



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**IMPACTO DE LAS PRECIPITACIONES EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN
LOS ANDES DEL SUR DEL ECUADOR**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Civil

AUTOR: DENNIS FABIAN LALBAY LALVAY

TUTOR: ING. VICENTE MAURICIO IÑIGUEZ MORÁN, PhD.

Cuenca - Ecuador

2024

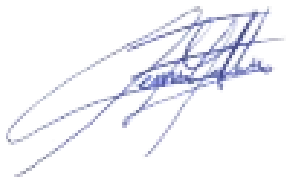
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Dennis Fabian Lalbay Lalvay con documento de identificación N° 0150218766, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 11 de enero del 2024

Atentamente,



Dennis Fabian Lalbay Lalvay

0150218766

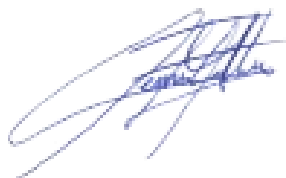
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Dennis Fabian Lalbay Lalvay con documento de identificación N° 0150218766, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto de investigación: “Impacto de las precipitaciones en la estabilidad de taludes en los Andes del Sur del Ecuador”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 11 de enero del 2024

Atentamente,



Dennis Fabian Lalbay Lalvay

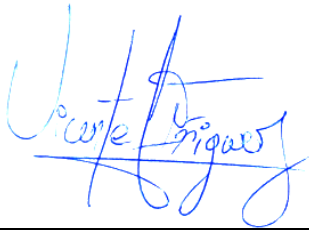
0150218766

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Vicente Mauricio Iñiguez Morán con documento de identificación N° 0102687191, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: IMPACTO DE LAS PRECIPITACIONES EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN LOS ANDES DEL SUR DEL ECUADOR, realizado por Dennis Fabian Lalbay Lalvay con documento de identificación N° 0150218766, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto de investigación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 11 de enero del 2024

Atentamente,



Ing. Vicente Mauricio Iñiguez Morán, PhD.

0102687191

Dedicatoria

Al autor y consumidor de mi vida, quien me ha dado todo conocimiento y sabiduría para poder desenvolverme en esta maravillosa etapa de mi vida, Dios.

A mis amados padres, Hugo Giovanni Lalbay Lalbay y Nieves Hortencia Lalvay Lalvay, por su apoyo, consejos, comprensión, amor, sacrificio y ayuda en los momentos más difíciles, por brindarme los recursos necesarios para llevar a cabo mis sueños. Me han brindado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi perseverancia, mi empeño, mi creatividad y mi coraje para conseguir mis objetivos.

A mi hermano, Michael Alexander Lalbay Lalbay quién en varias ocasiones ha sido mi cómplice de risas y mi apoyo en varios desánimos, que sepa que sus palabras de orgullo hacia mí me han devuelto la esperanza en diferentes circunstancias adversas.

A mis amigos, que siempre han estado ahí con una palabra de aliento, este éxito también es para ustedes, y a una persona especial que ha sido mi gran apoyo, una gran amiga y la más optimista en el desarrollo de este proyecto, anhelo que podamos compartir de los resultados.

Finalmente, este logro me lo dedico a mí mismo, por todas esas noches sin dormir, por las horas en las que el estrés parecía ganarme, por todos los dolores de cabeza, por las veces en las que no me sentía capaz, por las veces donde quise dejar ahí todo, pero me armé de valor para seguir, por luchar por mis sueños y por cada experiencia vivida. Ha sido una experiencia maravillosa.

Agradecimientos

Agradezco principalmente a Dios, por su amor incondicional y ser mi guía en el desarrollo de esta carrera, sobre todo por permitirme culminarla. Él ha sido mi sustento y nunca me ha dejado solo.

A mis padres, Hugo Giovanni Lalbay Lalbay y Nieves Hortencia Lalvay Lalvay, su amor hacía mí y su sacrificio han brindado sus frutos, ustedes son el cimiento de este éxito y sobre todo de mi vida. Les agradezco por ser mis ejemplos de perseverancia, humildad y de un amor inquebrantable.

A mi hermano Michael Alexander Lalbay Lalbay, por todo su apoyo y aliento, aun sin palabras me sentía respaldado por su confianza en mí. Gracias por compartir cada paso de este camino conmigo, los mejores éxitos para ti.

A mis abuelitas, mi abuelo, tíos, primos, cuyas palabras de aliento siempre estuvieron presentes, gracias por creer en mí. Han sido una maravillosa inspiración.

A mi tutor de tesis, Ing. Vicente Iñiguez, su paciencia, su compromiso, su dirección y sobre todo su bondad han sido pieza clave en el desarrollo de este proyecto. Agradezco en verdad su dedicación y sus aportes que han sido valiosos para mí, incluso llevándome a imaginar el impacto de este trabajo. Todo eso me ha ayudado a darle forma a este proyecto de titulación.

A mis maravillosos amigos, en verdad es una dicha contar con su amistad y sobre todo con su comprensión en este tiempo, agradezco su amistad incondicional, me han hecho más ligero el camino. Gracias también a quien se ha desvelado conmigo dándome ánimo siempre.

A mis maravillosas mascotas Rolly (+) y Niko, quienes siempre me han hecho compañía en el desarrollo de todos mis trabajos académicos.

Resumen

El objetivo del presente proyecto fue realizar un análisis de los datos históricos de precipitación en una cuenca hidrográfica del Austro Ecuatoriano. Los datos de precipitación son de vital importancia para analizar el impacto de las precipitaciones sobre los deslizamientos superficiales. Incluso ayudan a velar por la integridad de las personas. Esto por medio del análisis de las bases de datos de precipitaciones en zonas vulnerables a deslizamientos, como es el caso de la cuenca del río Cumbe.

Con la existencia de datos de origen satelital parece que fuera más fácil desarrollar de forma rápida y precisa estudios de precipitaciones sobre cualquier región donde uno se platease un proyecto. Es así que, en el presente estudio se tomaron en cuenta los datos brindados por CHELSA-EarthEnv, cuya resolución espacial es de 1 km x 1 km; y, los valores registrados por estaciones pluviométricas existentes en el área de estudio. Para esto se consideró una grilla de 50 puntos o 50 km² de CHELSA-EarthEnv que abarcó toda la cuenca hidrográfica del río Cumbe.

