la lluvia persiste, se produce la saturación del suelo en la zona de raíces, dando lugar al flujo superficial saturado. Las mediciones indicaron que, a medida que los suelos se profundizan y las pendientes aumentan, la saturación del suelo y la frecuencia del flujo superficial se incrementan, destacando la importancia de estos procesos en las dinámicas hídricas de la cuenca.

Para evaluar la relación entre las limitaciones de almacenamiento de agua en el suelo y la actividad de los árboles, se analizó la caída de hojas en relación con el contenido de humedad del suelo. Una disminución crítica en la humedad del suelo, debido a la demanda de evapotranspiración, generó una caída pronunciada de hojas. La variación en la capacidad de agua disponible, influenciada por las características del lecho rocoso, la topografía y las tasas de formación y erosión del suelo, se correlacionó con diferencias en la composición de especies y la productividad de los árboles. Estas observaciones se complementaron con registros de árboles atrofiados en áreas específicas de la isla Barro Colorado (Leigh, 1982).

Los registros de descarga de los arroyos, junto con los datos meteorológicos, proporcionaron una visión general de la hidrología de la cuenca y la isla. Según Dietrich (1982), se requiere una medición más detallada de las laderas para definir cuantitativamente los procesos de escorrentía, sus controles y la variación espacial en los factores físicos y biológicos que influyen en estos procesos.

3.6. Análisis estadístico de datos de descarga y precipitación

3.6.1 Obtención de datos de descarga y escorrentía en la cuenca Lutz

La recopilación de datos en la cuenca Lutz se llevó a cabo mediante un sistema de monitoreo hidrológico y meteorológico detallado, diseñado para registrar información continua sobre la escorrentía, la precipitación y las condiciones ambientales.

La estación Lutz consta de un transecto meteorológico vertical a través del dosel forestal, equipado con sensores de temperatura y humedad ubicados a 1, 20, 42 y 48 metros de altura. En el nivel más alto de la torre, se instalaron sensores de radiación solar, un anemómetro y un atmómetro EtGage para registrar condiciones climáticas adicionales. Además, se realizan mediciones manuales de temperatura máxima y mínima, así como de humedad relativa al mediodía.

La escorrentía en la cuenca Lutz, que abarca 9.69 hectáreas en la ladera noreste de la isla Barro Colorado, se mide mediante un vertedero en forma de V con un ángulo de 120° ubicado cerca de la base de la torre Lutz. Este vertedero registra el flujo de la mayor parte del arroyo Lutz utilizando un medidor de flujo de burbujeo ISCO 3230.

Entre 1972 y 1996, los niveles de agua se midieron con un sistema compuesto por un pozo tranquilizador, un flotador y un registrador gráfico Stevens A-71 que generaba datos en papel. Desde 1996, sensores electrónicos han registrado el nivel del agua a intervalos de 5 minutos. En caso de fallos en los dispositivos electrónicos, se recurrió al respaldo de los registros gráficos, los cuales se digitalizaron manualmente mediante tabletas digitalizadoras y software especializado.

3.6.1.1 Procedimientos de mantenimiento y control de calidad

Para garantizar la precisión de los datos se realizan mediciones manuales del nivel del agua aproximadamente a las 9-10 a.m. durante días hábiles. Estas mediciones verificaron y ajustaron la calibración de los registradores electrónicos y gráficos. Los sedimentos acumulados en el estanque de amortiguación del vertedero se retiraron anualmente, generalmente en abril, cuando el caudal del arroyo estaba en su nivel más bajo. Las pérdidas de datos asociadas se estimaron a partir del caudal registrado antes y después de la limpieza. Los datos son analizados mediante software diseñado a medida utilizando herramientas como Python o Matlab con fórmulas estadísticas que permite identificar y corregir problemas comunes como acumulación de polvo, obstrucción del vertedero por vegetación o interrupciones menores en los registros.

3.6.1.2 Cálculo de la descarga

La descarga se calculó con las lecturas del Vertedero

$$\text{Descarga} = 122.612 \times \left(\frac{\text{nivel}}{304.8} \right)^{2.5}$$

3.6.2 Obtención de datos de precipitación en la estación El Claro

La medición de la lluvia en Barro Colorado Island (BCI) comenzó en 1925, inicialmente realizada por la Autoridad del Canal de Panamá (ACP) y, a partir de 1972, por

el Smithsonian Tropical Research Institute (STRI). La ACP continúa recopilando datos de lluvia hasta la actualidad.

Desde 1990, STRI ha utilizado baldes basculantes para medir la precipitación. La primera generación de estos instrumentos tenía una resolución de 2,54 mm (0,1”) y registraba la lluvia acumulada en intervalos de 15 minutos. En junio de 1983, la resolución cambió a 0,254 mm (0,01”) con un intervalo de registro de 1 minuto. En 1994, el intervalo de registro fue modificado a cada 5 minutos. En septiembre de 2019, se instaló un nuevo pluviómetro OTT Pluvio2 S, que mide la masa de precipitación corregida por la temperatura. Este sensor genera varias variables:

Salida en tiempo real: Proporciona datos de eventos de precipitación mayores a 0,1 mm/min dentro de un minuto de su ocurrencia.

Salida en tiempo no real: Ofrece resultados más precisos, generados cinco minutos después de la ocurrencia del evento.

El balde basculante de STRI en BCI siempre ha estado ubicado en el área conocida como El Claro, una zona abierta rodeada por árboles de hasta 20 m de altura. Actualmente, se utiliza el modelo TB3 de Servicios Hidrológicos, que se calibra al menos una vez al año según las especificaciones del fabricante.

3.7 Obtención y Preparación de Datos

Los datos empleados en este estudio se obtuvieron de la base de datos del Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (STRI), cubriendo registros de descarga y

precipitación en la Isla Barro Colorado desde 1972 hasta la fecha actual. Dado el gran tamaño de los datos, fue necesario dividirlos para su manejo efectivo. Este proceso de segmentación se realizó en Microsoft Excel, organizando los datos en múltiples hojas de cálculo, en rangos anuales, para facilitar su visualización y manipulación.

3.7.1 Limpieza y Validación de Datos

Una vez distribuidos, los datos fueron sometidos a un proceso de limpieza. Se eliminaron valores atípicos y datos con valores negativos en los registros de descarga y precipitación, ya que estos no son posibles físicamente y podrían sesgar los análisis posteriores. La limpieza se realizó mediante funciones de Excel, como IF y FILTER, para detectar y omitir registros no válidos.

3.7.2 Carga y Transformación en Power BI

Posteriormente, los datos se importaron a Power BI para su procesamiento y análisis avanzado. En esta etapa se llevaron a cabo transformaciones adicionales:

Formateo de Fecha y Texto: Asegurando la coherencia en los formatos de fecha, se unificaron los registros en un solo formato (“MM/DD/AAAA”), columnas que contenían datos numéricos y las columnas de textos se homogeneizaron en cuanto a, temporadas, tipos de fenómeno climático e intensidad.

Modelado con DAX: Se aplicaron fórmulas en DAX (Data Analysis Expressions) para realizar cálculos necesarios para la tesis, tales como el cálculo de promedios estacionales, acumulados anuales de descarga y precipitación, y el cálculo del coeficiente

de escorrentía en función de los datos de área de la cuenca. Esto permitió generar métricas personalizadas para el análisis detallado de tendencias.

3.7.3 Tablas y Gráficos en Excel

Una vez modelados los datos, se diseñaron visualizaciones en Power BI para analizar la variación de descarga y precipitación por temporadas, además de identificar años con eventos de El Niño y La Niña. Se exportaron las tablas a Excel y se realizaron gráficos de líneas para mostrar las tendencias anuales, gráficos de barras para la comparación de temporada seca y lluviosa, y gráficos de dispersión para correlacionar variables, destacando años Niño y Niña mediante códigos de color. Este proceso permitió estructurar los datos de manera eficiente, eliminando inconsistencias y estableciendo una base sólida para realizar el análisis cuantitativo y visual requerido en el estudio.

Para evaluar las relaciones entre precipitación y descarga en la Quebrada Lutz, se realizaron análisis gráficos y estadísticos utilizando Microsoft Excel primero organizando los datos previamente exportados de Power BI en columnas específicas para las variables independientes (precipitación) y dependientes (descarga).

Se crearon gráficos de dispersión para analizar la relación entre la precipitación y la descarga, ajustando una línea de tendencia lineal a los datos para cada temporada y anualmente. Como parte de este análisis, se calculó el coeficiente de determinación (R^2) para evaluar el grado de correlación entre ambas variables.

El coeficiente de determinación (R^2) es una medida estadística que indica la proporción de la variabilidad de una variable dependiente que puede ser explicada por la

variabilidad de una variable independiente a través del modelo de tendencia aplicado. Su valor varía entre 0 y 1, donde un valor cercano a 1 indica que el modelo explica la mayoría de la variabilidad observada en los datos, mientras que un valor cercano a 0 sugiere que el modelo tiene poca capacidad para explicar dicha variabilidad.

Para calcular el valor de R^2 , se utilizó la función COEF.DE.CORREL de Excel. Esta función calcula el coeficiente de correlación entre dos conjuntos de datos. Posteriormente, el coeficiente de correlación obtenido se elevó al cuadrado para derivar el coeficiente de determinación. Este procedimiento permite cuantificar de manera sencilla y directa la calidad del ajuste del modelo de tendencia lineal aplicado a los datos.

Para analizar las tendencias, se elaboraron gráficos combinados con barras para la precipitación y líneas para la descarga, diferenciando entre temporadas lluviosa y seca. Los datos se clasificaron según las condiciones de los eventos El Niño y La Niña, destacando años con intensidad fuerte, media y débil mediante colores específicos en las gráficas. Los valores atípicos y los datos inconsistentes fueron revisados visualmente y eliminados si no cumplían con los criterios establecidos. Se realizaron análisis adicionales para identificar diferencias significativas entre temporadas y años.

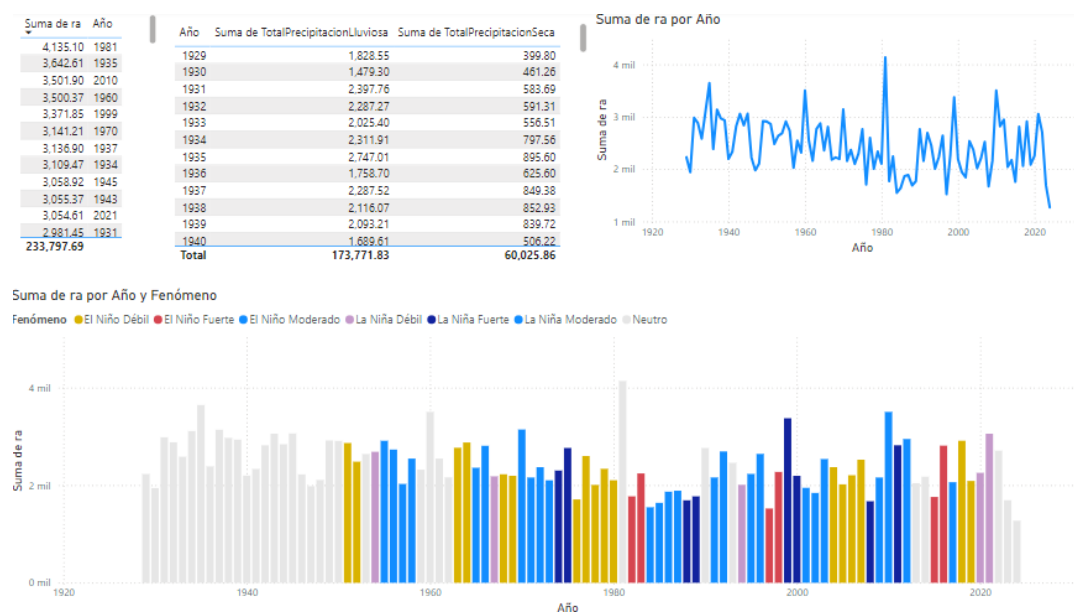


FIGURA 4. VISUALIZACIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN EN POWER BI

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de Datos

Para analizar el impacto del cambio climático en la descarga, se requirió la recolección de datos históricos a través de los registros de descarga desde el inicio del monitoreo hasta la actualidad.

Con esto se llevó a cabo el análisis estadístico utilizando Excel para evaluar las tendencias en la descarga y correlacionarlas con datos climáticos de precipitación.

Se importaron los datos en Power BI para transformar los datos recopilados. Generando tablas para crear visualizaciones gráficas interactivas y se exportaron las tablas en Excel para obtener la graficas que representan las tendencias a lo largo del tiempo.

Presentamos el rendimiento específico de descarga (L/s/km²) para analizar la eficiencia del escurrimiento en la cuenca de la quebrada Lutz y facilitar comparaciones con otros estudios. Luego, se muestran los valores absolutos en m³/min para evaluar la variabilidad temporal de la descarga.

