

Análisis de índices climáticos en la determinación de desencadenantes de deslizamientos en Tierras Altas

Analysis of indices of extreme climate in the determination of landslide triggers in Tierras Altas

Cristhian Caballero¹, Patricia Castillo¹, Josué Castrellón¹, Stephania Rodríguez¹

¹ Grupo de Investigación de Ingeniería Geotécnica, Universidad Tecnológica de Panamá

*Autor de correspondencia: stephania.rodriguez@utp.ac.pa

RESUMEN. El cambio climático es una de las principales problemáticas a nivel global, generando afectaciones en laderas como se evidencia históricamente en el distrito de Tierras Altas. Esta investigación tiene el objetivo de determinar eventos extremos asociados a inestabilidades de laderas mediante un análisis de índices climáticos. Se utilizó el software Climpact, en base a datos históricos de precipitaciones y temperaturas en la provincia de Chiriquí. Las estaciones meteorológicas se seleccionaron de acuerdo con aspectos como la ubicación, características climáticas y geomorfológicas, data existente de precipitaciones y temperaturas, y porcentajes mínimos de data faltante. El análisis de índices climáticos fue utilizado para la comparación de eventos extremos, donde no se perciben aumentos significativos en las temperaturas máximas, en su lugar existe un aumento en las temperaturas mínimas, para las precipitaciones la tendencia muestra una menor intensidad, pero un aumento en la frecuencia anual de lluvias de menor intensidad. El comportamiento de la data analizada puede asociarse principalmente a los efectos del cambio climático, lo que resulta en afectaciones de taludes y la predisposición a ocurrencia de deslizamientos, produciendo grietas de infiltración y evitando que el talud se recupere, donde eventos extremos menores generarán afectaciones que no solían ocurrir para márgenes similares de precipitación. El uso de ERA5 proporciona resultados satisfactorios al comparar con la data meteorológica histórica; un ajuste mediante factores de corrección y del desfase temporal permitiría extrapolar el modelo, mejorando los resultados en sitios en que no existe data meteorológica, extendiendo así la posibilidad de aplicaciones regionales y locales.

Palabras clave. Cambio climático, Datos climáticos, Deslizamiento de tierra, Gestión de riesgos, Precipitación, Temperatura.

ABSTRACT. Climate change is today one of the main problems at a global level, this research has the objective of determining extreme events associated with slope instability through an analysis of climatic indices. The Climpact software is used to input historical parameters of precipitation and temperature data in the province of Chiriquí. The meteorological stations were selected according to aspects such as location, different climatic and geomorphological responses, existing precipitation and temperature data, and minimum percentages of missing data. The analysis of climatic indices developed a comparison with extreme events. No significant increases in maximum temperatures are perceived, instead there is an increase in minimum temperatures, which implies a reduction in the margin of difference between the two; for rainfall, the trend shows less intensity, but an increase in the annual frequency of less intense rains. The behaviour of the data analysed can be mainly associated with the effects of climate change; this results in affectations in the slopes and the predisposition to the occurrence of landslides, producing infiltration cracks and preventing the slope from recovering, so that minor extreme events will generate affectations that did not usually occur for similar precipitation margins. The use of ERA5 provides satisfactory results when compared with historical meteorological data. An adjustment using correction factors and time lag would allow the model to be extrapolated, improving results in locations where no meteorological data is available, extending the possibility of regional and local applications.

Keywords. Climate change, Climate dataset, Landslide, Risk management, Precipitation, Temperature.

Citación: C. Caballero, P. Castillo, J. Castrellón y S. Rodríguez, "Análisis de índices climáticos en la determinación de desencadenantes de deslizamientos en Tierras Altas", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 20, no. 2, pp. (0), 2024.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 17 de noviembre de 2023. **Recibido con correcciones:** 15 de febrero de 2024. **Aceptado:** 15 de febrero de 2024.

DOI: <https://doi.org/10.33412/idt.v20.2.4055>

Copyright: 2024 C. Caballero, P. Castillo, J. Castrellón y S. Rodríguez. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

1. Introducción

Entre los años 1998 y 2017, se estima que el 53% de las pérdidas económicas mundiales corresponden a desastres climáticos ocurridos en el Caribe y América Latina, representando el 46% de las pérdidas de la última década [1]. A nivel de Centroamérica, el aumento de la frecuencia e intensidad de precipitaciones y eventos climáticos, como tormentas y huracanes, representan una urgencia inminente en materia de daños a infraestructuras, redes de servicios y de transporte, pérdidas humanas, así como el deterioro de cuencas hidrográficas [2]. Este incremento asociado al cambio climático afecta directamente en la amplificación del riesgo respecto a inestabilidad de laderas, generando un aumento en la presión intersticial debido a la saturación del material y causando un ascenso en el nivel freático, reducción en la cohesión y un incremento en la presión de poros [3]. Un período prolongado de lluvias torrenciales generalmente es causa de movimientos de masas de esta naturaleza [4], la investigación tiene como objetivo principal analizar eventos climáticos extremos asociados a inestabilidad de laderas.

Un deslizamiento se puede definir como un movimiento cuesta abajo de suelo, roca o material orgánico debido a efectos de gravedad [5]. Sus desencadenantes naturales corresponden a precipitación, sismicidad, actividad volcánica y procesos de incisión y socavación, e interactúan directamente con las propiedades geomorfológicas de una zona [6]. Los deslizamientos pueden ser de tipo (1) traslacional, los cuales suelen darse a lo largo de discontinuidades geológicas, y (2) rotacional, comúnmente en materiales de relleno [7], [8]. Ambos poseen un desencadenante común: precipitaciones intensas o, dado el caso, la erosión en la base de los taludes producto del aumento del nivel freático consecuentes de estas lluvias [9].