El estudio se enfocó a verificar la fiabilidad de la información satelital realizando una comparación entre las dos fuentes de información. Los resultados revelan una mayor correlación entre los datos de origen satelital y físicos durante los meses de agosto, septiembre, octubre y mayo. Es decir, la mayor parte de la información no tiene afinidad entre sus valores. Los datos correspondientes al mes de mayo de la estación pluviométrica Cumbe medio junto con CHELSA-EarthEnv, permitieron analizar un deslizamiento ocurrido sobre el área de estudio en el año 2010. Determinando que el historial de lluvias previo al día del deslizamiento provocó el movimiento superficial de tierra en un suelo de características antropogénicas.

Palabras Clave: Tormentas de lluvia, Deslizamientos superficiales, Andes del Sur del Ecuador, Datos satelitales de precipitaciones, Datos de pluviómetros.

Abstract

The objective of this project was to conduct an analysis of historical precipitation data in a hydrographic basin in the Southern Ecuadorian region. Precipitation data are crucial for assessing the impact of rainfall on surface landslides, contributing to the safeguarding of individuals. This is achieved through the analysis of precipitation databases in areas prone to landslides, as exemplified by the Cumbe River basin.

With the availability of satellite-derived data, it appears that the rapid and accurate development of precipitation studies in any region where a project is contemplated would be facilitated. In this study, data provided by CHELSA-EarthEnv were considered, with a spatial resolution of 1 km x 1 km, along with values recorded by existing pluviometric stations in the study area. A grid of 50 points or 50 km² from CHELSA-EarthEnv was employed, covering the entire hydrographic basin of the Cumbe River.

The study focused on verifying the reliability of satellite-derived information through a comparison with data from physical sources. The results reveal a higher correlation between satellite-derived and physical data during the months of August, September, October, and May. In other words, the majority of the information lacked consistency in their values. The data for the month of May from the Cumbe medio pluviometric station, in conjunction with CHELSA-EarthEnv, enabled the analysis of a landslide that occurred in the study area in 2010. It was determined that the rainfall history prior to the day of the landslide caused the superficial movement of soil in a region with anthropogenic characteristics.

Keywords: Rainstorms, Surface landslides, Southern Andes of Ecuador, Satellite precipitation data, Pluviometric data.

Índice

1.	Introducción.....	14
2.	Antecedentes.....	19
2.1.	<i>Importancia y Alcance</i>	19
2.2.	<i>Revisión de Literatura</i>	19
2.2.1.	Nomenclatura de un Talud.....	19
2.2.2.	Tipos de Falla en Taludes.....	21
2.2.3.	Temporadas de Mayor Riesgo.....	21
2.2.4.	Efectos del Agua en un Talud.....	22
2.2.5.	Velocidad de Infiltración.....	23
2.2.6.	Activación de Deslizamientos por Lluvias.....	23
2.2.7.	Precipitación en Ecuador.....	24
2.2.8.	Precipitaciones Extremas.....	24
2.2.9.	Umbrales de Precipitación.....	29
3.	Objetivos.....	30
3.1.	<i>Objetivo General</i>	30
3.2.	<i>Objetivos Específicos</i>	30
4.	Materiales y Métodos.....	31
4.1.	<i>Materiales</i>	31
4.1.1.	CHELSEA-EarthEnv.....	31
4.1.2.	ArcMap.....	31
4.1.3.	Programa Excel.....	32
4.1.4.	Archivos DEM.....	32
4.1.5.	Datos de Precipitación.....	32
4.1.6.	Datos Previos Estaciones Pluviométricas.....	34
4.2.	<i>Métodos</i>	34
4.2.1.	Corrección de Unidades.....	34
4.2.2.	Método Gráfico.....	35
4.2.3.	Consideraciones Especiales.....	35
5.	Paquete de Trabajo 1.....	36
5.1.	<i>Área de Estudio</i>	36
5.2.	<i>Delimitación del Área de Estudio</i>	37
6.	Paquete de Trabajo 2.....	38

6.1.	<i>Aplicación del Programa</i>	38
6.2.	<i>Organización de Valores de Precipitación</i>	40
6.3.	<i>Representación de Precipitaciones de Forma Diaria</i>	41
6.4.	<i>Representación de Precipitaciones de Forma Mensual</i>	48
6.5.	<i>Representación de Precipitaciones de Forma Anual</i>	55
6.6.	<i>Comparaciones Entre Datos de Lluvia Provenientes de Satélites y de Pluviómetros</i> ..	56
6.7.	<i>Acumulación de Precipitaciones Sobre la Zona de Estudio</i>	70
6.8.	<i>Análisis de Tormentas</i>	72
7.	Resultados.....	79
8.	Conclusiones.....	94
9.	Recomendaciones	96
10.	Bibliografía	98
11.	Anexos	102