Año	Descarga(l/seg/km2)
1972	14.03
1973	36.81
1974	30.93
1975	38.48
1976	10.11
1977	34.22
1978	20.83
1979	28.00
1980	18.40

1981	76.91
1982	13.62
1983	26.28
1984	36.93
1985	20.67
1986	17.74
1987	34.18
1988	33.19
1989	17.66
1990	38.68
1991	28.25
1992	44.65
1993	39.72
1994	25.69
1995	25.54
1996	51.84
1997	11.09
1998	29.63
1999	59.69
2000	30.04
2001	21.95
2002	39.12
2003	75.75
2004	67.89
2005	44.63
2006	65.72
2007	46.18
2008	14.64
2009	24.59
2010	63.22
2011	45.77
2012	40.42
2013	19.25
2014	19.68
2015	9.15
2016	37.91
2017	21.49
2018	44.60
2019	16.41
2020	37.36

2021	47.25
2022	34.80
2023	9.43
2024	7.36

CUADRO 1. RENDIMIENTO ESPECÍFICO DESCARGA(L/SEG/KM2).

4.1.1 Análisis de datos de descarga y escorrentía en Lutz

4.1.1.1 Variación de la descarga anual

El análisis de la variación de la descarga anual en la Quebrada Lutz permite identificar tendencias a lo largo del tiempo y evaluar la influencia de factores climáticos e hidrológicos en el régimen de escorrentía.

En la siguiente gráfica se presenta la evolución de la escorrentía y la descarga en la Quebrada Lutz desde 1972 hasta 2024, con el objetivo de visualizar posibles patrones de variabilidad interanual, cambios en la disponibilidad hídrica y la estabilidad del sistema hidrológico en el tiempo.

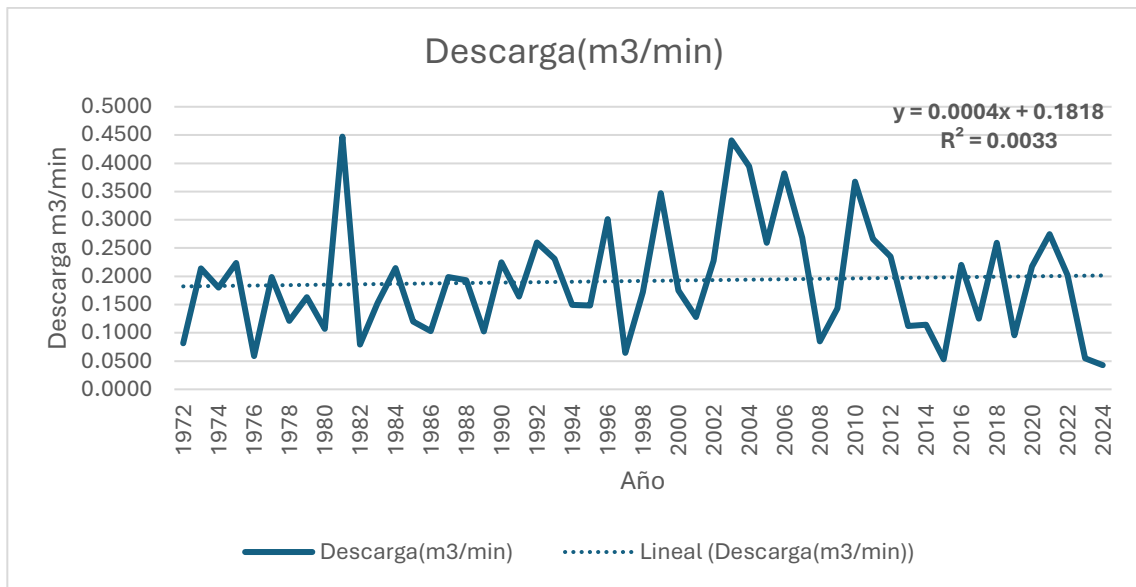


FIGURA 5. VARIACIÓN DE LA DESCARGA ANUAL EN LA QUEBRADA LUTZ (1972-2024)

Los valores de R^2 para descarga y escorrentía anual (0.0033) indican que las tendencias lineales o exponenciales no capturan la variabilidad de los datos, reflejando la influencia predominante de factores externos como la precipitación y eventos climáticos extremos. Esto sugiere que no hay una tendencia significativa en el tiempo, sino fluctuaciones interanuales causadas por variaciones naturales y climáticas.

Un R^2 cercano a 0 significa que la tendencia no se ajusta bien a los datos. Esto puede ocurrir si los datos presentan alta variabilidad año tras año o si existen patrones no lineales que la tendencia no está capturando.

4.1.1.2 Variación de la escorrentía anual

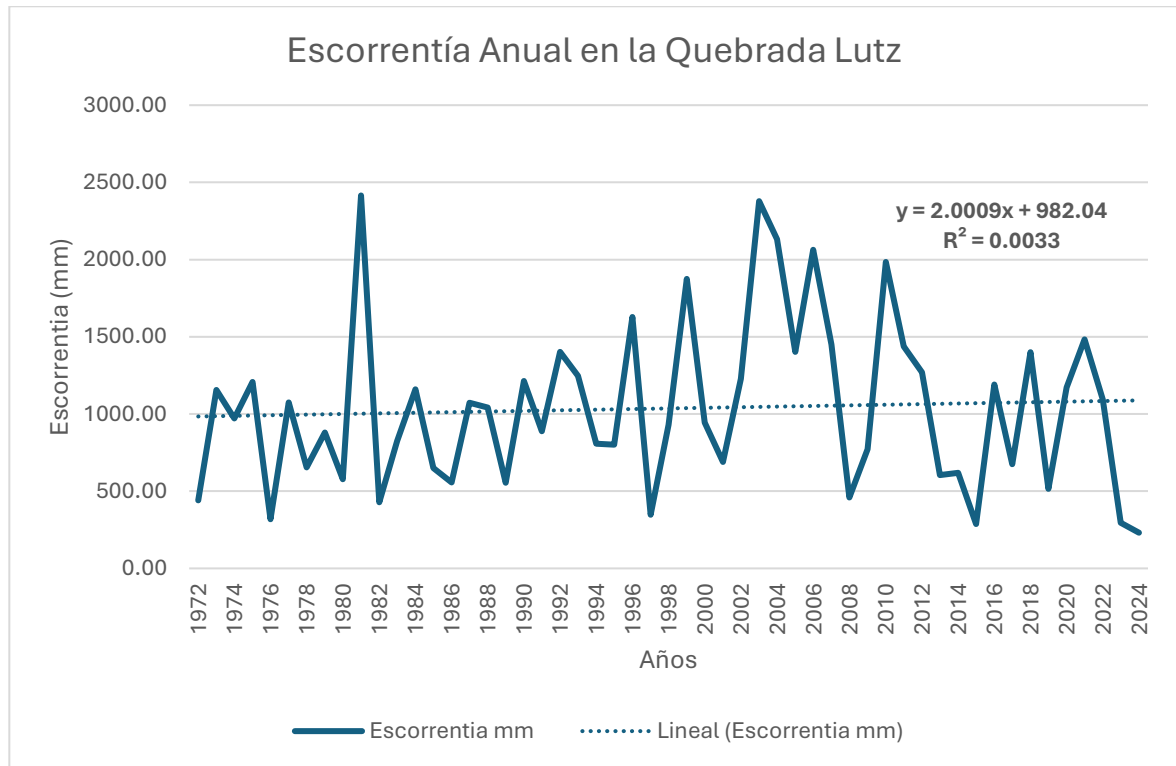


FIGURA 6. VARIACIÓN DE LA ESCORRENTÍA ANUAL

Un valor de $R^2 = 0.0033$ para la escorrentía tiene una interpretación similar al de la descarga.

Al igual que con la descarga, un $R^2 = 0.0033$ indica que la línea de tendencia explica muy poca de la variabilidad en los datos de escorrentía.

Este valor muy bajo sugiere que hay poca o ninguna correlación entre la escorrentía y el tiempo. Esto puede indicar que la escorrentía no está siendo afectada consistentemente por un solo factor o tendencia.

4.1.1.3 Variación de la descarga anual por temporada seca y temporada lluviosa

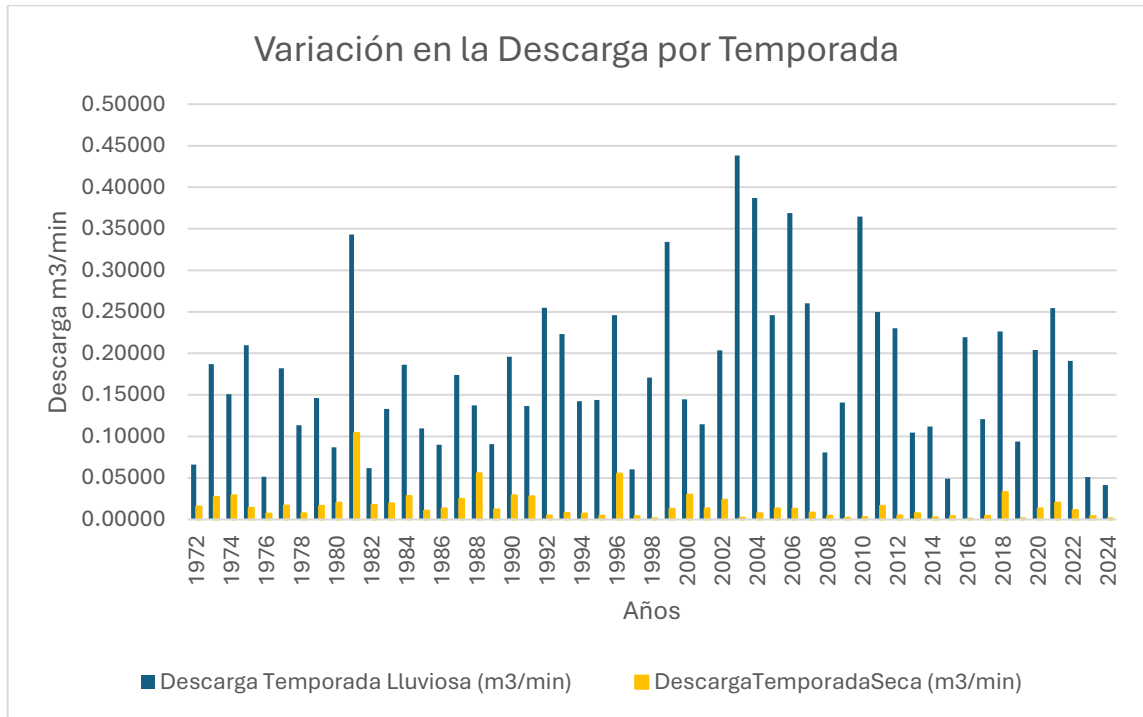


FIGURA 7. VARIACIÓN DE LA DESCARGA ANUAL POR TEMPORADA SECA Y TEMPORADA LLUVIOSA

El patrón general obtenido muestra que la descarga en la temporada lluviosa (representada en azul) es significativamente mayor que en la temporada seca (representada en amarillo) en casi todos los años. Esto es esperado en un clima tropical.

La variación anual muestra fluctuaciones notables en la descarga de la temporada lluviosa entre años. Algunos años, como 1980 y 2000, muestran picos de descarga más altos, lo que podría estar relacionado con eventos climáticos extremos como los años de eventos Niño.

Los años entre 2005 y 2015 parecen mostrar una disminución en la descarga, tanto en la temporada lluviosa como en la seca, lo que podría indicar una tendencia a la baja en

la disponibilidad de agua durante ese período. Esto podría estar asociado con variaciones en el régimen de precipitación o con cambios ambientales en la cuenca.

En cuanto a la diferencia entre temporadas se observa que la descarga en la temporada seca es consistentemente baja en todos los años, pero también varía, con ciertos años como 1982 y 2007 mostrando un ligero aumento en comparación con otros años. Estos cambios podrían reflejar efectos climáticos secundarios que incrementen la escorrentía incluso en temporada seca.

Estos pueden ser las explicados por las tendencias y cambio climático si los picos coinciden con los años de eventos Niño/Niña que presentaremos.