1.1 Gestión de Riesgos: contexto nacional e internacional

A nivel de Latinoamérica, la variabilidad climática, es decir la alteración en las tendencias de clima, se relacionan directamente con la Oscilación Austral y el fenómeno del Niño [10]; se concluye que los cambios en regímenes de precipitación son consecuencia de cambios en las corrientes oceánicas y la circulación atmosférica [11]. Panamá, debido a su posición geográfica, está expuesto a diversas amenazas de carácter

hidrometeorológico y geofísico [12]. Además, figura como un país sujeto a severos efectos debido al cambio climático [13], entre ellas el incremento de temperaturas, sequías, precipitaciones más frecuentes e intensas y el aumento del nivel del mar [14]. El territorio nacional se clasifica en regiones de riesgo de acuerdo con las amenazas predominantes en la zona. Tierras Altas, al ser uno de los distritos con mayor índice de precipitación anual en la provincia de Chiriquí, y contar con la presencia de otros factores desencadenantes de importancia [15], es catalogado una zona de alto riesgo a deslizamientos e inundaciones [16]. Eventos como los huracanes Eta en el 2020, y Julia en el 2022, afectaron severamente las comunidades, al ocasionar daños materiales y económicos [17]. Debido al factor crítico de amenaza, acciones de identificación, control y gestión son necesarias para adaptación y mitigación de riesgos [18].

A nivel regional, no existen numerosas medidas de adaptación enfocadas hacia la inestabilidad de taludes, a pesar de su importancia en la prevención de daños [19]. Estas estrategias son asociadas a planes de ordenamiento territorial uso de suelos, manejo de aguas, planes de emergencia, capacitación, entre otros [20], [21]. Los proyectos Apoyo a la Prevención de Desastres en la Comunidad Andina [22], ejecutado en Colombia, Venezuela, Ecuador, Perú y Bolivia; así como el proyecto Capitales Andinas [23], en Bogotá, Caracas, La Paz, Lima y Quito, son algunos ejemplos de planes de gestión para la reducción de riesgos y amenazas en Latinoamérica [24]. En Panamá, el Plan Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres funciona como herramienta para la planificación y delimitación de acciones en función de reducir las amenazas a desastres [25].

1.2 Data meteorológica

Son diversas las instituciones que aportan en la recolección de información meteorológica actual e histórica a nivel nacional [26], entre ellos el Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas de la Universidad Tecnológica de Panamá (CIHH) [27], la Autoridad Aeronáutica Civil y el Instituto de Meteorología e Hidrología de Panamá (IMHPA) [28].

1.3 Índices climáticos

Los índices climáticos pueden definirse como la estadística anual, temporal o mensual de data

meteorológica [29], cuyo principal propósito es la determinación de eventos extremos y su variación, favorable o no, en diferentes regiones [30].

Los índices de precipitación pueden ser de carácter absoluto, es decir, que describen niveles de precipitación para periodos definidos, caso contrario a los índices límite, los cuales definen periodos de tiempo para volúmenes de precipitación [31]. Los índices de duración, tal como describe el nombre, definen periodos máximos de tiempo para eventos especiales como periodos de sequía; por otro lado, los índices de intensidad y precipitación total, como el PRCPTOT Y SDII, que describen las cantidades totales de precipitación en días húmedos donde superen 1mm y la precipitación anual promedio [32]. Entre los índices climáticos correspondientes a precipitación se resaltan (1) la cantidad máxima de lluvia en un periodo de cinco días, Rx5day, en donde es posible describir el riesgo a inundaciones como consecuencia de periodos prolongados de precipitación; (3) la medición de sequía como déficit de precipitación, SPI6, y (4) la contabilidad de días en los que el periodo de lluvias obtuvo excedentes de 10mm, R10mm [30].

1.4 Estado del arte: escenarios climáticos como desencadenantes

El cambio climático y las variaciones en los patrones de circulación atmosférica impactan negativamente los estándares de precipitación y temperatura. Los esquemas climáticos y el grado de estabilidad de laderas se relacionan estrechamente debido a las fluctuaciones en las características hidrológicas, que generan a su vez un desbalance en la estructura del suelo [33]. Esta respuesta varía en función de los mecanismos progresivos de debilitamiento de la estructura del talud y su interacción con diversas propiedades locales como litología, pendiente, geometría, pérdida de resistencia al corte debido a erosión, entre otros [34].

Ante la búsqueda de la relación entre el cambio climático y la estabilidad de laderas surge la aplicación de modelos de circulación general, los cuales incorporan la interacción océano-atmósfera ante una simulación de cambio climático. Sin embargo, la resolución horizontal limita la cuantificación de los efectos hidrológicos [35].

Por otro lado, se han utilizado métodos simplificados de análisis de estabilidad sísmica y modelos hidrológicos, basados en data histórica y criterios geotécnicos y geomorfológicos, para la estimación de

umbrales de precipitaciones y áreas de inestabilidad, cuyo impacto se refleja directamente en la gestión de riesgos [36].

La aplicación de machine learning como metodología para materia de gestión de riesgos cobra cada vez más importancia, incluyéndose como avances más recientes el pronóstico de eventos, la caracterización de desencadenantes, la detección de zonas de riesgo y vulnerabilidad, y la integración de modelos acoplados basados en SIG y redes bayesianas, para la evaluación de escenarios de riesgo [37].

2. Metodología

El análisis de índices climáticos requirió el uso de data meteorológica histórica de precipitaciones y temperaturas. Se seleccionaron 3 estaciones para el análisis en el software Climpact; los resultados de los índices fueron analizados, y a partir de ellos se determinaron condiciones para eventos extremos para un evento de inestabilidad de laderas específico.