Índice de gráficos

Imagen 1 Nomenclatura de Taludes y Laderas	20
Imagen 2 Ciclo del agua	22
Imagen 3 Ubicación de la zona de estudio.....	37
Imagen 4 Mapa con estaciones pluviométricas	38
Imagen 5 Precipitación diaria - Año 2009-Cumbe Alto.....	42
Imagen 6 Precipitación diaria - Año 2009-Cumbe Medio	42
Imagen 7 Precipitación diaria - Año 2009-Cumbe Bajo.....	43
Imagen 8 Precipitación diaria - Año 2010-Cumbe Alto.....	43
Imagen 9 Precipitación diaria - Año 2010-Cumbe Medio	44
Imagen 10 Precipitación diaria - Año 2010-Cumbe Bajo.....	44
Imagen 11 Precipitación diaria - Año 2011-Cumbe Alto.....	45
Imagen 12 Precipitación diaria - Año 2011-Cumbe Medio	45
Imagen 13 Precipitación diaria - Año 2011-Cumbe Bajo	46
Imagen 14 Precipitación diaria - Año 2012-Cumbe Alto.....	46
Imagen 15 Precipitación diaria - Año 2012-Cumbe Medio	47
Imagen 16 Precipitación diaria - Año 2012-Cumbe Bajo.....	47
Imagen 17 Precipitación mensual - Año 2009 – Cumbe Alto.....	48
Imagen 18 Precipitación mensual - Año 2009 – Cumbe Medio	49
Imagen 19 Precipitación mensual - Año 2009 – Cumbe Bajo	49
Imagen 20 Precipitación mensual - Año 2010 – Cumbe Alto.....	50
Imagen 21 Precipitación mensual - Año 2010 – Cumbe Medio	50
Imagen 22 Precipitación mensual - Año 2010 – Cumbe Bajo	51
Imagen 23 Precipitación mensual - Año 2011 – Cumbe Alto.....	51
Imagen 24 Precipitación mensual - Año 2011 – Cumbe Medio	52
Imagen 25 Precipitación mensual - Año 2011 – Cumbe Bajo	52
Imagen 26 Precipitación mensual - Año 2012 – Cumbe Alto.....	53
Imagen 27 Precipitación mensual - Año 2012 – Cumbe Medio	53
Imagen 28 Precipitación mensual - Año 2012 – Cumbe Bajo	54
Imagen 29 Precipitación anual - Cumbe alto.....	55
Imagen 30 Precipitación anual - Cumbe medio.....	55
Imagen 31 Precipitación anual - Cumbe bajo	56
Imagen 32 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2009 Diario Cumbe Alto	57
Imagen 33 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2009 Diario Cumbe Medio	57
Imagen 34 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2009 Diario Cumbe Bajo	58
Imagen 35 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2010 Diario Cumbe Medio	58
Imagen 36 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2010 Diario Cumbe Medio	59
Imagen 37 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2010 Diario Cumbe Bajo.....	59
Imagen 38 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2011 Diario Cumbe Alto.....	60
Imagen 39 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2011 Diario Cumbe Medio	60
Imagen 40 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2011 Diario Cumbe Bajo	61
Imagen 41 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2012 Diario Cumbe Alto	61
Imagen 42 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas 2012 Diario Cumbe Medio	62

Imagen 43 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2012 Diario Cumbe Bajo	62
Imagen 44 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2009 Mensual Cumbe Alto	63
Imagen 45 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2009 Mensual Cumbe Medio	63
Imagen 46 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2009 Mensual Cumbe Bajo	64
Imagen 47 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2010 Mensual Cumbe Alto	64
Imagen 48 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2010 Mensual Cumbe Medio	65
Imagen 49 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2010 Mensual Cumbe Bajo	65
Imagen 50 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2011 Mensual Cumbe Alto	66
Imagen 51 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2011 Mensual Cumbe Medio.....	66
Imagen 52 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2011 Mensual Cumbe Bajo	67
Imagen 53 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2012 Mensual Cumbe Alto	67
Imagen 54 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2012 Mensual Cumbe Medio	68
Imagen 55 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2012 Mensual Cumbe Bajo	68
Imagen 56 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-Anual Cumbe Alto	69
Imagen 57 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-Anual Cumbe Medio	69
Imagen 58 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-Anual Cumbe Bajo	70
Imagen 59 Acumulación de precipitación - Pt1	71
Imagen 60 Acumulación de precipitación – Pt2	71
Imagen 61 Análisis de Tormenta > 8 mm - Pt1	72
Imagen 62 Análisis de Tormenta > 8 mm - Pt2.....	72
Imagen 63 Tormenta 25-02-2010.....	73
Imagen 64 Tormenta 02-05-2010.....	73
Imagen 65 Tormenta 01-06-2010.....	74
Imagen 66 Tormenta 09-07-2010.....	74
Imagen 67 Tormenta 23-12-2010.....	75
Imagen 68 Tormenta 06-02-2011	75
Imagen 69 Tormenta 15-02-2011	76
Imagen 70 Tormenta 03-04-2011	76
Imagen 71 Tormenta 30-04-2011	77
Imagen 72 Tormenta 16-05-2011	77
Imagen 73 Tormenta 03-06-2011	78
Imagen 74 Tormenta 07-11-2011	78
Imagen 75 Comparación más cercana - Estación cumbe bajo.....	80
Imagen 76 Deslizamiento 10-05-2010.....	81
Imagen 77 Mapa 15 días antes del deslizamiento.....	82
Imagen 78 Lluvia 15 días antes del deslizamiento	83
Imagen 79 Mapa 13 días antes del deslizamiento.....	84
Imagen 80 Lluvia 13 días antes del deslizamiento	85
Imagen 81 Mapa 11 días antes del deslizamiento.....	86
Imagen 82 Lluvia 11 días antes del deslizamiento	87
Imagen 83 Mapa 08 días antes del deslizamiento.....	88
Imagen 84 Lluvia 08 días antes del deslizamiento	89
Imagen 85 Mapa 02 días antes del deslizamiento.....	90

Imagen 86 Lluvia 02 días antes del deslizamiento	91
Imagen 87 Día del deslizamiento.....	92
Imagen 88 Lluvias durante el deslizamiento del 10-05-2010.....	93
Imagen 89 Antes y después del deslizamiento.....	94

Índice de tablas

Tabla 1 Información del CHELSEA-EarthEnv.....	39
Tabla 2 Información ordenada	40
Tabla 3 Información de pluviómetros existentes	41
Tabla 4 Caracterización de tormentas	79
Tabla 5 Caracterización de lluvias que influencia el deslizamiento	91

Índice de ecuaciones

1 Ecuación de densidad.....	35
2 Ecuación para pasar las unidades a mm/día.....	35

1. Introducción

El agua es una sustancia con propiedades únicas que tiene un profundo significado para la vida y es el más abundante en la naturaleza. Además, desempeña un papel crucial en diferentes procesos físicos, químicos y biológicos que rigen el entorno natural. Aunque su fórmula química, H₂O, parece sencilla, esta sustancia es la característica principal de las vastas masas que cubren el 71% de la superficie terrestre, como los océanos, los casquetes polares, los glaciares y las aguas superficiales y subterráneas. Estas masas de agua son las que conforman la hidrósfera (Sánchez et al., 2001).