4.1.1.4 Tendencia de descarga y escorrentía por temporada

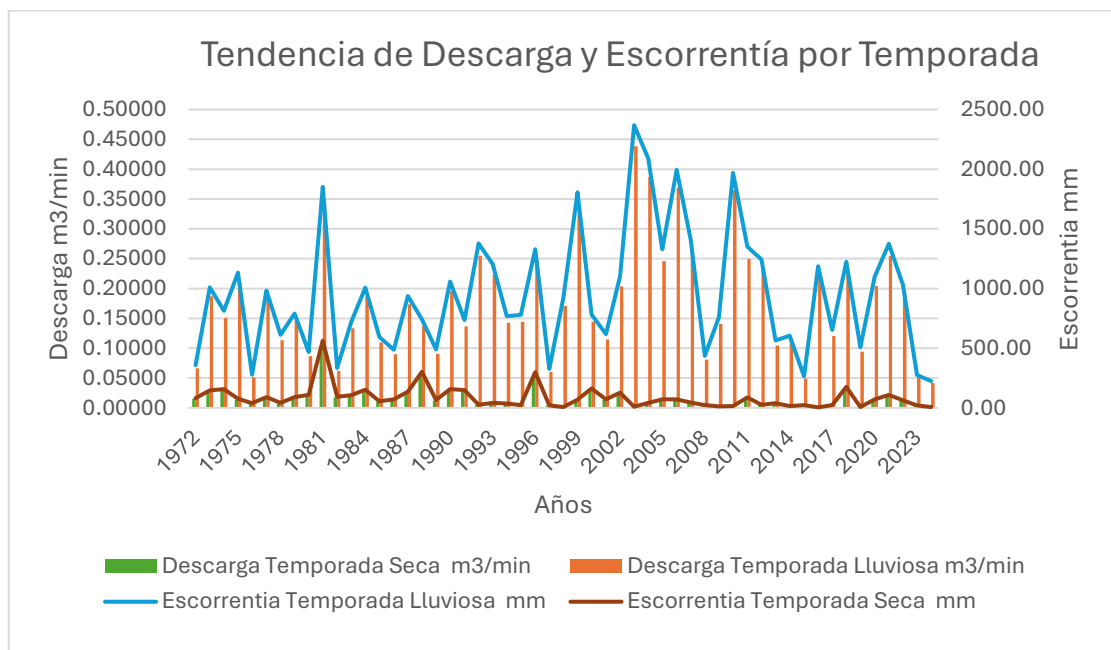


FIGURA 8. TENDENCIA DE DESCARGA Y ESCORRENTÍA POR TEMPORADA

El gráfico muestra la tendencia de descarga y escorrentía por temporada (lluviosa y seca), lo cual permite observar la relación entre la precipitación y la respuesta de la cuenca en términos de flujo de agua.

Si comparamos las temporadas vemos que la descarga y la escorrentía en la temporada lluviosa (líneas azules y barras naranjas) son significativamente más altas que en la temporada seca (líneas rojo vino y barras verde) a lo largo del período analizado, lo que refleja la estacionalidad climática típica de Panamá.

La escorrentía y descarga en la temporada seca son relativamente bajas y estables, lo que indica una limitada respuesta hídrica debido a la menor precipitación en esta época.

Se observan picos de descarga y escorrentía en años específicos (1982, 1997, 2000, 2010) relacionados con eventos Niño/Niña, mientras que los valores en años neutros tienden a estabilizarse. En contraste, la temporada seca muestra descargas bajas y estables, con ligeras fluctuaciones en ciertos años.

En cuanto a las tendencias en el tiempo vemos que, a lo largo del tiempo, hay una aparente disminución en los picos de descarga y escorrentía después del año 2010, lo que podría reflejar una posible disminución en la precipitación o cambios en las características de la cuenca que afectan su respuesta hidrológica. Los picos de escorrentía y descarga en la temporada lluviosa parecen ser más pronunciados en las primeras décadas (1980-2000) en comparación con las más recientes, lo cual puede ser relevante para el análisis de tendencias de cambio climático y su efecto en la disponibilidad hídrica.

La correlación entre escorrentía y descarga es clara en la temporada lluviosa cuando la escorrentía es alta, la descarga también lo es, lo que indica una respuesta directa a las precipitaciones. Esta relación es más tenue en la temporada seca, donde la descarga permanece baja y constante sin importar las pequeñas variaciones en la escorrentía.

Además, los suelos tropicales de la Isla Barro Colorado, con alta densidad de raíces y actividad biológica, desempeñan un papel clave en la infiltración y regulación del agua. Robert F. Stallard (1999) documenta que los macroporos asociados con raíces densas son fundamentales para la infiltración de agua en los suelos arcillosos de la cuenca de la quebrada Lutz. Sin embargo, en periodos de lluvias prolongadas, la saturación del suelo puede reducir la efectividad de estos macroporos, favoreciendo el flujo superficial.

Tomando en cuenta los resultados que obtuvimos en las graficas tanto anuales como por temporada se evidencia la variabilidad interanual de la descarga y esorrentía en la Quebrada Lutz de la Isla Barro Colorado. A nivel anual, se observan fluctuaciones significativas en los volúmenes de descarga, lo cual puede asociarse tanto a la variabilidad natural del régimen de precipitación como a la influencia de eventos climáticos extremos como lo son El Niño y La Niña.

Si analizamos la variabilidad interanual (entre años) vemos que los resultados anuales muestran picos de descarga y esorrentía asociados a años con fenómeno climáticos extremos, especialmente durante El Niño fuerte (1982-83,1997-98) y La Niña fuerte (2010-11). En estos años, los patrones de precipitación se alteran significativamente, lo que lleva a incrementar en los años de La Niña y disminuir en los años de El Niño en los valores de descarga. Sin embargo, en años neutros o con fenómenos de menor intensidad, los valores tienden a estabilizarse sin presentar cambios abruptos.

En la temporada seca, los datos reflejan disminución en la magnitud de las descargas debido a la menor precipitación en este periodo, pero en años Niño fuerte, se evidencia una reducción aún más marcada de la descarga. Por otro lado, en la temporada

lluviosa, se observan incrementos significativos de descarga y escorrentía durante eventos de La Niña fuerte o moderado, lo cual coincide con mayores precipitaciones características de este fenómeno.

A nivel estacional, se evidencian diferencias entre la temporada seca y lluviosa. En la temporada lluviosa se presentan mayores volúmenes de descarga y escorrentía lo que coincide con un aumento de la precipitación acumulada. Por el contrario, en la temporada seca se muestra una disminución marcada con valores bajos de descarga. Esto resalta el carácter estacional del sistema hidrológico de la Quebrada Lutz.

A pesar de las fluctuaciones anuales, no se observa una tendencia ascendente o descendente sostenida en la magnitud de las descargas y la escorrentía a lo largo del periodo de estudio. A pesar de las proyecciones globales de aumento de escorrentía debido al cambio climático, los datos en la quebrada Lutz podrían sugerir que en la Isla Barro Colorado donde la cobertura vegetal permanece intacta, los efectos del cambio climático sobre el ciclo hidrológico podrían estar siendo amortiguados por la vegetación y la capacidad del suelo para retener agua.

4.1.2 Análisis de datos de Precipitación y Descarga

4.1.2.1 Correlación entre los datos de Precipitación y Descarga anual

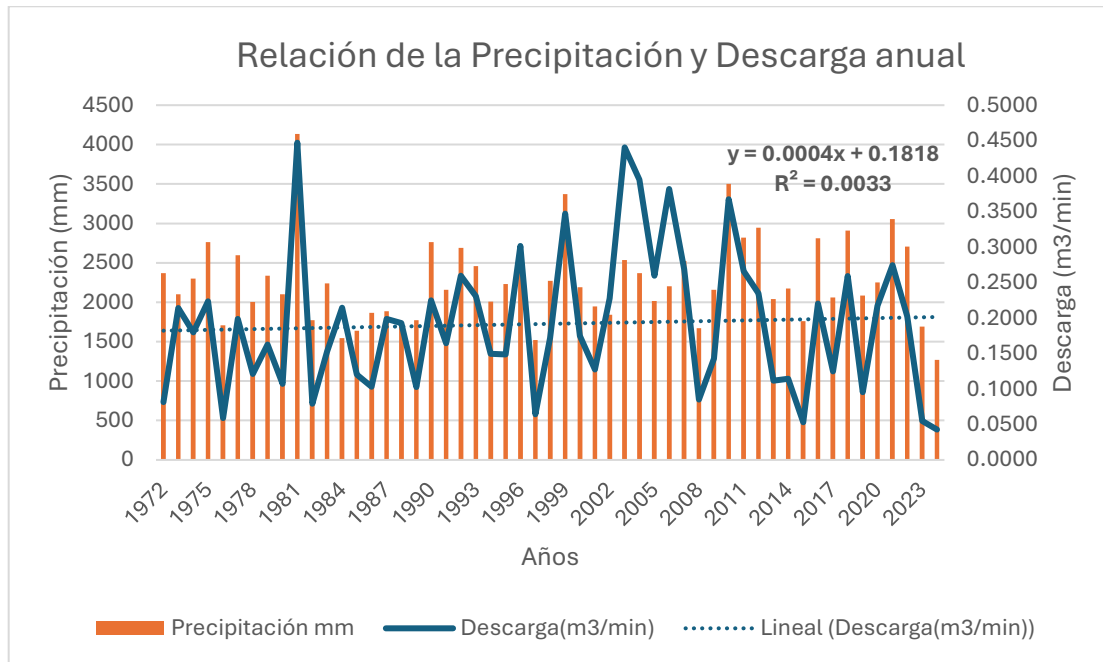


FIGURA 9. CORRELACIÓN ENTRE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN Y DESCARGA ANUAL

El valor $R^2 = 0.0033$ indica que la línea de tendencia explica solo el 0.33% de la variabilidad en la descarga en función de la precipitación. Esto sugiere que la precipitación en El Claro no es el único factor que influye en la descarga en Lutz, y que existen otras condiciones locales que también desempeñan un papel importante.

El coeficiente de correlación de 0.73 indica una correlación positiva moderada a fuerte entre los valores de precipitación y descarga. Aunque este coeficiente es relativamente alto, lo que sugiere que cuando la precipitación aumenta, la descarga tiende a aumentar también, la relación no es lo suficientemente fuerte como para ser explicada completamente por un modelo lineal, lo que explica el bajo R^2 .

Estos resultados pueden estar influenciados por la cobertura vegetal de la Isla Barro Colorado, la cual regula la infiltración y la escorrentía del agua. En muchas regiones del mundo, el cambio climático ha provocado un aumento en la escorrentía y en los caudales de los ríos debido a la intensificación del ciclo hidrológico Müller (2024). Según este estudio, a nivel global se ha proyectado un aumento del 6% en la escorrentía debido a un incremento en la precipitación y la evapotranspiración. Sin embargo, en la Quebrada Lutz, la densa cobertura boscosa puede estar modulando estos efectos, favoreciendo la infiltración y ralentizando el escurrimiento superficial.

Además, el tipo de suelo juega un papel fundamental en la infiltración y almacenamiento del agua, al igual que las condiciones climáticas adicionales, como la evapotranspiración y la intensidad de las lluvias. Estos factores pueden explicar por qué, a pesar de la correlación positiva entre precipitación y descarga, la variabilidad de la descarga no es explicada en su mayoría por la precipitación.

4.1.2.2 Correlación entre los datos de Precipitación y Descarga en Temporada Lluviosa

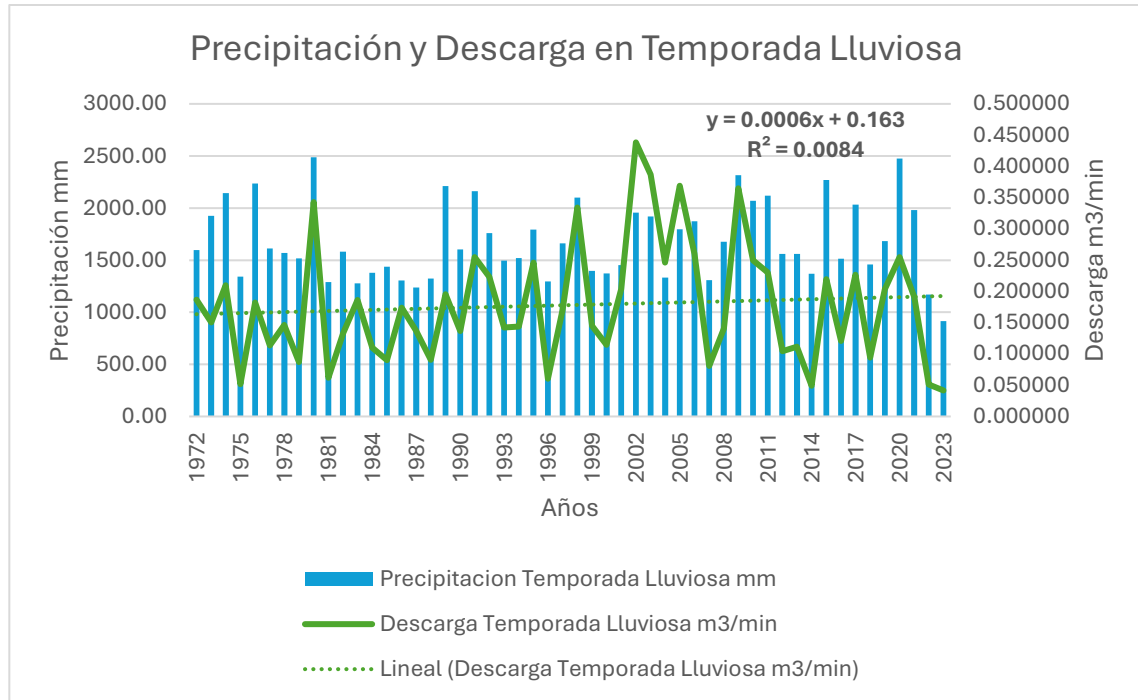


FIGURA 10. CORRELACIÓN ENTRE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN Y DESCARGA EN TEMPORADA LLUVIOSA

La precipitación y descarga en temporada lluviosa nos da un valor de $R^2 = 0.0084$, lo que muestra que solo el 0.84% de la variabilidad en la descarga puede explicarse por la precipitación, indicando que otros factores, aparte de la precipitación, están influyendo significativamente en la descarga durante la temporada lluviosa.