2.1. Recolección de data meteorológica

La data meteorológica de la provincia de Chiriquí fue solicitada al Instituto Meteorológico Hidrológico de Panamá (IMHPA), la Autoridad Aeronáutica Civil (AAC) y el Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas (CIHH) de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP). La data recibida incluyó estaciones del IMHPA y el CIHH; para 41 y 3 años, cubriendo los periodos de 1981-2023 y 2012-2014.

2.1.1. Selección de la data histórica

Para la investigación se utilizó la data histórica del IMHPA, abarcando uniformemente toda la región de Chiriquí. Esta incluyó el historial de precipitaciones en mm desde el 1 de enero de 1981 hasta el 31 de marzo de 2023, para 28 estaciones; y temperaturas máximas y mínimas en °C desde el 1 de enero de 1981 hasta el 24 de abril de 2022, para 5 estaciones. La Figura 1 muestra la geolocalización de las estaciones del IMHPA por tipo de data.

La data por analizar se seleccionó para el período desde el 01/01/1981 hasta 31/12/2022. Esto delimito la data de precipitaciones para ese rango, y en la data de temperaturas se agregaron valores correspondientes a "N/D" (No data) para el rango a partir del 24/04/2022. Las estaciones con data de temperatura incluyeron también precipitaciones, y aquellas sin data en la totalidad del historial no fueron incluidas.

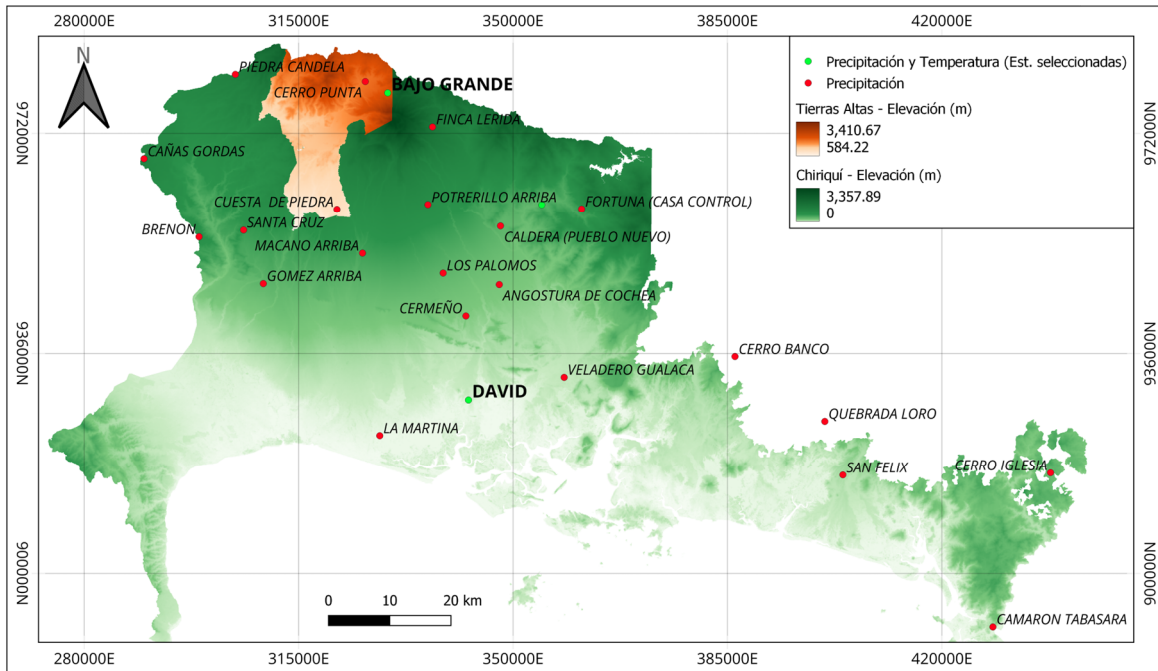


Figura 1. Estaciones meteorológicas por tipo de data

2.2. Selección de estaciones para análisis

Una vez seleccionados los períodos de tiempo a analizar y verificar los porcentajes de N/D por estación, se seleccionaron las estaciones a utilizar, la selección se realizó de acuerdo con la distribución uniforme en la ubicación de las estaciones, disponibilidad de data para precipitaciones y temperaturas para cada estación, y porcentajes mínimos de N/D: Bajo Grande, Los Naranjos, Paja de Sombrero, Gualaca II y David; ubicadas en los distritos de Tierras Altas, Boquete, Gualaca (norte), Gualaca (sur) y David.

2.2.1. Descripción de estaciones

La ubicación de las estaciones meteorológicas corresponde a la zona 17N UTM WGS84, cuyo EPSG es 32617, descrito en la Tabla 1.

Tabla 1. Detalles de estaciones para selección

Est.	Bajo Grande	Los Naranjos	Paja de Sombrero	David	Gualaca II
Elev.	2300 m	1200 m	388 m	27 m	100 m
UTM N	978623.4	970731.1	960309.0	928436.4	942277.2
UTM E	329543.8	342566.5	354700.1	342732.9	356817.5

Se seleccionaron las estaciones Bajo Grande, Paja de Sombrero y David para el análisis de tendencias. La distribución espacial entre las tres estaciones es considerablemente uniforme, se encuentran en regiones de condiciones climáticas y geomorfología diferenciadas, disponen de data para ambos parámetros a analizar, y los porcentajes de N/D son los menores. La Figura 1 muestra la ubicación geográfica de las estaciones seleccionadas.

2.3. Análisis de tendencias

Se utilizó el software Climpack para el análisis de tendencias con el fin de reconocer evidencias o indicadores de cambio climático. Para ello fue necesario dar formato a la data meteorológica, realizar un análisis de calidad de la data, y ejecutar el análisis de índices climáticos.