Para que el agua abarque todo lo mencionado, sigue un ciclo hidrológico propio, que representa un proceso de circulación por los compartimentos de la hidrósfera. En este equilibrado sistema que tiene el agua, se encuentran las precipitaciones, también llamadas lluvias. En Ecuador, el invierno (temporada de lluvias) ocupa la mitad del año, variando un poco entre las regiones.

En la región de los Andes, se presentan dos temporadas de lluvias. Una ocurre desde febrero hasta mayo, caracterizada por lluvias intensas y abundantes. La segunda temporada lluviosa tiene lugar entre octubre y noviembre, siendo más suave y menos frecuente. Durante los meses de junio a septiembre se registra una estación seca muy marcada, mientras que la estación seca de diciembre a enero es menos severa. La cantidad total de precipitación varía generalmente entre 700 y 1500 mm. En la cuenca andina, el promedio anual de precipitación es de alrededor de 500 mm.

En contraste, en las áreas ubicadas a altitudes superiores a los 3500 metros sobre el nivel del mar, son comunes las neblinas y las lluvias suelen ser prolongadas y de baja intensidad. Los patrones anuales de precipitación en la Región Andina del Ecuador se ven fuertemente afectados

por las variaciones en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), así como por la presión atmosférica baja en medio de extensas corrientes de masas de aire continental al norte y al sur de la línea ecuatorial. Esto se asocia con la presencia de nubosidad y lluvias intensas (Farfán, 2018)

Las fuertes lluvias pueden llegar a generar tres grandes peligros: las inundaciones, los torrentes y los deslaves, siendo este último uno de los que más podemos visualizar en Ecuador (CNC, 2023). Tan solo en la época invernal del 2023 se han producido alrededor de 1790 emergencias, según el ECU-911.

De este valor, el 38% corresponde a deslizamientos provocados por intensas lluvias. Solo en marzo, según el ministro del ramo, Diego Herrera, Ecuador recibió 662 mm de lluvia, el doble del promedio de los últimos 15 años. El ministerio de transporte señala que en todo el país se han registrado 359 derrumbes, lo que ha motivado el cierre constante de varias vías, dejando sin conexiones viales a diferentes provincias, y afectando la economía de estas (Primicias, 2023).

La mayoría de los deslizamientos del país se deben a lluvias y características propias del suelo, como granulometría, cohesión, ángulo de rozamiento interno, permeabilidad, geometría, pendiente, entre otros. Los problemas del suelo en Ecuador por las altas precipitaciones avanzan alarmantemente en especial en el Callejón Interandino, donde hay extensas áreas improductivas por el fenómeno. Existen varios factores responsables de este hecho, sin embargo, como se mencionó anteriormente, el agua es uno de los principales agentes erosivos que causan inestabilidad en el suelo (Taypanta J., 1993).

Estos movimientos de tierra pueden generar corrientes de escombros o lodo, que se desplazan con mucha rapidez a niveles tan alarmantes que representan un riesgo debido a su

velocidad y cantidad. Ha habido informes de corrientes de escombros que alcanzan velocidades superiores a 160 kilómetros por hora (IFRC, 2023).

Según (Xu et al., 2014), los deslizamientos de tierra son eventos geológicos frecuentes que resultan en un elevado número de víctimas y considerables pérdidas económicas a nivel global. Últimamente, muchos investigadores se han centrado entre los movimientos de las capas de roca blanda y de roca dura, la roca blanda se erosionará poco a poco y acabará convirtiéndose en un material intercalado blando. La resistencia al corte de la capa intermedia blanda es muy baja, especialmente bajo la influencia del agua subterránea, donde la resistencia al corte de la capa intermedia blanda puede reducirse casi a cero. Por lo tanto, esta capa intermedia blanda se convertirá en la superficie de deslizamiento potencial del corrimiento de tierras.

Estos deslizamientos de lodo se originan cuando el agua se acumula rápidamente en el suelo, provocando un repentino aumento de rocas, tierra y desechos saturados de agua. Por lo general, estos eventos comienzan en áreas con pendientes pronunciadas y pueden ser desencadenados por desastres naturales. Las zonas empinadas afectadas por incendios forestales o modificaciones en el paisaje realizadas de forma antrópica, donde se ha eliminado la vegetación, son particularmente propensas a experimentar deslizamientos de tierra durante y después de las lluvias (CDC, 2019). La configuración de las pendientes ejerce una significativa influencia en el proceso de erosión del suelo (Shen et al., 2023).

Los cambios que producen estos deslizamientos se ven reflejados en las propiedades del suelo, ya que estos tienen una alteración muy significativa, causado por el corrimiento de tierras dando como resultado la eliminación parcial o completa de la capa orgánica, lo cual reduce la fertilidad en la zona donde se presentan estos sucesos (Wilcke et al., 2003). Recientemente, los cambios climáticos han provocado condiciones meteorológicas más extremas, como lluvias

torrenciales y sequías. Por lo tanto, se espera que los cambios climáticos produzcan mayores variaciones en las características de infiltración y las posiciones del nivel freático en los taludes (Schnellmann et al., 2010).