Mientras que el coeficiente de correlación 0.705 indica que existe una correlación positiva moderada-alta, lo que sugiere que, en general, cuando la precipitación aumenta, la descarga también tiende a aumentar, aunque no de manera estrictamente lineal o completamente predecible.

4.1.2.3 Correlación entre los datos de Precipitación y Descarga en Temporada Seca

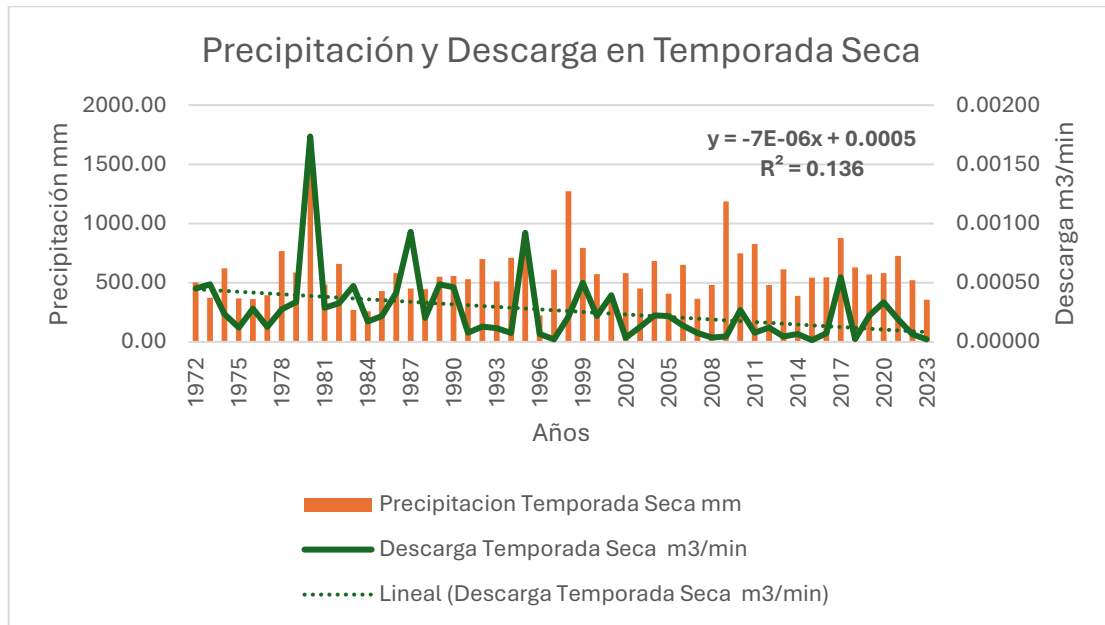


FIGURA 11. CORRELACIÓN ENTRE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN Y DESCARGA EN TEMPORADA SECA

En la temporada seca, la relación entre precipitación y descarga muestra un valor de $R^2 = 0.136$, lo que indica que solo el 13.6% de la variabilidad en la descarga puede explicarse por la precipitación. Aunque este valor es mayor que en la temporada lluviosa, sigue siendo relativamente bajo, lo que sugiere que otros factores influyen en la descarga durante este período.

El coeficiente de correlación de 0.1623 indica una correlación positiva muy débil entre la precipitación y la descarga. Esto significa que, aunque la descarga puede aumentar levemente con la precipitación, la relación es bastante tenue y no es completamente predecible. Por otro lado, la pendiente negativa en la ecuación de regresión ($y = -7E-06x + 0.0005$) podría deberse a la baja cantidad de precipitación durante esta temporada, lo que genera una relación más débil y posiblemente influenciada por otros procesos hidrológicos.

Estos resultados refuerzan la idea de que la precipitación no es el único factor determinante en la descarga de la Quebrada Lutz, y que variables como la capacidad de infiltración del suelo, la humedad previa en el terreno y la retención de agua en la cobertura vegetal juegan un papel clave en la regulación del flujo durante la temporada seca.

4.1.2.4 Análisis de la Relación entre los datos de Precipitación y Descarga anual por Temporada seca y lluviosa

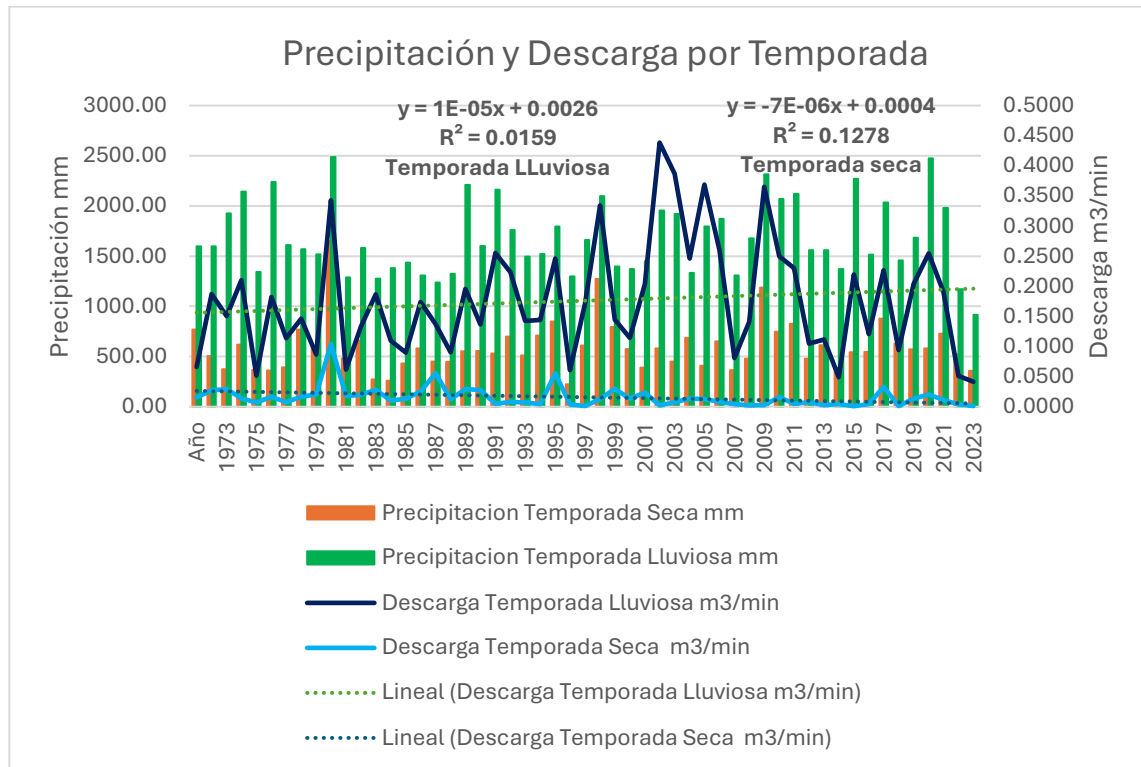


FIGURA 12. RELACIÓN ENTRE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN Y DESCARGA ANUAL POR TEMPORADA SECA Y LLUVIOSA

En la gráfica que analiza en conjunto ambas temporadas, la línea de tendencia lineal en la temporada lluviosa muestra una leve tendencia al alza en la descarga, con un valor de $R^2 = 0.0159$, lo que indica que solo el 1.59% de la variabilidad en la descarga puede explicarse por la precipitación. Este valor bajo sugiere que otros factores, además de la

precipitación, juegan un papel importante en la regulación del caudal durante esta temporada.

La precipitación en la temporada lluviosa muestra una gran variabilidad entre años, con algunos picos notables, lo que podría indicar años con lluvias más intensas. En contraste, la precipitación en la temporada seca presenta menor variabilidad y es más constante a lo largo del tiempo.

Se observa que algunos picos de precipitación coinciden con aumentos en la descarga, como en los años 1982 y 2016, lo que sugiere que años con precipitaciones más altas, especialmente en la temporada lluviosa, generan mayores descargas. Sin embargo, no todos los aumentos en la descarga corresponden directamente a picos de precipitación, lo que indica que otros factores hidrológicos están modulando la relación entre estas variables.

El análisis de las gráficas de correlación entre precipitación y descarga muestra diferencias importantes en la relación dependiendo del enfoque anual o por temporada. En términos anuales, la correlación directa entre precipitación y descarga muestra un valor bajo de R^2 , lo que sugiere que, si bien la precipitación sigue siendo un factor clave en la generación de escorrentía, la relación no es completamente lineal ni uniforme a lo largo del tiempo.

Cuando se analiza la correlación por temporada, los valores de R^2 son considerablemente bajos, con $R^2 = 0.0159$ para la temporada lluviosa y $R^2 = 0.1278$ para la temporada seca. Esto indica que, aunque la precipitación es un factor fundamental en la generación de descarga, otros elementos, como las condiciones del suelo, la cobertura

vegetal y el almacenamiento de agua en la cuenca, pueden estar modulando la respuesta hidrológica de la Quebrada Lutz.

Entre los factores que influyen en estos resultados se encuentra la capacidad de absorción del suelo. Durante la temporada seca, la baja humedad en el suelo puede limitar la generación de escorrentía, mientras que, en la temporada lluviosa, la saturación del suelo puede favorecer la descarga de una manera no completamente lineal. Además, la densa vegetación de la Isla Barro Colorado actúa como un amortiguador natural, interceptando la precipitación y regulando la escorrentía. Durante eventos de lluvias extremas, esta vegetación puede retrasar la descarga al almacenar temporalmente el agua, lo que contribuye a la complejidad del sistema hidrológico de la cuenca.

En ambas temporadas, la combinación de precipitación, estructura del suelo y cobertura vegetal influye en la relación entre precipitación y descarga. La vegetación desempeña un papel clave en la retención y liberación gradual del agua, y la estructura del suelo con alta densidad de macroporos generados por raíces favorece la infiltración en períodos secos y su saturación en períodos de lluvias prolongadas.

4.1.3 Análisis de datos de descarga en Lutz y datos de precipitación en El Claro

según Fenómenos del niño y la niña por intensidad del evento anual

4.1.3.1 Registros de fenómenos de Niño y Niña, según NOAA en la región desde 1971 hasta la Actualidad.

A continuación, se detallan los años en que se registraron eventos de El Niño y La Niña, clasificados según su intensidad, de acuerdo con la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA):

Registros de fenómenos de Niño y Niña, según NOAA		
Tipo de Fenómeno	Años	Intensidad
La Niña	1971-1972	Débil
El Niño	1972-1973	Moderado
La Niña	1973-1974	Fuerte
La Niña	1974-1975	Débil
La Niña	1975-1976	Fuerte
El Niño	1976-1977	Débil
El Niño	1977-1978	Débil
El Niño	1979-1980	Débil
El Niño	1982-1983	Fuerte
La Niña	1983-1984	Débil
La Niña	1984-1985	Moderado
El Niño	1986-1987	Moderado
La Niña	1988-1989	Fuerte
El Niño	1991-1992	Moderado
La Niña	1994-1995	Débil
La Niña	1995-1996	Moderado
El Niño	1997-1998	Fuerte
La Niña	1998-1999	Fuerte
La Niña	1999-2000	Fuerte
La Niña	2000-2001	Moderado
El Niño	2002-2003	Moderado
El Niño	2004-2005	Débil
La Niña	2005-2006	Débil
El Niño	2006-2007	Débil

La Niña	2007-2008	Fuerte
La Niña	2008-2009	Débil
El Niño	2009-2010	Moderado
La Niña	2010-2011	Fuerte
La Niña	2011-2012	Moderado
El Niño	2015-2016	Fuerte
La Niña	2016-2017	Débil
La Niña	2017-2018	Moderado
El Niño	2018-2019	Débil
La Niña	2020-2021	Débil

CUADRO 2. REGISTROS DE FENOMENOS DE EL NIÑO Y LA NIÑA, SEGUN NOAA

4.1.3.2 Relación entre los datos de Precipitación y Descarga anual en BCI según Fenómeno del Niño y la Niña por intensidad