Se ajustó el formato de la data meteorológica al requerido por el software para cada una de las estaciones seleccionadas. Las columnas corresponden al año, mes, día, precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima. En los casos para los que la data era N/D (sin data), el valor fue reemplazado por -99.9, de acuerdo con lo especificado por Climpack [38].

La carga de la data en el software solicita, adicionalmente al archivo con el formato especificado, el nombre de estación, latitud y longitud, y el período base con los años de inicio y fin.

2.3.1. Análisis de calidad de data

Para cada archivo analizado el software realiza inicialmente un análisis de la calidad de la data. El análisis se realiza con los parámetros incluidos en el archivo para precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, y adicionalmente diferencia de temperatura; tanto mensual, como anualmente. También se realizan histogramas de frecuencia y series de tiempo para los tres parámetros.

2.3.2. Análisis de índices climáticos

Una vez verificada la calidad de la data para las estaciones seleccionadas, se realiza el cálculo y gráfico de los índices climáticos. La Tabla 2 muestra los parámetros de entrada para las temperaturas base, número de días consecutivos para un evento y precipitación de referencia. Una vez definidos, se realiza el cálculo de índices climáticos y el reporte de resultados, y determinar tendencias y eventos extremos.

Tabla 2. Parámetros de entrada

Parámetro definido	Valor asignado
d (días)	1
T para HDDheat (°C)	30
T para CDDcold (°C)	8
T para GDDgrow (°C)	22
nn (mm)	15
SPEI/SPI	24

Los valores asignados son: (1) HDDheat máximo histórico de las temperaturas máximas promedio. (2) CDDcold mínimo histórico de las temperaturas mínimas promedio. (3) GDDgrow mínimo histórico de las temperaturas máximas promedio. (4) Rnnmm máximo histórico de las precipitaciones promedio. (5) SPEI/SPI es un valor arbitrario.

2.4. Análisis de desencadenantes de inestabilidades

A partir de eventos conocidos, se identificaron condiciones climáticas asociadas, determinando condiciones desencadenantes de inestabilidad de taludes. Los eventos correspondieron a los huracanes Eta, y Julia;

ocurridos en los años 2016, 2020 y 2022 respectivamente.

Se analizaron los meses contiguos para las fechas 3-4 de noviembre y 7-9 de octubre para la determinación de los eventos extremos; siendo estas las fechas que los huracanes Eta y Julia causaron afectaciones en Tierras Altas.

2.5. Correlación entre data meteorológica y ERA5

El modelo ERA5 presenta un modelo meteorológico desde 1950 hasta la actualidad, debido a su resolución temporal y espacial se realizó una comparación de esta herramienta respecto a la data meteorológica utilizada, en base a la estación de referencia Bajo Grande para el año 2018, siendo este el año con menor porcentaje de data no existente en la última década.

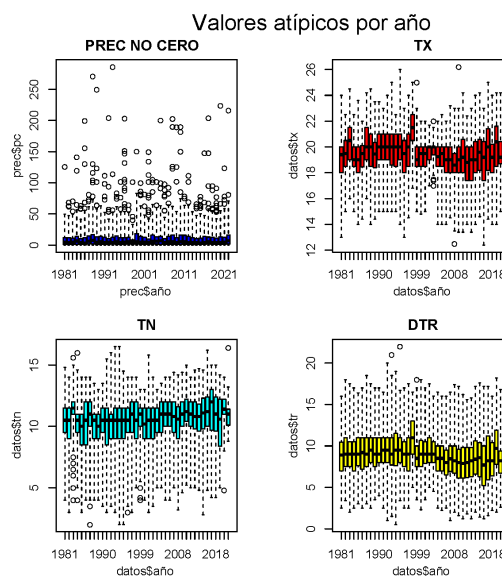


Figura 2. Análisis anual de calidad de data por tipo de parámetro.

Se procesó la data horaria de precipitaciones y temperaturas de ERA5, para obtener las precipitaciones diarias y temperaturas máximas y mínimas. La comparación consistió en una evaluación de cada parámetro para la data meteorológica del IMHPA y el repositorio ERA5 durante los períodos de data meteorológica existente.

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos incluyen el análisis de calidad de la data de las estaciones seleccionadas, el

análisis de índices climáticos y la comparación resultante de la determinación de eventos extremos causantes de inestabilidades.

3.1. Calidad de data por estación

En la tabla 3 se muestran los porcentajes de N/D para precipitación (PR), temperatura máxima (TX) y temperatura mínima (TN).

Tabla 3. Detalles N/D para selección

Est.	Bajo Grande	Los Naranjos	Paja de Sombrero	David	Gualaca II
N/D PR	6.92%	19.87%	2.11%	1.37%	41.53%
N/D TX.	17.63%	28.17%	15.71%	4.29%	57.34%
N/D TN	15.44%	25.16%	10.86%	3.64%	51.19%

3.1.1. Calidad de data en Climpect

En la Figura 2 se muestran los valores atípicos anuales para cada parámetro de la estación Bajo Grande, y para la diferencia de temperatura, el gráfico también permite una vista resumida de las tendencias de los parámetros climáticos de la zona.

3.2. Análisis de tendencias e índices climáticos

Las tendencias se determinaron a partir de los gráficos de los índices para un total de 98 índices distintos: 38 índices únicos, y 60 de períodos anuales y mensuales.

El índice txx mensual indica que hay un ligero aumento histórico en la mayor temperatura máxima diaria, Figura 3. Para el índice tnn mensual el comportamiento indica que hay un aumento histórico relevante en la mayor temperatura mínima diaria, como se muestra en la Figura 4.

Aunque David muestra el comportamiento más evidente, otros índices también muestran comportamientos similares respecto la disminución en la diferencia entre las TX y TN, como en el índice dtr para la Bajo Grande en la Figura 5.