Entre los gastos más considerables en la construcción y el mantenimiento de carreteras se encuentran los costos asociados con los cortes de carretera, los taludes de los terraplenes y las plataformas. Mantener su estabilidad a lo largo del tiempo asegura la preservación de la geometría y la capacidad de tránsito de la carretera. Durante el periodo de diseño de la carretera, los taludes enfrentan diversos esfuerzos, incluyendo aquellos naturales como la carga del suelo, así como eventos sísmicos e hidrometeorológicos. La presión generada por la actividad humana abarca tanto la utilización rutinaria como las cargas adicionales. Dentro de los factores hidrometeorológicos, las lluvias son particularmente significativas, ya que desequilibran las laderas de los cortes y los bordes de los terraplenes, facilitando la ocurrencia de flujos de detritos y deslizamientos que pueden causar interrupciones totales o parciales en el tráfico de una red de carreteras. En ocasiones, los deslizamientos masivos pueden golpear a los vehículos, comprometiendo la vida de sus ocupantes. Los deslizamientos de taludes y terraplenes son principalmente fenómenos de escala local que interrumpen las carreteras año tras año, especialmente durante las estaciones invernales y/o lluviosas. Como consecuencia, el coste de recuperación acumulado aumenta con el tiempo. En terraplenes y laderas donde los suelos no están saturados y tienen una alta capacidad de infiltración, las lluvias tienen el potencial de incrementar la carga del suelo, lo que podría resultar en deslizamientos (Jiménez-Ramos et al., 2023).

Las carreteras en Ecuador enfrentan frecuentes interrupciones de tráfico debido a deslizamientos en laderas y taludes. El término "talud" se utiliza de manera genérica para referirse a cualquier superficie inclinada con respecto a la horizontal que deba sostener permanentemente

masas de tierra. Los taludes, estructuras construidas con tierra a ambos lados de la carretera (ya sea en excavaciones o terraplenes), deben tener inclinación que garantice la estabilidad de la obra. Se puede considerar que estos taludes son las estructuras más complejas en las carreteras, por lo que es crucial analizarlos exhaustivamente y establecer criterios de estabilidad (Revelo Burgos, 2008).

A causa de estos factores, este proyecto se centrará en identificar los desafíos relacionados con la estabilidad del suelo, poniendo especial énfasis en la interacción entre el suelo y el agua en una región específica de la parroquia rural de Cumbe. El objetivo es comprender a fondo la dinámica real de la interacción entre el agua y el suelo en la zona de estudio basándonos en datos de precipitaciones existentes.

Para analizar esto de una manera óptima vamos a hacer uso de los límites pluviométricos que se basan en las relaciones intensidad-duración que permiten distinguir las precipitaciones que pueden desencadenar o no los deslizamientos (Marin et al., 2021). Esta información nos da una guía para desenvolver este trabajo de la mejor manera. Además, nos da la facilidad de desarrollarlo sin inconvenientes debido a la escasez de datos de la cuenca hidrográfica perteneciente a este cantón.

El análisis hidrológico en esta parroquia nos posibilitará determinar los parámetros esenciales para evaluar la estabilidad del suelo y reconocer los umbrales de precipitación antes de que el nivel freático se sature y desencadene deslizamientos, específicamente en la Región Andina Ecuatoriana. El propósito es establecer medidas de control que reduzcan los riesgos y aseguren el funcionamiento efectivo de cualquier estructura que se pretenda construir en esta área, así como salvaguardar la calidad de vida de los residentes en dicha zona.

2. Antecedentes

2.1. Importancia y Alcance

El motivo de este estudio consolida aportar a esta parroquia estudios propios del lugar referentes a la cantidad de lluvias que se exponen anualmente. Para esto se requiere conocer los datos de precipitaciones, la geodinámica natural con respecto al agua, las actividades y acciones antrópicas del pasado y del presente y los datos hidrológicos respectivos.

La presente investigación trata de un proceso de recopilación teórica de los diferentes fundamentos hidrológicos.

Todo el trabajo se proyecta para transferir conocimientos y fortalecer capacidades de análisis frente a situaciones similares, será muy útil como alternativa viable dentro del área de mantenimiento de vías terrestres y la conservación de suelos para construcciones cercanas al sector, por ventajas técnicas, económicas y estéticas.

Se cree importante mencionar que se concientice a la comunidad mediante esta investigación, sobre los riesgos que se puede tener con la construcción de edificaciones en zonas no estables, donde el agua satura los suelos provocando que entren en un estado no apto.

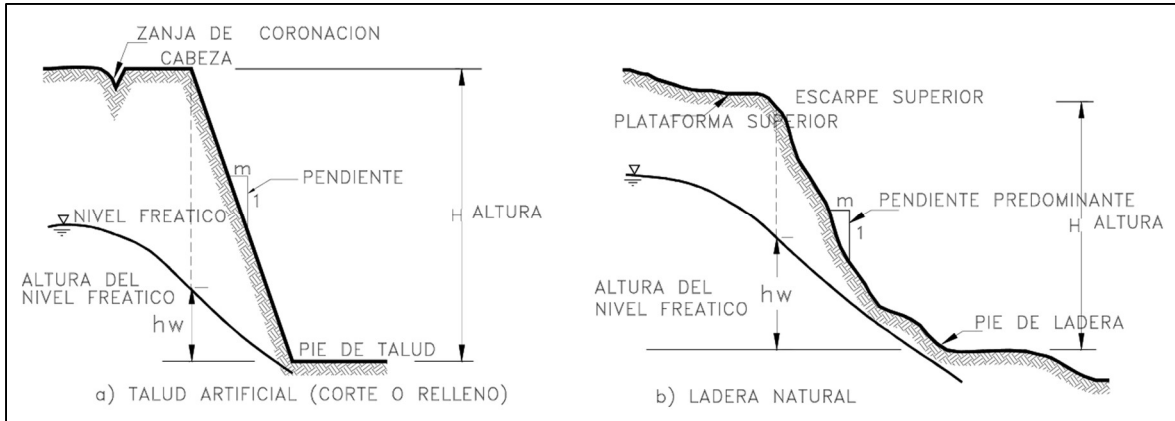
2.2. Revisión de Literatura

2.2.1. Nomenclatura de un Talud

Un talud o ladera se refiere a una extensión de tierra que carece de una superficie completamente plana, sino que exhibe una inclinación o variaciones de altura considerables. Dentro de la literatura especializada, se utiliza el término "ladera" para describir aquellos casos en

los que su forma actual es resultado de procesos naturales, mientras que se emplea el término "talud" cuando ha sido creado artificialmente.