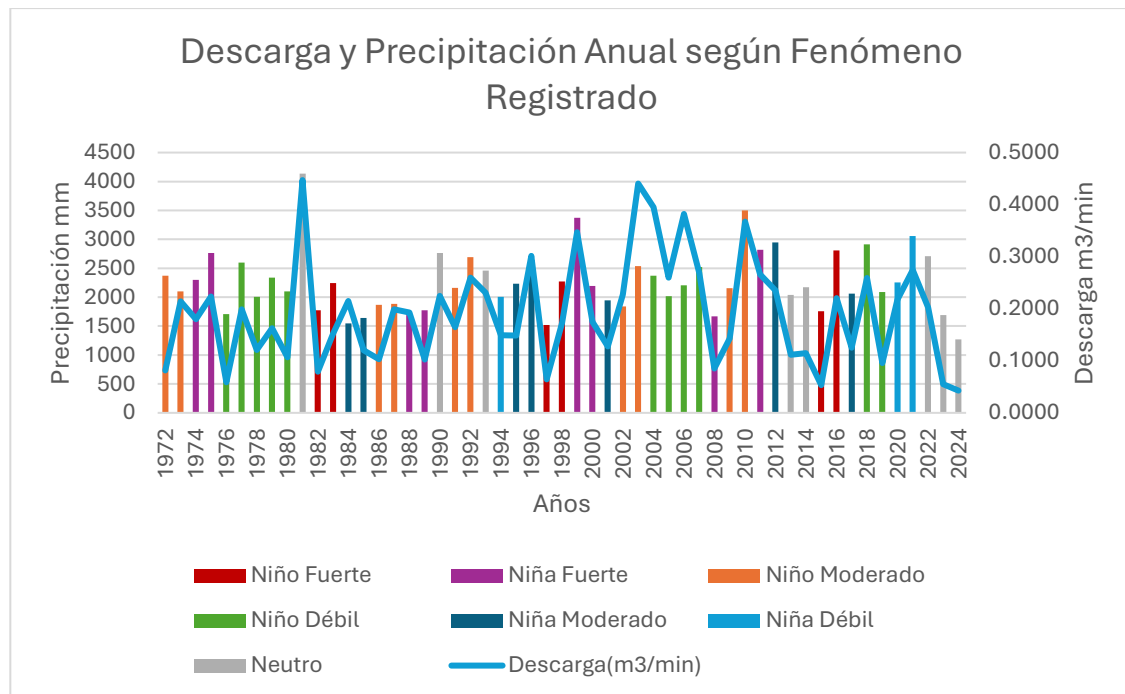


FIGURA 13. RELACIÓN ENTRE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN Y DESCARGA ANUAL EN BCI SEGÚN FENÓMENO DEL NIÑO Y LA NIÑA POR INTENSIDAD

La relación entre la Descarga y fenómenos registrados se observa que la descarga varía considerablemente entre años, y estas variaciones parecen estar asociadas con la intensidad de los fenómenos de El Niño y La Niña.

Fenómeno de El Niño: Años con El Niño fuerte o moderado (barras rojas y naranjas) tienden a mostrar descargas más bajas en la mayoría de los casos. Esto se debe a que El Niño suele asociarse con condiciones más secas en muchas regiones, lo que reduce la precipitación y, en consecuencia, la descarga.

Fenómeno de La Niña: Años de fenómeno de La Niña fuerte o moderada (barras moradas y azul oscuro) tienden a coincidir con descargas altas, especialmente en años como 1982 y 2010, cuando hubo picos en la descarga. La Niña suele traer condiciones más lluviosas, lo cual aumenta la descarga.

Años Neutros: En años neutros (barras grises), la descarga muestra una variabilidad considerable, pero generalmente parece mantenerse en valores intermedios, sin picos extremos hacia arriba o abajo excepto en el año 1981.

En general a lo largo del tiempo, se observan ciclos de alta y baja descarga que coinciden en gran medida con la alternancia entre los fenómenos de El Niño y La Niña. Sin embargo, los picos extremos tienden a estar más asociados con eventos de La Niña.

No se observa una tendencia lineal o progresiva en los datos de descarga; en cambio, estos parecen responder principalmente a las condiciones interanuales de los fenómenos climáticos.

Los fenómenos de El Niño y La Niña juegan un papel significativo en las variaciones de la descarga y precipitación anual. Años de La Niña, especialmente en su fase fuerte, generalmente traen mayores descargas debido al incremento de la precipitación, mientras que El Niño tiende a reducir la descarga al asociarse con condiciones secas.

La alternancia entre estos fenómenos es clave para entender los patrones de descarga en la región, y su análisis puede ser útil para prever periodos de abundancia o escasez de agua en función de las previsiones climáticas.

La gráfica indica que los fenómenos de El Niño y La Niña influyen directamente en los niveles de descarga y precipitación, mostrando cómo estos eventos cíclicos afectan la disponibilidad de agua año con año.

4.1.3.3 Análisis de Cambios de la Descarga y Precipitación en BCI en la temporada seca

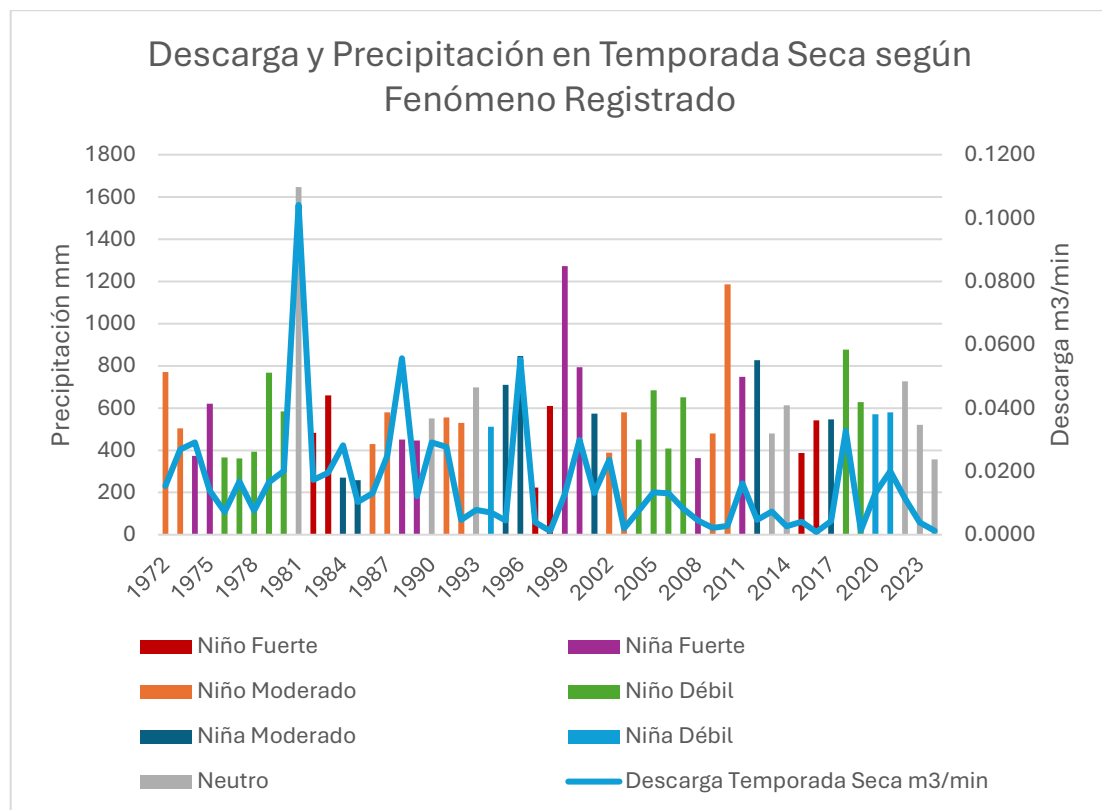


FIGURA 14. DESCARGA Y PRECIPITACIÓN EN BCI EN LA TEMPORADA SECA

La relación que se aprecia entre los Fenómenos Climáticos y la Descarga durante algunos eventos de Niño fuerte y moderado como ejemplo alrededor de 1983 y 1998, es

que hay picos notables en la descarga, indicando que estos eventos pueden aumentar la descarga en la temporada seca, posiblemente debido a precipitaciones inusualmente altas en esos años.

Mientras que en los eventos Niña también muestran variabilidad, pero en algunos casos como en 1976, no parecen tener un efecto tan marcado en la descarga como los eventos de Niño.

En cuanto a el impacto en la precipitación vemos que durante eventos de Niño suele ser más alta, como se observa en los picos de las barras de colores relacionadas con Niño fuerte y moderado. Esto podría sugerir que el fenómeno de El Niño tiene un impacto importante en la cantidad de lluvia incluso en la temporada seca, lo que contribuye a una mayor descarga.

Mientras que en los años considerados como Neutros presentan variabilidad en la precipitación y la descarga, pero sin los picos tan pronunciados que se observan en los años de Niño o Niña, sugiriendo que la variación es más estable cuando no ocurren estos fenómenos.

En la Temporada Seca, aunque hay fluctuaciones año a año, se observa que en la temporada seca la descarga generalmente se mantiene baja, salvo en los años con fenómenos intensos de Niño. Esto indica que la descarga es típicamente baja en esta temporada, salvo cuando los fenómenos climáticos extremos alteran el patrón.

La gráfica podría sugerir que los eventos extremos asociados con Niño o Niña tienen un efecto visible en la precipitación y la descarga en la temporada seca, lo cual es

coherente con el impacto del cambio climático, que se espera aumente la frecuencia e intensidad de estos eventos.

En general, aunque los eventos extremos asociados con Niño o Niña pueden modificar la descarga en la temporada seca, la combinación de suelo estructuralmente intacto, alta infiltración y almacenamiento subterráneo profundo ayuda a regular la respuesta hidrológica. Este análisis es clave para entender cómo los patrones climáticos extremos afectan la dinámica hidrológica en la Isla Barro Colorado y la importancia de continuar con estudios a largo plazo mediante instrumentos como piezómetros y pozos de observación del nivel freático, que permitirían evaluar con mayor precisión el comportamiento del agua subterránea y su influencia en el flujo base de la quebrada.

4.1.3.4 Análisis de Cambios de la Descarga y Precipitación en BCI en la temporada lluviosa

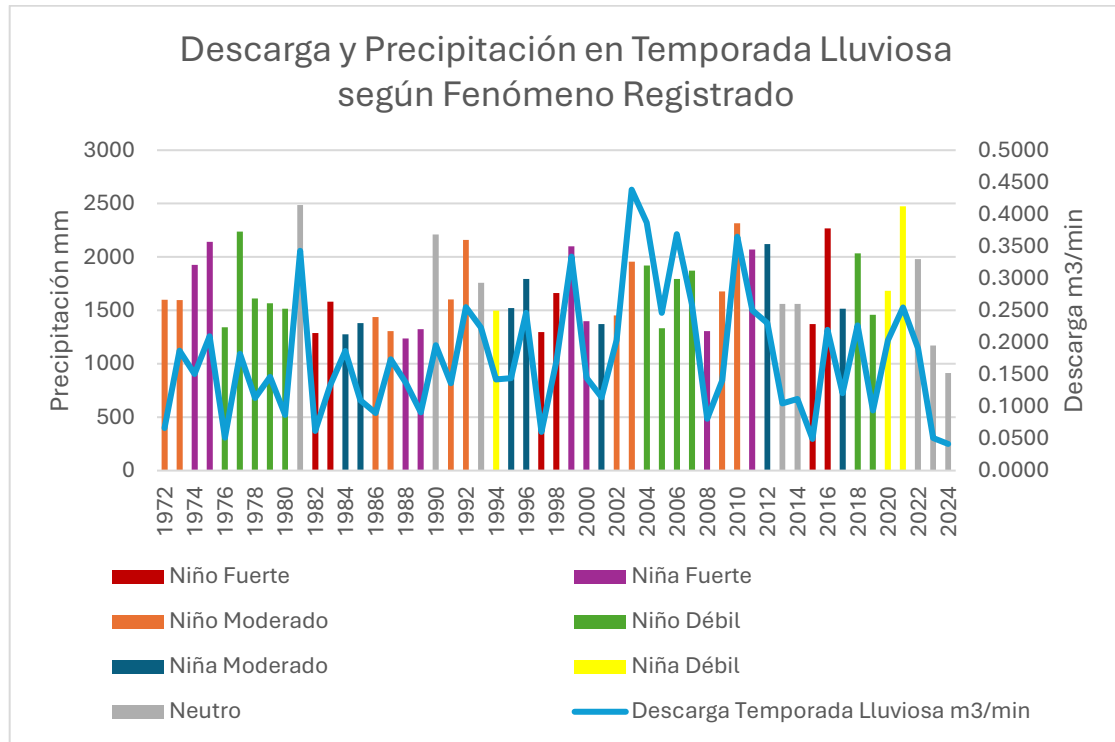


FIGURA 15. DESCARGA Y PRECIPITACIÓN EN BCI EN LA TEMPORADA LLUVIOSA

Durante la temporada lluviosa, la descarga es naturalmente más alta en comparación con la temporada seca, y esto se refleja en la línea de descarga (azul). Sin embargo, se observan variaciones notables según el tipo e intensidad del fenómeno climático.