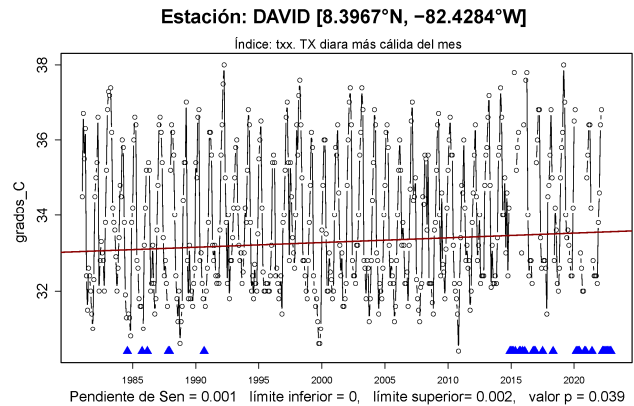


Figura 3. Índice txx para David. Fuente: Gráfico creado por Climpect.

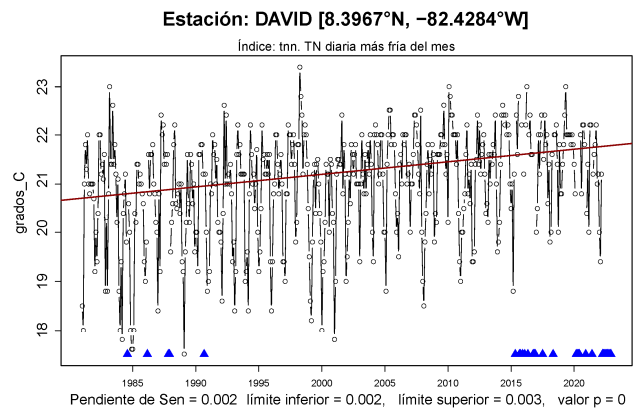


Figura 4. Índice tnn para David. Fuente: Climpect.

3.2.1. Índices de precipitación

El índice preptot indica que hay un aumento histórico en la suma de PR diarias mayores a 1 mm, Figura 6. El índice rx1day indica que hay un ligero aumento histórico en las mayores PR en un día, Figura 7. La estación Paja de Sombrero mostró el mayor valor de PR previo a 1995, sin embargo, en Bajo Grande se presentó una recurrencia mucho mayor en eventos de intensidad desde 1995. Otros índices muestran comportamientos similares al aumento en la frecuencia de PR para ligeros aumentos en la intensidad de lluvia de las estaciones Paja de Sombrero y David.

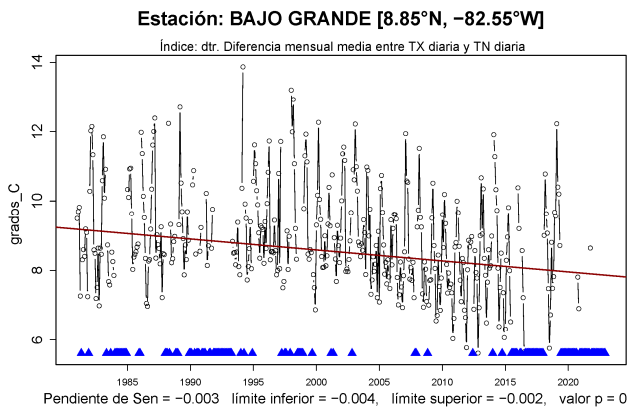


Figura 5. Índice dtr para Bajo Grande. Fuente: Climpect.

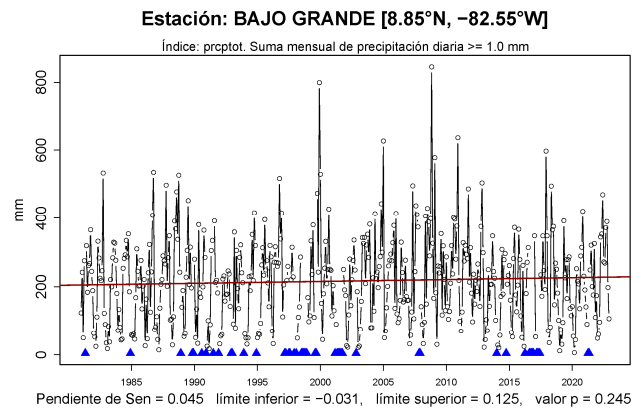


Figura 6. Índice prcptot para Bajo Grande. Fuente: Climpect.

3.3. Determinación de eventos desencadenantes

El huracán Eta para octubre-noviembre de 2020 provocó una disminución de aproximadamente 2°C en las TX/TN, que representaron una diferencia de aproximadamente 7°C entre las TX/TN. La acumulación de PR registró un incremento súbito llegando a 420 y 220 mm de PR para día durante el mes de noviembre, de mayor intensidad de precipitación.

El huracán Julia para septiembre-octubre de 2022 registró una acumulación de PR que súbitamente alcanzo los 390 mm. Las mayores afectaciones de deslizamientos ocurrieron durante las afectaciones provocadas por estos huracanes, la disminución en las diferencias de temperatura tiene una incidencia directa en la respuesta del suelo a las precipitaciones. El incremento en intensidad como en frecuencia mantiene el estado de saturación, impidiendo el drenaje del agua hacia el subsuelo o se evapora.

Para otros períodos de tiempo en que no se presentaron eventos extremos, no se registran afectaciones locales a gran escala para la ocurrencia de deslizamientos; lo cual corresponde al comportamiento y tendencia en los datos analizados, al no mostrar condiciones climáticas destacables para otros períodos durante los meses analizados.

3.4. Correlación entre data meteorológica y ERA5

El año 2018 presentó la menor cantidad de N/D, siendo estos de aproximadamente 10% de la data de ese año. Se obtiene una correlación para la data meteorológica del IMHPA y el modelo ERA5, como se muestra en las figuras 8, 9 y 10.