Imagen 1 Nomenclatura de Taludes y Laderas



Fuente: (Suárez Díaz, 1998)

En un talud se definen los siguientes elementos básicos en base a la Imagen 1:

1. Altura

La separación vertical entre la base y la cima es fácilmente determinada en pendientes artificiales, pero resulta complicada de medir en pendientes naturales, ya que la base y la cima no son rasgos topográficos claramente definidos.

2. Pie

Esto indica el punto en el que la pronunciada inclinación de la parte inferior experimenta un cambio significativo.

3. Cabeza o pendiente

Evidencia una modificación abrupta en la inclinación en la parte superior.

4. Altura de nivel freático

La distancia vertical desde la base de una pendiente o talud, medida en relación con el nivel del agua.

5. Pendiente

La inclinación se puede calcular utilizando diversas unidades de medida, tales como grados, porcentajes o la relación m/1, donde "m" denota la distancia horizontal en relación con la unidad de distancia.

2.2.2. Tipos de Falla en Taludes

La categorización de los distintos tipos de fallas en los taludes se fundamenta en la comprensión de los factores hidrogeológicos que influyen en la aparición de la falla. Los deslizamientos en los taludes se producen de diversas maneras y aún persiste la incertidumbre en cuanto a su capacidad de predicción, velocidad de ocurrencia y área afectada. Sin embargo, se han identificado patrones que facilitan la identificación y el reconocimiento de áreas potenciales de fallas, lo que permite tomar medidas para eliminar o minimizar el riesgo de colapso del talud.

2.2.3. Temporadas de Mayor Riesgo

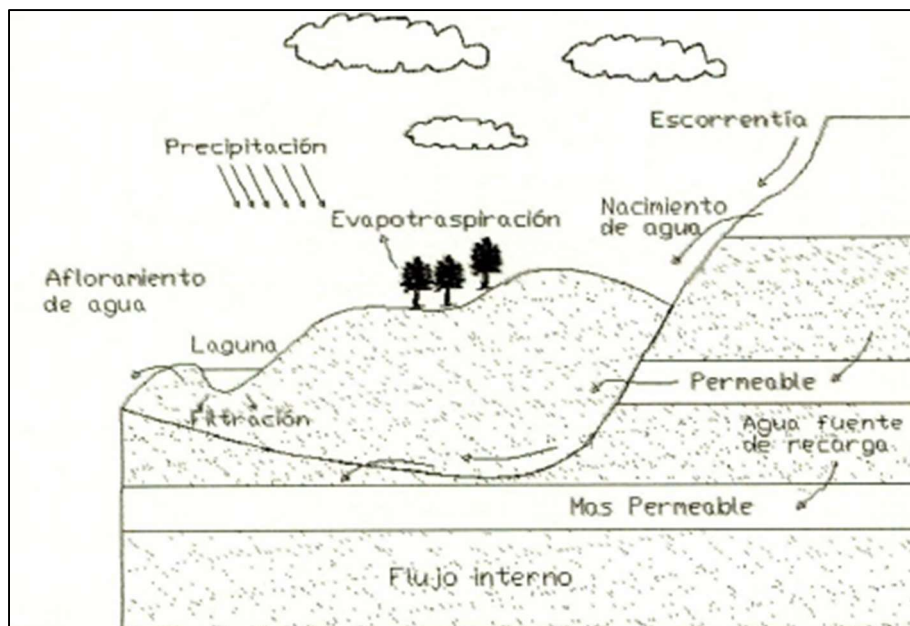
Solo a través de investigaciones especializadas realizadas por expertos en el campo, como geólogos, es posible evaluar el riesgo de deslizamientos en una zona específica y determinar las medidas necesarias para prevenir o mitigar dicho fenómeno. No obstante, es conocido que, durante las estaciones de invierno, el peligro tiende a incrementarse.

2.2.4. Efectos del Agua en un Talud

La presencia de agua es uno de los principales elementos asociados a la inestabilidad de los taludes. Esto se evidencia en la alta incidencia de deslizamientos que ocurren tras lluvias intensas o durante períodos lluviosos.

Cuando el suelo tiene una baja capacidad de filtración y carece de protección contra el impacto de las gotas de agua, se da lugar al escurrimiento superficial y al fenómeno conocido como erosión hídrica.

Imagen 2 Ciclo del agua



Fuente: (Suárez Díaz, 1998)

La interpretación más común del impacto del agua es que las lluvias, al infiltrarse en el talud, saturan el suelo, y la presión de los poros provoca una disminución de la resistencia al corte, lo que a su vez podría desencadenar un deslizamiento, se puede observar en la Imagen 2 el proceso que se acaba de indicar.

2.2.5. Velocidad de Infiltración

Es la rapidez con la que el agua se desplaza desde el entorno exterior hacia el interior del perfil del suelo, y juega un papel crucial en la interacción entre el suelo y las plantas.

- **Si es pequeña:** Una pequeña proporción se infiltra en el suelo, mientras que el resto fluye superficialmente, promoviendo así procesos de erosión.
- **Si es grande:** La presencia de capas impermeables puede generar complicaciones relacionadas con el exceso de agua.

¿De qué depende la cantidad de agua que se mueve en el perfil?

- De la cantidad de agua que recibe el suelo
- De la capacidad de filtración del suelo
- De la cantidad de agua que el perfil puede retener
- De la textura
- De la estructura

2.2.6. Activación de Deslizamientos por Lluvias

La saturación del suelo y el aumento del nivel freático son factores que pueden influir en el mecanismo de fallo de un talud debido a las precipitaciones.

El talud puede volverse inestable debido a la infiltración de agua de dos maneras distintas:

La **eliminación de tensiones negativas** que se desarrollan desde la parte superior hacia la inferior y alcanzan una profundidad específica según la intensidad y duración de las lluvias, así como la conductividad hidráulica (permeabilidad) y profundidad del perfil permeable.

El **ascenso del nivel freático** que, a su vez, tiene lugar desde la parte inferior hacia la superior. La posibilidad de desencadenar un deslizamiento no solo está vinculada a la cantidad total de lluvia, sino también a la duración e intensidad de las precipitaciones, así como al patrón de los periodos lluviosos.