En los años de Niño fuerte (por ejemplo, 1997-1998), la descarga parece mantenerse elevada, lo cual podría indicar que el fenómeno de El Niño contribuye a aumentos en la precipitación, aunque no siempre se traduce en un incremento significativo en la descarga durante esta temporada. Esto sugiere que además de la cantidad de lluvia, la

infiltración y el almacenamiento de agua en el suelo juegan un papel clave en la regulación del escurrimiento superficial. Dietrich (1982) estimó que el flujo superficial de saturación representa aproximadamente el 20% del escurrimiento total en la cuenca de la quebrada Lutz, lo que implica que una parte importante de la precipitación se infiltra o se almacena temporalmente en el suelo antes de contribuir a la descarga.

Por otro lado, estudios de Kursar (1995) en suelos montmorilloníticos de la isla indican que, a medida que avanza la temporada húmeda, la estructura del suelo se deteriora y las vías de flujo en el suelo se reducen, lo que podría limitar la capacidad de infiltración y favorecer una mayor escorrentía superficial en eventos de lluvia intensa.

La precipitación es alta durante eventos de Niña fuerte y moderada (por ejemplo, 1988 y 2011), lo que sugiere que La Niña puede aumentar la lluvia en la temporada lluviosa. Esto podría estar asociado con mayores volúmenes de agua y, por ende, con mayores tasas de escorrentía que alimentan la descarga.

Los años Neutros muestran una variabilidad considerable tanto en precipitación como en descarga, indicando que la ausencia de fenómenos como Niño o Niña no necesariamente implica un comportamiento estable en la descarga y la precipitación.

La gráfica sugiere que los eventos de Niña tienden a estar asociados con aumentos en la precipitación y la descarga durante la temporada lluviosa, mientras que El Niño tiene un impacto más variable. Esto no solo depende de la cantidad de lluvia, sino también de la interacción con el suelo y la vegetación, que regulan la infiltración y almacenamiento temporal del agua. La vegetación y la estructura del suelo parecen jugar un papel clave en

evitar aumentos extremos en la escorrentía, lo que podría explicar la ausencia de tendencias marcadas en la descarga.

A lo largo del tiempo, se puede observar una tendencia general de variabilidad en la descarga, con algunos picos notables que coinciden con fenómenos climáticos extremos. Esto refleja cómo la temporada lluviosa es afectada no solo por la cantidad de precipitación, sino también por la capacidad del suelo y la vegetación de absorber o canalizar el agua en la Isla Barro Colorado.

Esta gráfica es útil para analizar cómo los fenómenos climáticos extremos, posiblemente exacerbados por el cambio climático, pueden influir en los patrones de precipitación y descarga en la temporada lluviosa. La variabilidad observada en los últimos años podría indicar un patrón de alteración en el régimen hidrológico de la región, lo que es relevante para estudiar el papel del cambio climático.

La gráfica muestra que los fenómenos de La Niña en general tienden a aumentar la precipitación y la descarga durante la temporada lluviosa, mientras que El Niño tiene un efecto más variable. La gráfica es útil para identificar cómo los patrones climáticos afectan la dinámica hidrológica en temporadas lluviosas, lo que es relevante para analizar la influencia de eventos extremos y el cambio climático en la Isla Barro Colorado.

Estos resultados muestran que la Quebrada Lutz mantiene un comportamiento relativamente estable, incluso en eventos climáticos extremos. La integridad del ecosistema y la ausencia de deforestación parecen amortiguar los impactos más severos que podrían esperarse en sistemas alterados por actividades humanas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Los resultados representan variabilidad en la descarga y la escorrentía en la Quebrada Lutz de la Isla Barro Colorado respondiendo principalmente a la precipitación y a la influencia de eventos climáticos extremos como el Niño y la Niña. Sin embargo, la ausencia de una tendencia marcada sugiere una estabilidad en la dinámica hidrológica de la cuenca, posiblemente debido a la cobertura vegetal y la estructura del suelo, que regulan la infiltración y el almacenamiento del agua en el perfil edáfico (Stallard, 1999).
2. Los fenómenos Niño y Niña afectan de manera diferente la descarga y la escorrentía en las temporadas seca y lluviosa. Los resultados son consistentes con estudios previos en Panamá y regiones tropicales, confirmando que El Niño disminuye las descargas y La Niña las incrementa.
3. La relación entre la precipitación y la descarga no siempre es lineal, especialmente a escala estacional, debido a la interacción con otros procesos hidrológicos como la infiltración, evapotranspiración y almacenamiento en el suelo y la vegetación. Durante la temporada lluviosa, la infiltración puede verse limitada por la compactación y pérdida de macroporos formados por raíces y la biota edáfica, lo que aumenta la proporción de escorrentía superficial (Kursar, 1995). Sin embargo, en la estación seca, la actividad biológica restaura la estructura del suelo y la capacidad de infiltración, permitiendo una mayor retención de agua.
4. El análisis a escala anual mostró una relación más consistente entre precipitación y descarga que el análisis estacional. Esto sugiere que, aunque la precipitación es el

principal determinante de la descarga en la quebrada, su efecto es modulador por factores como la capacidad de retención del suelo y la dinámica del dosel forestal.

5. La cobertura vegetal y el tipo de suelo en la Isla Barro Colorado juegan un papel crucial en la regulación hidrológica. El dosel intercepta una fracción importante de la precipitación, reduciendo la cantidad de agua que llega al suelo. Además, la presencia de raíces densas y macroporos mejora la infiltración en los suelos arcillosos, favoreciendo la recarga y el almacenamiento de agua en los horizontes más profundos.
6. Durante eventos de El Niño, la vegetación ayuda a reducir la evaporación y la erosión del suelo, mitigando parcialmente los efectos de la sequía. En eventos de La Niña, la vegetación y los suelos contribuyen a la regulación de los picos de descarga, amortiguando el impacto de lluvias extremas y evitando una respuesta abrupta en el flujo de la quebrada.
7. Los Inceptisoles, como el suelo Lutz de la Isla Barro Colorado, tienen una permeabilidad que, bajo condiciones naturales de vegetación intacta y buen manejo estructural, facilita la infiltración del agua, reduciendo la escorrentía superficial y estabilizando la descarga. En combinación con la vegetación, los suelos almacenan agua y las liberan gradualmente en periodos de precipitación extrema mientras que durante la temporada seca esta capacidad de retención del suelo y el aporte de humedad por parte de la vegetación permiten mantener flujos base en la quebrada, evitando que la descarga disminuya drásticamente.
8. A largo plazo, los resultados sugieren posibles señales del impacto acumulativo del cambio climático, particularmente en la intensificación de eventos extremos. Si

bien en muchas regiones el cambio climático ha incrementado la esorrentía y la descarga debido a la intensificación del ciclo hidrológico (Müller, 2024), en la Isla Barro Colorado se observa una estabilidad hidrológica atribuida a la conservación de la cobertura vegetal y la estructura del suelo. La preservación de los bosques y la regulación natural del agua en cuencas tropicales resultan fundamentales para mitigar los efectos del cambio climático. Se recomienda promover políticas de conservación y fortalecer el monitoreo hidrológico a largo plazo, incluyendo el uso de piezómetros y pozos de observación del nivel freático, para obtener información más detallada sobre la dinámica del agua subterránea.

ANEXOS

ANEXO 1. PRECIPITACIÓN, DESCARGA Y ESCORRENTÍA ANUAL

Año	Descarga m³/año	Escorrentía mm/año	Precipitación mm/año	Coef.de Escorrentía
1972	42873.69	440.63	2369.00	0.19
1973	112490.47	1156.12	2099.72	0.55
1974	94511.05	971.34	2300.02	0.42
1975	117583.16	1208.46	2762.78	0.44
1976	30903.55	317.61	1708.26	0.19
1977	104574.73	1074.77	2598.04	0.41
1978	63664.34	654.31	2005.28	0.33
1979	85550.37	879.24	2335.60	0.38
1980	56233.60	577.94	2101.02	0.28
1981	235011.03	2415.32	4135.10	0.58
1982	41614.68	427.69	1771.04	0.24
1983	80301.98	825.30	2241.18	0.37
1984	112867.33	1159.99	1547.11	0.75
1985	63166.65	649.19	1638.05	0.40
1986	54222.38	557.27	1866.65	0.30
1987	104440.74	1073.39	1886.71	0.57
1988	101418.06	1042.32	1689.58	0.62
1989	53980.14	554.78	1771.00	0.31
1990	118189.01	1214.69	2762.00	0.44
1991	86339.21	887.35	2158.24	0.41
1992	136434.67	1402.21	2691.38	0.52
1993	121387.03	1247.55	2457.20	0.51
1994	78507.10	806.86	2007.11	0.40
1995	78059.85	802.26	2230.88	0.36
1996	158415.17	1628.11	2641.07	0.62
1997	33882.62	348.23	1521.46	0.23
1998	90536.23	930.49	2272.28	0.41
1999	182406.24	1874.68	3371.85	0.56
2000	91796.38	943.44	2191.77	0.43
2001	67089.06	689.51	1945.89	0.35
2002	119556.85	1228.74	1841.25	0.67
2003	231492.01	2379.16	2535.68	0.94
2004	207470.32	2132.27	2369.82	0.90
2005	136374.04	1401.58	2016.76	0.69

2006	200815.43	2063.88	2203.70	0.94
2007	141121.00	1450.37	2522.22	0.58
2008	44748.49	459.90	1670.56	0.28
2009	75155.29	772.41	2157.22	0.36
2010	193201.79	1985.63	3501.90	0.57
2011	139852.21	1437.33	2818.13	0.51
2012	123507.86	1269.35	2946.40	0.43
2013	58826.46	604.59	2040.89	0.30
2014	60152.32	618.22	2173.49	0.28
2015	27974.17	287.50	1758.45	0.16
2016	115842.61	1190.57	2810.52	0.42
2017	65681.79	675.04	2061.21	0.33
2018	136283.90	1400.66	2910.85	0.48
2019	50135.39	515.27	2086.88	0.25
2020	114166.32	1173.34	2253.24	0.52
2021	144401.73	1484.09	3054.61	0.49
2022	106354.84	1093.06	2707.15	0.40
2023	28828.31	296.28	1691.13	0.18
2024	22492.99	231.17	1271.02	0.18

ANEXO 2. DESCARGA ANUAL EN M3/MIN

Año	Descarga(m3/min)
1972	0.0816
1973	0.2140
1974	0.1798
1975	0.2237
1976	0.0588
1977	0.1990
1978	0.1211
1979	0.1628
1980	0.1070
1981	0.4471
1982	0.0792
1983	0.1528
1984	0.2147
1985	0.1202
1986	0.1032
1987	0.1987
1988	0.1930

1989	0.1027
1990	0.2249
1991	0.1643
1992	0.2596
1993	0.2309
1994	0.1494
1995	0.1485
1996	0.3014
1997	0.0645
1998	0.1723
1999	0.3470
2000	0.1747
2001	0.1276
2002	0.2275
2003	0.4404
2004	0.3947
2005	0.2595
2006	0.3821
2007	0.2685
2008	0.0851
2009	0.1430
2010	0.3676
2011	0.2661
2012	0.2350
2013	0.1119
2014	0.1144
2015	0.0532
2016	0.2204
2017	0.1250
2018	0.2593
2019	0.0954
2020	0.2172
2021	0.2747
2022	0.2023
2023	0.0548
2024	0.0428

ANEXO 3. DESCARGA Y ESCORRENTÍA ANUAL POR TEMPORADA

Año	Descarga m³ /año Temporada Lluviosa	Escorrentía mm/año Temporada Lluviosa	Descarga m³ /año Temporada Seca	Escorrentía mm /año Temporada Seca
1972	34781.02	357.46	8092.67	83.17
1973	98313.53	1010.42	14176.94	145.70
1974	79190.11	813.88	15320.94	157.46
1975	110217.99	1132.76	7365.17	75.70
1976	27100.28	278.52	3803.27	39.09
1977	95750.79	984.08	8823.93	90.69
1978	59671.65	613.27	3992.69	41.03
1979	76895.40	790.29	8654.97	88.95
1980	45615.57	468.81	10618.03	109.13
1981	180275.41	1852.78	54735.62	562.54
1982	32483.94	333.85	9130.74	93.84
1983	70047.87	719.92	10254.11	105.39
1984	98000.17	1007.20	14867.16	152.80
1985	57700.27	593.01	5466.38	56.18
1986	47331.52	486.45	6890.86	70.82
1987	91334.06	938.69	13106.68	134.70
1988	72110.91	741.12	29307.15	301.20
1989	47603.85	489.25	6376.29	65.53
1990	102887.64	1057.43	15301.37	157.26
1991	71739.62	737.30	14599.59	150.05
1992	133970.62	1376.88	2464.05	25.32
1993	117282.03	1205.37	4105.00	42.19
1994	74842.60	769.19	3664.50	37.66
1995	75697.58	777.98	2362.27	24.28
1996	129352.29	1329.42	29062.88	298.69
1997	31769.05	326.51	2113.57	21.72
1998	89907.17	924.02	629.06	6.47
1999	175650.25	1805.24	6755.99	69.43
2000	76068.91	781.80	15727.47	161.64
2001	60180.41	618.50	6908.65	71.00
2002	107108.88	1100.81	12447.97	127.93
2003	230442.51	2368.37	1049.51	10.79
2004	203446.50	2090.92	4023.82	41.35
2005	129313.36	1329.02	7060.68	72.57
2006	193949.68	1993.32	6865.75	70.56