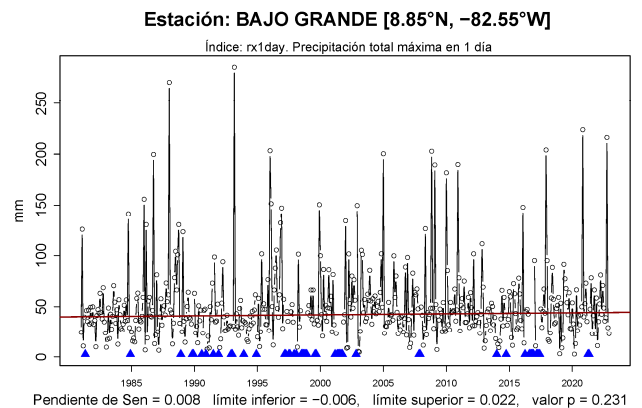


Figura 7. Índice rx1day para Bajo Grande. Fuente: Climpect

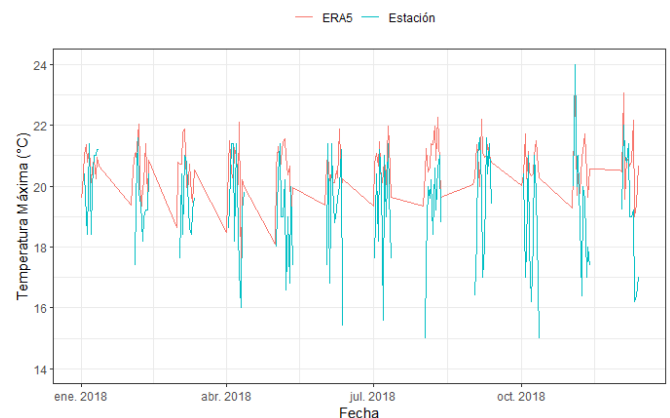


Figura 8. Comparación de temperaturas máximas para Bajo Grande.

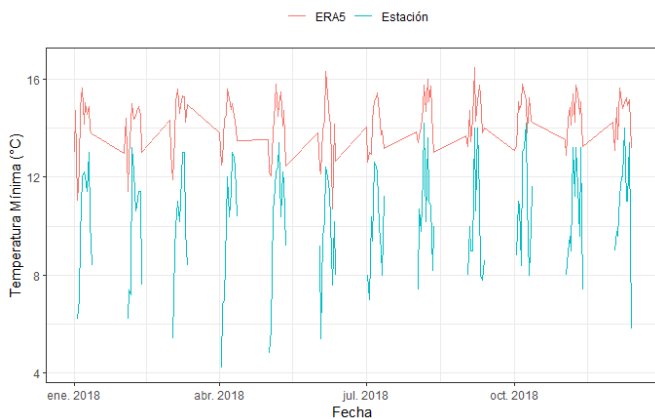


Figura 9. Comparación de temperaturas mínimas para Bajo Grande.

3.5. Comparación entre data local y ERA5

Mediante una comparación entre mediciones para data meteorológica de una estación ATMOS-41 situada en Tierras Altas con data de ERA5 para esas coordenadas, se correlacionó el parámetro de precipitaciones, obteniéndose valores consistentes y tendencias similares para lapsos de tiempo cercanos; como se muestra en la figura 10.

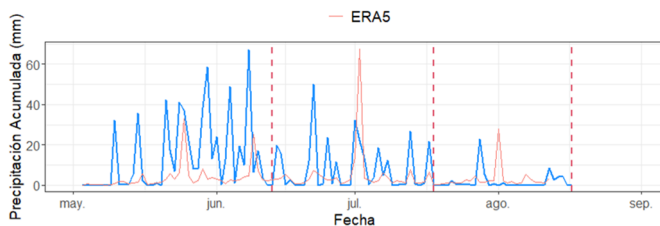


Figura 10. Comparación de precipitaciones acumuladas para Bajo Grande.

Las magnitudes y tendencias, al mostrar comportamientos similares, validan los resultados obtenidos para la data histórica del IMHPA, y por tanto respaldan el uso de ERA5.

3.6. Gestión de riesgo a nivel local

Si bien a nivel nacional existen planes para la gestión de riesgo mediante medidas de prevención y mitigación, en la práctica existe aún un margen de mejora considerable. A nivel local, en el distrito de Tierras Altas; a pesar de las consecuencias de eventos extremos recurrentes anualmente, los planes de gestión de riesgo se limitan a la evacuación y alarma para periodos de lluvias intensas. No existen medidas de prevención como respuesta al monitoreo en campo de deslizamientos o

debido a factores relacionados a la erosión, o un sistema de alerta temprana basado en proyecciones climáticas; las medidas son principalmente reactivas, al intervenir una vez ocurridas las consecuencias y las pérdidas económicas y sociales inevitables mediante el sistema actual.