2.2.7. Precipitación en Ecuador

El comportamiento climático del Ecuador es altamente errático, influenciado por factores como la niebla, la precipitación y la temperatura (Pourrut, 1995). También provocan cambios en el comportamiento de las plantas perennes, retrasando o acelerando el ciclo de lluvias y se cree que son parcialmente responsables de la sequía que la precede (Carrera-Villacrés et al., 2016).

Diversos estudios a escalas anuales han identificado dos fenómenos principales que influyen en la precipitación. El primero está asociado al fenómeno ENSO (presencia de agua caliente de baja salinidad) y el segundo está asociado a un período de aproximadamente dos años (Otero & Van Kesteren, 1998). En el Pacífico tropical, las temperaturas del agua más cálidas de lo normal se denominan El Niño, mientras que las temperaturas del agua más frías de lo normal se denominan La Niña. Esto conduce a cambios en la circulación del aire cálido y del clima en todo el mundo (Pabón & Montealegre, 2017).

2.2.8. Precipitaciones Extremas

El cambio climático requiere la extensión de varias cosas, incluido el conocimiento de los cambios espaciales y temporales en los umbrales de precipitación extrema. Ahora hay evidencia de que las lluvias extremas más intensas y frecuentes están ocurriendo como resultado del cambio climático.

Hay varias características que definen la precipitación. Una es que la intensidad depende de varias influencias atmosféricas. Además, tienen una distribución espacial aparentemente irregular y una frecuencia temporal baja, provocando generalmente peligros naturales de carácter geomorfológico, como cambios en el cauce de los ríos, cambios en la erosión superficial y migraciones masivas, entre otros. Estos desastres naturales tienen un impacto directo en la población y la infraestructura.

Según ODRA (Overseas Disaster Relief Agency), alrededor de 7 millones de personas se vieron afectadas por inundaciones en todo el mundo entre 1900 y 2001.

En Ecuador, alrededor del 35% de la población vive en áreas propensas a inundaciones. A lo largo de la historia se ha demostrado que las consecuencias del fenómeno de El Niño se deben a las lluvias y provocan un comportamiento anómalo. Algunas de las lluvias extremas que ocurrieron en 2017 ocurrieron entre febrero y marzo, y las precipitaciones aumentaron más allá de los valores de escala completa. Esta precipitación ocurrió en áreas ya dañadas por el terremoto de 2016. Estas lluvias extremas impactaron profundamente en los suelos, desencadenando la activación de fenómenos de erosión que se caracterizan por ser cíclicos, evolutivos e invariantes.

Las lluvias extremas, dependiendo de su intensidad, impactan negativamente en ciertas áreas más vulnerables, causando daños tanto sociales como económicos. La detección de eventos de lluvias extremas dentro de las 24 horas es fundamental para cubrir las regulaciones y requisitos de los proyectos de ingeniería hidráulica desarrollados para prevenir desastres por posibles inundaciones, avalanchas y deslizamientos de tierra.

Régimen de Lluvias

En cada localidad, se experimenta un patrón de lluvias que se repite de manera similar anualmente. Es común observar regiones donde se suceden dos períodos de lluvias intercalados con dos períodos secos, o incluso una sola temporada de lluvias seguida por una etapa seca. En la mayoría de las áreas, los meses de diciembre y enero suelen ser característicamente secos. Es importante considerar que la distribución de las lluvias puede variar en diferentes partes de una misma región, especialmente en áreas de gran altitud. Por lo tanto, se aconseja obtener información precisa sobre las precipitaciones en la ubicación específica del talud bajo estudio. (Suárez Díaz, 1998).

Aguaceros Torrenciales

Es frecuente que en las áreas montañosas se den aguaceros intensos en un corto período, ya sea de una o pocas horas. En el aspecto de la precipitación, es crucial considerar la intensidad de la lluvia máxima o de las lluvias más intensas en una hora, día, mes o año, así como en algunas ocasiones, la cantidad de lluvia en lapsos menores a una hora.

Es necesario distinguir entre las zonas con precipitaciones constantemente elevadas, donde el nivel freático se mantiene alto y constante, y un corte en el terreno puede provocar la falla casi inmediata del talud; y el escenario de lluvias esporádicas o épocas de lluvias intensas, donde el suelo no saturado puede saturarse repentinamente, ocasionando la falla. Varios estudios han corroborado que la actividad de un talud puede estar condicionada por la ocurrencia de lluvias. La falla de un talud puede requerir una temporada de lluvias prolongada o, en algunos casos, puede ser suficiente con un único aguacero (Suárez Díaz, 1998).

Lluvias acumuladas

La presencia de precipitaciones en varios días seguidos o con intervalos cortos puede dar lugar a la acumulación de agua subterránea, ya que el talud no logra drenar completamente el agua infiltrada de una lluvia antes de que ocurra la siguiente, resultando en una acumulación gradual y un aumento del nivel freático.

Ciclo Hidrológico en el Talud

Una fracción de la lluvia penetra en el suelo, mientras que otra parte fluye por la superficie como escorrentía.

Precipitación = Evapotranspiración + Escorrentía + Flujo subterráneo + Cambio de humedad en el suelo + Acumulación de agua subterránea en los acuíferos.

La estabilidad de un talud se ve directamente afectada por el flujo subterráneo y las variaciones en la acumulación de agua, ya que estos factores determinan el equilibrio hidrológico que puede modificar el grado de saturación y la elevación del nivel freático. La manera en que las aguas subterráneas responden a las lluvias varía según las características específicas del talud, la formación geológica y el entorno ambiental. Cerca del talud, se observa una respuesta inmediata a la infiltración de lluvia, mientras que, a nivel regional, la respuesta se manifiesta por las lluvias infiltradas en toda el área circundante al talud. En ocasiones, la respuesta a nivel regional puede tardar varios meses en manifestarse, debido al trayecto que sigue el agua desde el punto de infiltración (Suárez Díaz, 1998).