2007	136787.33	1405.83	4333.67	44.54
2008	42386.01	435.62	2362.48	24.28
2009	74018.72	760.73	1136.58	11.68
2010	191746.80	1970.68	1455.00	14.95
2011	131336.64	1349.81	8515.57	87.52
2012	121023.00	1243.81	2484.86	25.54
2013	54977.74	565.03	3848.72	39.56
2014	58761.09	603.92	1391.24	14.30
2015	25830.46	265.47	2143.71	22.03
2016	115378.88	1185.81	463.73	4.77
2017	63434.26	651.95	2247.53	23.10
2018	119064.59	1223.69	17219.31	176.97
2019	49400.13	507.71	735.26	7.56
2020	107159.27	1101.33	7007.05	72.01
2021	133852.53	1375.67	10549.19	108.42
2022	100308.46	1030.92	6046.39	62.14
2023	26761.96	275.05	2066.35	21.24
2024	21848.48	224.55	644.51	6.62

ANEXO4. PRECIPITACIÓN ANUAL POR TEMPORADA

Año	Precipitación mm/año Temporada Lluviosa	Precipitación mm /año Temporada Seca
1929	1828.55	399.80
1930	1479.30	461.26
1931	2397.76	583.69
1932	2287.27	591.31
1933	2025.40	556.51
1934	2311.91	797.56
1935	2747.01	895.60
1936	1758.70	625.60
1937	2287.52	849.38
1938	2116.07	852.93
1939	2093.21	839.72
1940	1689.61	506.22
1941	1920.49	411.73
1942	1957.32	859.54
1943	2055.62	999.74
1944	2031.24	807.47

1945	2245.61	813.31
1946	1692.91	528.07
1947	1549.91	428.24
1948	1627.12	478.54
1949	2440.69	475.49
1950	2156.97	751.33
1951	1917.95	945.90
1952	1819.15	662.43
1953	1903.98	733.55
1954	2227.33	456.95
1955	2002.54	907.80
1956	2036.57	693.17
1957	1618.74	406.40
1958	1832.86	712.22
1959	1702.31	614.68
1960	2461.26	1039.11
1961	1907.54	638.05
1962	1531.37	629.00
1963	1903.22	863.85
1964	2379.47	495.81
1965	1947.16	409.96
1966	2024.38	783.34
1967	1609.34	572.01
1968	1828.04	395.48
1969	1563.12	629.41
1970	2203.19	938.02
1971	1610.61	546.86
1972	1598.98	770.02
1973	1596.44	503.28
1974	1926.44	373.58
1975	2142.44	620.34
1976	1342.22	366.04
1977	2236.96	361.08
1978	1611.30	393.98
1979	1568.08	767.52
1980	1516.28	584.74
1981	2487.88	1647.22
1982	1288.30	482.74
1983	1580.84	660.35
1984	1276.10	271.02

1985	1380.24	257.81
1986	1436.37	430.28
1987	1306.58	580.14
1988	1238.04	451.54
1989	1324.72	446.28
1990	2211.07	550.93
1991	1602.23	556.01
1992	2161.29	530.10
1993	1758.70	698.50
1994	1496.31	510.79
1995	1521.20	709.67
1996	1793.98	847.09
1997	1297.43	224.03
1998	1662.43	609.85
1999	2099.56	1272.29
2000	1398.27	793.50
2001	1372.62	573.28
2002	1452.37	388.87
2003	1955.29	580.39
2004	1918.97	450.85
2005	1332.23	684.53
2006	1795.53	408.18
2007	1871.98	650.24
2008	1307.34	363.22
2009	1677.42	479.81
2010	2315.46	1186.43
2011	2070.35	747.78
2012	2120.39	826.01
2013	1560.83	480.06
2014	1560.84	612.65
2015	1370.85	387.61
2016	2268.75	541.77
2017	1514.60	546.61
2018	2033.53	877.32
2019	1457.97	628.90
2020	1683.01	570.22
2021	2474.98	579.63
2022	1980.45	726.70
2023	1171.19	519.94
2024	913.89	357.13

ANEXO 5. DESCARGA ANUAL POR FENÓMENO

Año	Fenómeno	Descarga m³/año
1972	El Niño Moderado	42873.69
1973	El Niño Moderado	112490.47
1974	La Niña Fuerte	94511.05
1975	La Niña Fuerte	117583.16
1976	El Niño Débil	30903.55
1977	El Niño Débil	104574.73
1978	El Niño Débil	63664.34
1979	El Niño Débil	85550.37
1980	El Niño Débil	56233.60
1981	Neutro	235011.03
1982	El Niño Fuerte	41614.68
1983	El Niño Fuerte	80301.98
1984	La Niña Moderado	112867.33
1985	La Niña Moderado	63166.65
1986	El Niño Moderado	54222.38
1987	El Niño Moderado	104440.74
1988	La Niña Fuerte	101418.06
1989	La Niña Fuerte	53980.14
1990	Neutro	118189.01
1991	El Niño Moderado	86339.21
1992	El Niño Moderado	136434.67
1993	Neutro	121387.03
1994	La Niña Débil	78507.10
1995	La Niña Moderado	78059.85
1996	La Niña Moderado	158415.17
1997	El Niño Fuerte	33882.62
1998	El Niño Fuerte	90536.23
1999	La Niña Fuerte	182406.24
2000	La Niña Fuerte	91796.38
2001	La Niña Moderado	67089.06
2002	El Niño Moderado	119556.85
2003	El Niño Moderado	231492.01
2004	El Niño Débil	207470.32
2005	El Niño Débil	136374.04
2006	El Niño Débil	200815.43
2007	El Niño Débil	141121.00

2008	La Niña Fuerte	44748.49
2009	El Niño Moderado	75155.29
2010	El Niño Moderado	193201.79
2011	La Niña Fuerte	139852.21
2012	La Niña Moderado	123507.86
2013	Neutro	58826.46
2014	Neutro	60152.32
2015	El Niño Fuerte	27974.17
2016	El Niño Fuerte	115842.61
2017	La Niña Moderado	65681.79
2018	El Niño Débil	136283.90
2019	El Niño Débil	50135.39
2020	La Niña Débil	114166.32
2021	La Niña Débil	144401.73
2022	Neutro	106354.84
2023	Neutro	28828.31
2024	Neutro	22492.99

ANEXO 6. PRECIPITACIÓN ANUAL POR FENÓMENO REGISTRADO

Año	Fenómeno	Precipitación mm/año
1929	Neutro	2228.3
1930	Neutro	1940.6
1931	Neutro	2981.5
1932	Neutro	2878.6
1933	Neutro	2581.9
1934	Neutro	3109.5
1935	Neutro	3642.6
1936	Neutro	2384.3
1937	Neutro	3136.9
1938	Neutro	2969.0
1939	Neutro	2932.9
1940	Neutro	2195.8
1941	Neutro	2332.2
1942	Neutro	2816.9
1943	Neutro	3055.4
1944	Neutro	2838.7
1945	Neutro	3058.9

1946	Neutro	2221.0
1947	Neutro	1978.2
1948	Neutro	2105.7
1949	Neutro	2916.2
1950	Neutro	2908.3
1951	El Niño Débil	2863.9
1952	El Niño Débil	2481.6
1953	Neutro	2637.5
1954	La Niña Débil	2684.3
1955	La Niña Moderado	2910.3
1956	La Niña Moderado	2729.7
1957	El Niño Moderado	2025.1
1958	El Niño Moderado	2545.1
1959	Neutro	2317.0
1960	Neutro	3500.4
1961	Neutro	2545.6
1962	Neutro	2160.4
1963	El Niño Débil	2767.1
1964	El Niño Débil	2875.3
1965	El Niño Moderado	2357.1
1966	El Niño Moderado	2807.7
1967	La Niña Débil	2181.4
1968	El Niño Débil	2223.5
1969	El Niño Débil	2192.5
1970	La Niña Moderado	3141.2
1971	La Niña Moderado	2157.5
1972	El Niño Moderado	2369.0
1973	El Niño Moderado	2099.7
1974	La Niña Fuerte	2300.0
1975	La Niña Fuerte	2762.8
1976	El Niño Débil	1708.3
1977	El Niño Débil	2598.0
1978	El Niño Débil	2005.3

1979	El Niño Débil	2335.6
1980	El Niño Débil	2101.0
1981	Neutro	4135.1
1982	El Niño Fuerte	1771.0
1983	El Niño Fuerte	2241.2
1984	La Niña Moderado	1547.1
1985	La Niña Moderado	1638.0
1986	El Niño Moderado	1866.6
1987	El Niño Moderado	1886.7
1988	La Niña Fuerte	1689.6
1989	La Niña Fuerte	1771.0
1990	Neutro	2762.0
1991	El Niño Moderado	2158.2
1992	El Niño Moderado	2691.4
1993	Neutro	2457.2
1994	La Niña Débil	2007.1
1995	La Niña Moderado	2230.9
1996	La Niña Moderado	2641.1
1997	El Niño Fuerte	1521.5
1998	El Niño Fuerte	2272.3
1999	La Niña Fuerte	3371.8
2000	La Niña Fuerte	2191.8
2001	La Niña Moderado	1945.9
2002	El Niño Moderado	1841.2
2003	El Niño Moderado	2535.7
2004	El Niño Débil	2369.8
2005	El Niño Débil	2016.8
2006	El Niño Débil	2203.7
2007	El Niño Débil	2522.2
2008	La Niña Fuerte	1670.6
2009	El Niño Moderado	2157.2

2010	El Niño Moderado	3501.9
2011	La Niña Fuerte	2818.1
2012	La Niña Moderado	2946.4
2013	Neutro	2040.9
2014	Neutro	2173.5
2015	El Niño Fuerte	1758.5
2016	El Niño Fuerte	2810.5
2017	La Niña Moderado	2061.2
2018	El Niño Débil	2910.8
2019	El Niño Débil	2086.9
2020	La Niña Débil	2253.2
2021	La Niña Débil	3054.6
2022	Neutro	2707.1
2023	Neutro	1691.1
2024	Neutro	1271.0

Anexo 7. Creación de Tabla de Calendario por temporada en Power BI

Para el análisis temporal de los datos de descarga y precipitación en la Quebrada Lutz, se diseñó una Tabla de Calendario en Power BI. Esta tabla permite establecer relaciones temporales y facilitar cálculos de tendencias y correlaciones. A continuación, se describen los pasos seguidos para su creación:

1. Generación de Fechas

Se utilizó la función CALENDAR en DAX para generar un rango de fechas desde 1972 hasta 2024.

`Tabla_Calendar = CALENDAR(DATE(1972, 1, 1), DATE(2024, 12, 31))`

2. Creación de Columnas de Año, Mes y Día

Se extrajeron estos valores a partir de la columna de fecha utilizando funciones DAX.

Año = YEAR(Tabla_Calendario[Date])

Mes = MONTH(Tabla_Calendario[Date])

Día = DAY(Tabla_Calendario[Date])

3. Definición de Temporadas (Seca y Lluviosa)

En Panamá, la temporada seca comprende de diciembre a abril, mientras que la temporada lluviosa va de mayo a noviembre. Para clasificar cada fecha en su temporada correspondiente, se aplicó la siguiente expresión en DAX:

```
Temporada = IF(
    MONTH(Tabla_Calendario[Date]) >= 5 && MONTH(Tabla_Calendario[Date]) <= 11,
    "Lluviosa",
    "Seca"
)
```

4. Creación de la Columna Año-Temporada

Para agrupar los datos por año y temporada, se combinó el año y la temporada en una nueva columna:

Año_Temporada = Tabla_Calendario[Año] & " - " & Tabla_Calendario[Temporada]

Este procedimiento permitió organizar los datos de manera estructurada en Power BI, facilitando los análisis de tendencias en la escorrentía y la descarga en relación con la precipitación y otros factores climáticos.

ANEXO 8. CÁLCULO DE DESCARGA Y PRECIPITACIÓN POR TEMPORADA EN POWER BI

Para analizar la descarga y precipitación por temporada (seca o lluviosa) dentro de las tablas de Descarga y Precipitación, se emplearon fórmulas DAX que filtran los datos según la temporada correspondiente.