4. Conclusiones

- La data de campo es la mejor vía para el análisis climático, siendo esta información real sobre la condición del clima, sin embargo, la calidad de la data resulta limitante respecto a la distribución espacial de las estaciones, así como la frecuencia de la data generada. La falta de data de temperatura en un mayor número de estaciones, en comparación a la disponible para precipitaciones, representa una limitación en el análisis de datos climático y la necesidad de data multiparamétrica.
- El efecto de la temperatura afecta el ciclo de secado-mojado del talud, debido a la aparición de grietas de infiltración que permiten la entrada de agua al talud, generando una condición de parcialmente saturada, que deja al talud en un estado de vulnerabilidad a las precipitaciones a causa de las temperaturas elevadas. El cambio de precipitaciones muestra una tendencia a la disminución en las intensidades, y el aumento en la frecuencia de eventos de lluvia.
- La acumulación de los efectos debido al cambio climático en los parámetros de precipitación y temperaturas implica un riesgo en la estabilidad del talud, representando un aumento en la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos. La presencia de grietas de infiltración debido a las temperaturas, junto al aumento en las precipitaciones, la infiltración y las cargas de lluvia ocasionan que eventos de lluvia de menor intensidad ocasionen ruptura en el talud debido a inestabilidad, generando deslizamientos y otro tipo de afectaciones.
- La comparación de la data de campo respecto a ERA5, para los parámetros considerados, sugiere un comportamiento con tendencias similares; que ajustado representaría adecuadamente a la data de campo, lo que implica que el uso del modelo climático es un recurso válido en casos con data deficiente o inexistente, y mejoras de resolución espacial. Se propone el desarrollo de factores de corrección para ajustar la data a márgenes más cercanos a la data de campo de la estación utilizada, mejorando así su precisión.

- Es recomendable extender la correlación entre la data meteorológica y el modelo ERA5, analizando parámetros adicionales como temperatura, humedad, radiación solar, o velocidad del viento; así como mediante la comparación con estaciones locales adicionales, y el cálculo de coeficientes de correlación específicos para cada parámetro. Este enfoque puede lograrse también mediante un análisis de tendencias temporales, buscando variaciones en las tendencias a lo largo del tiempo al identificar la evolución de la correlación en el tiempo; o al analizar los errores, cuantificando las limitaciones de ERA5 al implementar factores de corrección.
- Uno de los principales desafíos en este tipo de estudios es la falta de resolución tanto espacial como temporal; al no contar con una distribución uniforme en la cantidad o localización de las estaciones, o en la cantidad de data histórica existente debido a la falta de data para periodos prolongados de tiempo en ciertas estaciones. La mejora en la resolución de la data permitiría evaluar adecuadamente discrepancias en que el modelo subestima o sobreestima el comportamiento local, realizar interpolaciones para sitios con microclimas similares o la recomendación de nuevas estaciones, o mejoras en la resolución temporal para comprender cambios a corto plazo en los taludes propensos a reactivaciones; contribuyendo a evaluar de manera más precisa los riesgos asociados a cambios climáticos extremos.

AGRADECIMIENTOS

Al IMHPA y al CIHH por la respuesta a la solicitud y a disponer de la data meteorológica para el desarrollo de la investigación. A los miembros del Grupo de Investigación en Ingeniería Geotécnica por el acceso a la data meteorológica local y a la Universidad Tecnológica de Panamá por su colaboración en el desarrollo de esta investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

- Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

Autor	Contribución	Porcentaje
CC	Gestión de data meteorológica externa, análisis de índices	35%

	climáticos, desarrollo del manuscrito.	
PC	Gestión de data meteorológica local, revisión bibliográfica.	20%
JC	Manejo de herramientas SIG.	20%
SR	Planteamiento de la metodología, análisis de resultados, edición del manuscrito.	25%

Todos los autores afirmamos que se leyó y aprobó la versión final de este artículo

REFERENCIAS

- [1] Oficina de Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres, “Informe de Evaluación Regional sobre el Riesgo de Desastres en América Latina y el Caribe,” 2021.
- [2] O. D. Cardona Arboleda, M.L. Carreño Tibaduiza, K.C. Mendes Arraiol, I. Alcántara-Ayala, and S.M. Saito, “Adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países iberoamericanos,” in *2020: Inestabilidad de laderas - deslizamientos.*, McGraw-Hill España, 2020, pp. 419–458.
- [3] T. Bračko, B. Žlender, and P. Jelušič, “Implementation of Climate Change Effects on Slope Stability Analysis,” *Applied Sciences*, Maribor, Aug. 16, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/app12168171>.
- [4] M. Alejandra and P. González, “Umbral empírico de deslizamiento por precipitación, para la provincia de Concepción,” Universidad Bío Bío, Chile, 2014.
- [5] Lynn M. Highland and Peter Bobrowsky, *The Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides*. U.S. Geological Survey Circular, 2008.
- [6] R. L. Schuster and G. F. Wieczorek, “Landslide triggers and types,” in *First European Conference on Landslides*, J. Rybar, J. Stemberk, and P. Wagner, Eds., Prague, Dec. 2002.
- [7] O. Hungr, S. Leroueil, and Picarelli Luciano, “The Varnes classification of landslide types, an update,” *Journal of the International Consortium on Landslides*, 2013.
- [8] D. N. Petley, M. H. Bulmer, and W. Murphy, “Patterns of movement in rotational and translational landslides,” *Geological Society of America*, Aug. 2002, doi:

- [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030%3C0719:POMIRA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030%3C0719:POMIRA%3E2.0.CO;2).
- [9] H. Wang, Y. Cheng Zhang, and H. Ying Hu, "A Study on Relationship of Landslide Occurrence and Rainfall," *Applied Mechanics and Materials*, Oct. 2013. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.438-439.1200>.
- [10] W. Cai *et al.*, "Climate impacts of the El Niño-Southern Oscillation on South America," *Nat Rev Earth Environ*, vol. 1, pp. 215–231, Apr. 2020, doi: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3>.
- [11] O. Y. Canziani Sandra Diaz, E. C. Calvo Max Campos Rodolfo Carcavallo Perú Costa Rica Argentina Carlos Cerri Carlos Gay-García Luis J Mata Andrés Saizar, P. M. Aceituno Rigoberto Andressen Vicente Barros Chile Venezuela Argentina Cabido Humberto Fuenzalida-Ponce Guillermo Funes Cleber Galvao, and A. M. Rosa Moreno Walter Vargas Ernesto F Viglizzo M de Zuviría, "Impactos regionales del cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad," 1997.
- [12] E. J. Palka, "A Geographic Overview of Panama," *Water Science and Technology Library*, vol. 52, Dordrecht, 2005. doi: https://doi.org/10.1007/1-4020-3297-8_1.
- [13] GFDRR and ENV Climate Change Team, "Vulnerability, Risk Reduction and Adaptation to Climate Change," Panama, Apr. 2011.
- [14] IPCC, "Climate change widespread, rapid, and intensifying," Geneva, Aug. 2021. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/2021/08/09/ar6-wg1-20210809-pr/>
- [15] D. Heinz and C. Saavedra, "Analysis of the relationship between landslides and precipitation events in Chiriquí Province, Panama," *Revista de Iniciación Científica*, vol. 5, no. 1, Jul. 2019, doi: <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v5.1.2237>.
- [16] M. Hobeika and A. C. Wagner, "The Impacts of Climate Change on Agriculture in Tierras Altas, Panama and Recommendations for Adaptation: Perspectives of Local Farmers," Cerro Punta, Apr. 2018.
- [17] PAHO, "Initial Donor Alert & Funding Request," Nov. 2020.
- [18] K. Ben Sim, M. Lee Lee, and S. Yee Wong, "A review of landslide acceptable risk and tolerable risk," *Geoenvironmental Disasters*, vol. 9, no. 3, Jan. 2022, doi: <https://doi.org/10.1186/s40677-022-00205-6>.
- [19] O. D. Cardona Arboleda, M. L. Carreño Tibaduiza, K. C. Mendes Arraiol, I. Alcántara-Ayala, and S. Midori Saito, "Slope Instability and Landslides. In: Adaptation to Climate Change Risks in Ibero-American Countries," Madrid, 2020.
- [20] R. Pacheco Quevedo, A. Velastegui-Montoya, N. Montalván-Burbano, F. Morante-Carballo, O. Korup, and C. Daleles Rennó, "Land use and land cover as a conditioning factor in landslide susceptibility: a literature review," *Landslides*, pp. 967–982, Feb. 13, 2023. doi: <https://doi.org/10.1007/s10346-022-02020-4>.
- [21] A. Stokes *et al.*, "Ecological mitigation of hillslope instability: ten key issues facing researchers and practitioners," *Plant and Soil*, pp. 1–23, Mar. 11, 2014. doi: <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2044-6>.
- [22] PREDECAN, "Apoyo a la Prevención de Desastres en la Comunidad Andina," 2006.
- [23] Andean Community Commission, "Andean Strategy for Disaster Risk Management," comunidadandina.org, Lima, Lima, May 2017.
- [24] P. Shi *et al.*, "Disaster Risk Science: A Geographical Perspective and a Research Framework," vol. 11, pp. 426–440, Aug. 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s13753-020-00296-5>.
- [25] Gabinete de Gestión Integral de Riesgos y Desastres, "Plan Estratégico Nacional de Gestión Integral del Riesgo de Desastres de Panamá 2022 - 2030," Panamá, 2022.
- [26] INEC, "Meteorología." Accessed: Nov. 15, 2023. [Online]. Available: https://www.inec.gob.pa/publicaciones/Default2.aspx?ID_CATEGORIA=2&ID_SUBCATEGORIA=4
- [27] CIHH, "Servicios Prestados por el CIHH." [Online]. Available: <https://cihh.utp.ac.pa/servicios-prestados-por-el-cihh>
- [28] IMHPA, "Datos climáticos históricos." [Online]. Available: <https://www.imhpa.gob.pa/es/clima-historicos>

- [29] IPCC, “Climatic Impact-driver and Extreme Indices,” Cambridge, 2021. doi: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.020>.
- [30] Abdoul Aziz Barry, “Climate change analysis for Guinea Conakry with homogenized daily dataset,” University Rovira i Virgili, Tarragona, Spain, 2015.
- [31] A. A. Shawul and S. Chakma, “Trend of extreme precipitation indices and analysis of long-term climate variability in the Upper Awash basin, Ethiopia,” *Theoretical and Applied Climatology* 140, pp. 635–652, Jan. 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03112-8>.
- [32] R. J. Dunn, M. g Donat, and L. V Alexander, “Comparing extremes indices in recent observational and reanalysis products,” vol. 4, 2022, doi: <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.989505>.
- [33] M. Chiarle, M. Geertsema, G. Mortara, and J. Clague, “Relations between climate change and mass movement: Perspectives from the Canadian Cordillera and the European Alps,” *Glob Planet Change*, vol. 202, no. 103499, 2021.
- [34] A. Dille, F. Kervyn, T. Mugaruka Bibentyo, D. Delvaux, and et all., “Causes and triggers of deep-seated hillslope instability in the tropics – Insights from a 60-year record of Ikoma landslide (DR Congo),” *Geomorphology*, vol. 345, no. 106835, 2019.
- [35] M. Dehn, G. Bürger, J. Buma, and P. Gasparetto, “Impact of climate change on slope stability using expanded downscaling,” *Eng Geol*, vol. 55, no. 3, pp. 193–204, 2000.
- [36] L. Chen, L. Mei, B. Zeng, K. Yin, D. P. Shrestha, and J. Du, “Failure probability assessment of landslides triggered by earthquakes and rainfall: a case study in Yadong County, Tibet, China,” *Sci Rep*, vol. 10, no. 1, Dec. 2020, doi: [10.1038/s41598-020-73727-4](https://doi.org/10.1038/s41598-020-73727-4).
- [37] F. Zennaro, E. Furlan, C. Simeoni, S. Torresan, and et all, “Exploring machine learning potential for climate change risk assessment,” *Earth Sci Rev*, vol. 220, no. 103752, 2021.
- [38] N. Herold and L. Alexander, “Climpact 2,” *A software tool for calculating climate extremes indices. Dostupné na <https://www.r-project.org>*, 2016.