1. Cálculo de Descarga por Temporada

Se definieron medidas para calcular la descarga total en las temporadas lluviosa y seca:

Descarga en Temporada Lluviosa

```
Descarga_Lluviosa = CALCULATE(  
  
    SUM(Tabla_Descarga[Descarga]),  
  
    FILTER(Tabla_Calendario, Tabla_Calendario[Temporada] = "Lluviosa")  
  
)
```

Descarga en Temporada Seca

```
Descarga_Seca = CALCULATE(  
  
    SUM(Tabla_Descarga[Descarga]),
```

```
    FILTER(Tabla_Calendario, Tabla_Calendario[Temporada] = "Seca")
)
```

2. Cálculo de Precipitación por Temporada

Se utilizó la función SUMMARIZE en DAX para agrupar los datos por año y calcular la precipitación total en cada temporada:

TablaPrecipitacionporTemporada =

```
SUMMARIZE(
    'Precipitacion',
    'Precipitacion'[año],
    "TotalPrecipitacionLluviosa",
    CALCULATE(
        SUM('Precipitacion'[ra]),
        'Precipitacion'[temporadas] = "lluviosa"
    ),
    "TotalPrecipitacionSeca",
    CALCULATE(
        SUM('Precipitacion'[ra]),
        'Precipitacion'[temporadas] = "seca"
    )
)
```

)

Este procedimiento permitió desglosar y analizar la descarga y precipitación estacionalmente, facilitando la comparación entre ambas variables en las temporadas seca y lluviosa.

BIBLIOGRAFÍA

- (NOAA), N. O. (2005). *NORTH AMERICAN COUNTRIES REACH CONSENSUS ON EL NIÑO*. Obtenido de Recuperado de:
<https://www.nws.noaa.gov/ost/climate/STIP/ElNinoDef.htm>
- Adams, H. e. (2017). Temperature Response Surfaces for Mortality Risk of Tree Species with Future Drought. . *Environ, Res. Lett.* 12 115014.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa93be>.
- Alexander Zimmermann, T. F. (2012). Forests and erosion: Insights from a study of suspended-sediment dynamics. *Journal of Hidrology*, 170-181.
- Baillie, I. E. (julio de 2007). Estudio de suelos semidetallado de la isla Barro Colorado. *Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales*, 54. Obtenido de
<http://biogeodb.stri.si.edu/bioinformatics/>
- Bartlett, A. S. (1973). Phytogeographic history of the Isthmus of Panama, during the past 12,000 years. (A history of vegetation, climate and sea-level change). *A. Graham, editor; Vegetation and Vegetational History of Northern South America*, 233-247.
- Bennett, C. F. (1963). A Phytophysionomig Reconnaissance of Barro Colorad Island, Canal Zone. *Smithsonian Miscellaneous Collections.*, 145:1-8.
- Bjorn Klove, P. A.-A.-V. (10 de October de 2014). Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology*, 518, 250-266.
- Bonell, M. G. (1981). Soil hydraulic properties and their effectonsurface and subsurface transferina tropicalrainforest catchment. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1-18.

- Brando, P. e. (2014). Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought–fire interactions. *Proc. Natl. Acad. Sci*, 111(17), 6347, doi:10.1073/pnas.1305499111.
- Center, C. P. (8 de diciembre de 2022). *National Weather Service*. Obtenido de https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_disc_dec2022/ensodisc_Sp.shtml
- CEPAL, C. E. (2012). *Cambio Climático en Centroamérica*. México: Naciones Unidas.
- Chapman, F. M. (1938). *Life in an air castle: Nature studies in the tropics*. Appleton-Century Company.
- Cheesman, A. a. (2013). Elevated night-time temperatures increase growth in seedlings of two tropical pioneer tree species. *New Phytol*, 197(4), 1185–1192.
- Ciemer, C. e. (2019). Higher resilience to climatic disturbances in tropical vegetation exposed to more variable rainfall. *Nat. Geosci*, 12(3), 174–179.
- Curtis, P. C. (2018). Classifying drivers of global forest loss. *Science*, 1108-1111.
- Daisy H. Dente and Alex Elsy. (2024). Structure, Diversity and Composition of Secondary Forest of The Barro Colorado Nature Monument. En E. b.-L. Wright, *The First 100 years of research on Barro Colorado. Plant and Ecosystem Science* (págs. 61-70). Washinton, D.C: SMITHSONIAN INSTITUTION SCHOLARLY PRESS.
- Dietrich, D. M. (1982). Geology, Climate and Hidrology of Barro Colorado Island. *The Ecology of a Tropical Forest*, 21-46.
- Douville, H. K. (2021). 2021: Water Cycle Changes. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment*

- Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. UK: Cambridge University Press.
- Egbert G. Leigh, J. A. (1982). *The Ecology of a Tropical Forest*. Washington, D.C: Smithsonian Institution Press.
- Elsenbeer, H. a. (1990). Surficial processes in the rainforest of western Amazonia, in Research Needs and Applications to Reduce Erosion and Sedimentation in Tropical Steeplands. *IAHS-AISH publication 192*, 289-297.
- Elsenbeer, H. C. (1992). Spatialanalysis of soil hydraulic conductivity in a tropical rainforest catchment. *Water Resources Research*, 3201-3214.
- Enders, R. (1935). Mammalian Life Histories from Barro Colorado Island, Panama. *Bulletin of the Museum of Comparative Zoology*, 78:385-502.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, I. (2021). *Cambio Climático 2013. Bases físicas*. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY,: Cambridge University Press.
- IPBES. S. Díaz, J. S. (2019). *IPBES (2019): Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Bonn, Germany: IPBES secretariat.
- IPCC, H.-O. P. (2022). *IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

- Jia, G. E.-D. (2019). 2019: *Land–climate interactions*. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* . In press.
- Johnsson, M. y. (1989). Controles fisiográficos de la composición de sedimentos derivados de terrenos volcánicos y sedimentarios en la Isla Barro Colorado. *Revista de Petrología* , 768-781.
- Jos Barlow, G. D. (2016). Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation. *Nature*, 144-147.
- Kenoyer, L. (1929). General and Successional Ecology of the Lower Tropical Rain Forest al Barro Colorado Island, Panama,. *Ecology*, 201-222.
- Kenoyer, L. A. (1929). General and successional ecology of the lower tropical rain forest at Barro Colorado Island. *Panama. Ecology*, 10(2), 201-222.
- Kinner, D. y. (2004). Identificar rutas de flujo de tormentas en una cuenca de captación de selva tropical utilizando modelos hidrológicos y geoquímicos. *Procesos Hidrológicos*., 2851-2875.
- Knight, D. (1963). A Distance Method for Constructing Forest Profile Diagrams and Obtaining Structural Data. *Tropical Ecology*, 89-94.
- Knight, D. (1975). A Phytosociological Analysis of Species-rich Tropical Forest on Barro Colorado Island, Panama. *Ecological Monographs*, 45:259-284.
- Kursar, T. W. (1995). The effects of the rain season and irrigation on soil water and oxygen in a seasonal forest in Panama. *Journal of Tropical Ecology*, 497-515.

- Lang, G. E. (1971). Sampling the Density of Tree Species with Quadrats in a Species-rich Tropical Forest. *Forest Science.*, 17:395-400.
- Larsen MC, S. R. (2021). Cuenca del arroyo Lutz, Isla de Barro Colorado, República de Panamá. 6.
- Lawrence, D. a. (2015). Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. *Nat. Clim. Change*, 5(1), 27.
- Lee, R. (1980). *Forest Hidrology*. New York: Columbia University Press.
- Leemans, R. (2004). Another reason for concern: Regional and global impacts on ecosystems for different levels of climate change. *Global Environmental Change*, 219-228.
- Malhi, Y. T. (2014). Tropical forests in the Anthropocene. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, 125-159.
- Mascaro, J. G. (2012). Scale Dependence of Aboveground Carbon Accumulation in Secondary Forest of Panama: A Test of the Intermediate Peak Hypothesis. *Forest Ecology and Management*, 276: 62–70. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.03.032>
- Milton, K. (1978). Behavioral Adaptations to Leaf-eating by the Mantled Howler Monkey (*Alovatta oallata*). *The Ecology of Arboreal Folivers.*, 535-50.
- O'Brien, M. J., Reynolds, G., Ong, R., & Hector, A. (2017). Resistance of tropical seedlings to drought is mediated by neighbourhood diversity. *Nature Ecology and Evolution*, 1(11):1643-1648. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0326-0>.
- Omar V. Müller, Patrick C. McGuire, Pier Luigi Vidale, and Ed Hawkins. (23 de May de 2024). River flow in the near future: a global perspective in the context of a high-

- emission climate change scenario. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 28, 2179-2201.
- Obtenido de <https://hess.copernicus.org/articles/28/2179/2024/>
- ONU. (2022). Obtenido de <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change#Cada%20Aumento%20Del%20Calentamiento%20Global%20Es%20importante>
- Poorter, L. e. (2016). Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature*, 530(7589), 211.
- Pörtner, H. (2021). *Scientific Outcome of the IPBES-IPCC Co-sponsored Workshop on Biodiversity and Climate Change*. Bonn, Germany: IPBES secretariat.
- Putz, F. E. (1982). Tree Mortality Rates on Barro Colorado Island. . *The Ecology of a Tropical Forest*, edited by Egbert G. Leigh, Jr., et al Washington, D.: Smithsonian Institution Press., 95-100.
- Robert F. Stallard, D. K. (1999). Panama Canal Basin: Deforestation effects. 37.
- Robin B. Foster, N. V. (1982). Structure and History of the Vegetation of Barro Colorado Island. *The Ecology of a Tropical Forest*, 67.
- Robin B. Foster, Nicholas V. L. Brokaw. (1996). Structure and History of the Vegetation of Barro Colorado Island. En A. S. Egbert G. Leigh Jr., *The Ecology of a Tropical Forest*, Smithsonian Institution. *Seasonal Rhuthms and Long-Term Changes*. Second Edition (págs. 67-82). Smithsonian Institution.
- Ruxton, R. (1967). Slope Wash Under Primary Rain Forest in Northern Papua. *Landform Studies from Australia and New Guinea*, 85-94.
- Saatchi, S. (2021). Detecting vulnerability of humid tropical forests to multiple stressors. *One Earth*, 31-48.

- Samuel Kusangaya, M. L. (2013). Impacts of Climate Change on Water Resources in Southern Africa: A Review. *Physics and Chemistry of the Earth Parts*, 67-69.
- Sauer, P. T. (2010). *Discharge Measurements at Gaging Stations* (Vol. 3). Techniques and Methods book .
- Schmitt, S. e. (2020). Functional Diversity Improves Tropical Forest Resilience: Insights from a Long-Term Virtual Experiment. v 108 (3), 831-843.
<https://doi.org/10.1111/1365-2745.13320>.
- Slot, M. a. (2018). High tolerance of tropical sapling growth and gas exchange to moderate warming. *Funct. Ecol.*, 32(3), 599–611.
- Smithsonian Tropical Research Institute. (2024). *Physical Monitoring*. Obtenido de <https://striresearch.si.edu/physical-monitoring/barro-colorado/>
- Standley, P. C. (1933). The flora of Barro Colorado Island, Panama. *Smithsonian Miscellaneous Collections*, 78,1-378.
- Stella Manes, M. J.-N.-A. (2021). Endemism increases species' climate change risk in areas of global biodiversity importance. *Biological Conservation*.
- Thorington, R. J. (1982). Distribution of Trees on Barro Colorado Island. *The Ecology of a Tropical Forest, edited by Egbert G. Leigh, Jr., et al. Washington, D.C.: Smithsonian Institution Press.*, 89-94.
- Tricart, J. (1972). Landforms of the Humid Tropics, Forests and Savannas: Geographies for Advance Study. *London: Longmans.* , 306.
- Verbesselt, J. e. (2016). Remotely sensed resilience of tropical forests. *Nat. Clim. Change.*, 6(11), 1028–1031, doi:10.1038/nclimate3108.

- Wilm, H. G., y E. G. Dunford. (1948). Effect of timber cutting on water available for stream flow from a lodgepole pine forest. *U. S. Dept. of Agric. Tech. Bull*, 43.
- Windsor, D. (1990). Variabilidad del clima y la humedad en una zona tropical. *Prensa del Smithsonian Institution*.
- Yavitt, J. B. (2024). Soils of Barro Colorado Island. En S. W. Helene C. Muller-Landa, *The First 100 years of research on Barro Colorado. Plant and Ecosystem Science* (págs. 29 - 39). Washington, DC.: Smithsonian Scholarly Press.
- Zelazowski, P. Y. (2011). Changes in the potential distribution of humid tropical forests on a warmer planet. *Philos. Trans. Royal Soc. A Math. Phys. Eng. Sci*, 137-160.