Intensidad de Lluvia que Produce Deslizamientos

En investigaciones llevadas a cabo en Puerto Rico, se descubrió que la intensidad de la lluvia (I mm/h) que resulta en deslizamientos está correlacionada con la duración de la lluvia (D horas), según la fórmula: $I = 91.46 D - 0.82$. Según estos estudios, en tormentas con duraciones de hasta 10 horas, los deslizamientos no ocurren hasta que la intensidad alcanza valores tan altos como tres veces la intensidad informada para provocar deslizamientos en áreas no tropicales (Suárez Díaz, 1998).

Tiempo de Lluvia que Produce Deslizamientos

El periodo necesario para que la lluvia provoque un deslizamiento es más prolongado en un suelo arcilloso que en un material arenoso debido a las diferencias de infiltración (Alonso et al., 1995). Esta relación temporal es inversamente proporcional a la permeabilidad, manteniendo constantes los demás parámetros.

Humedad Superficial

La cantidad de humedad presente en la superficie del suelo influye en factores como los porcentajes de escorrentía e infiltración, y, en ciertas ocasiones, afecta el comportamiento de los taludes. La humedad superficial está regulada por:

- Características topográficas de la pendiente de los taludes.
- Tipo de suelo.
- Características climáticas.
- Vegetación.

La presencia de humedad en la capa superficial del suelo tiene la capacidad de influir en la probabilidad de que suelos arenosos, arcillosos y limosos experimenten agrietamiento por tensión, especialmente aquellos que son altamente susceptibles a cambios en la humedad. Este fenómeno es frecuente en terraplenes de carreteras.

En líneas generales, los aspectos ambientales y físicos que influyen en el proceso de infiltración están principalmente condicionados por los primeros 40 centímetros de la capa superficial del suelo (Bilz, 1995).

2.2.9. Umbrales de Precipitación

En general un umbral es el punto en el cual existe un cambio brusco, en una cualidad, propiedad o fenómeno. (Reichenbach et al., 1998) definieron el término umbral crítico de lluvia como el mínimo o máximo nivel crítico de alguna cantidad necesaria, en este caso lluvia, a partir de la cual un proceso ocurre. Normalmente, distintas zonas necesitan lluvias cuya intensidad, duración o una combinación de ellas superen un umbral característico para que generen deslizamientos. Los umbrales críticos de precipitación pueden ser empíricos o de bases físicas.

Los primeros, se establecen en la identificación de áreas donde ha ocurrido o no un deslizamiento, relacionado con un evento de precipitación, mientras que los umbrales físicos, se basan en modelos numéricos que toman en cuenta la relación entre la precipitación, la presión de poros y la estabilidad de taludes entre otras variables definidas a partir de modelos físicos numéricos, de mayor complejidad en su definición y aplicación ya que integran factores geomorfológicos, hidráulicos, geológicos y antrópicos, mientras que el umbral empírico de lluvia está basado en registros históricos de precipitación y deslizamientos que relacionan la ocurrencia del evento con algunos parámetros investigados como la intensidad de la lluvia, la duración de la

lluvia, la lluvia acumulada (LA), lluvia acumulada antecedente (LAA), o la combinación de estos. La LA representa la lluvia caída en los días inmediatamente previos al deslizamiento, incluyendo el día del evento, mientras que la LAA corresponde a la cantidad de lluvia caída los días precedentes a los considerados en la lluvia acumulada.

Para los umbrales empíricos resulta necesario disponer de una base de datos de calidad, tanto del inventario de movimientos en masa, como del historial de lluvias, si esta información es escasa o no existe, son recomendables los umbrales físicos. Los inventarios más fiables son los basados en observaciones directas o en la recopilación sistemática de sucesos de deslizamiento por servicios técnicos como el de mantenimiento de carreteras. Los umbrales empíricos se obtienen a través de límites trazados sobre coordenadas cartesianas, visualmente, es decir sin ninguna rigurosidad matemática, estadística o criterio físico.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Analizar los registros históricos de precipitación en una cuenca hidrográfica localizada en el Austro Ecuatoriano con énfasis en los eventos extremos.

3.2. Objetivos Específicos

Seleccionar y obtener datos de estaciones pluviométricas ubicadas en una cuenca hidrográfica del Austro Ecuatoriano y, en donde, se hayan registrado deslizamientos superficiales.

Descargar la información de precipitación liberada por CHELSA-EarthEnv Global Precipitation (Karger et al., 2021).

Analizar hidrológicamente la información de precipitación tanto de las estaciones pluviométricas existentes en la cuenca de estudio como del portal CHELSA-EarthEnv.

Evaluar el impacto de las precipitaciones extremas a nivel de una cuenca hidrográfica localizada en el Austro Ecuatoriano con relación a la generación de deslizamientos superficiales.

4. Materiales y Métodos

4.1. Materiales

4.1.1. CHELSA-EarthEnv

El producto CHELSA-EarthEnv es una plataforma virtual de acceso libre con datos del índice medio anual de precipitaciones, constituye una colaboración entre científicos con experiencia en biodiversidad y profesionales en teledetección. Su objetivo es crear capas estandarizadas de casi alcance global, con una **resolución de 1 km**, destinadas al monitoreo y modelado de la biodiversidad, los ecosistemas y el **clima**. Este esfuerzo cuenta con respaldo del NCEAS (National Center for Ecological Analysis and Synthesis), la NASA (National Aeronautics and Space Administration), la NSF y la Universidad de Yale.

4.1.2. ArcMap

Esta sección ofrece una introducción y una visión general de ArcMap, una de las aplicaciones principales utilizadas en ArcGIS Desktop. En ArcMap, las personas pueden visualizar y explorar conjuntos de datos SIG específicos de sus áreas de estudio, asignar símbolos, y crear diseños de mapas para su impresión o publicación. Además, ArcMap es la herramienta que se emplea para la creación y edición de conjuntos de datos.

En ArcMap, la información geográfica se presenta como una colección de capas y otros elementos en un mapa. Los elementos comunes incluyen el marco de datos que contiene las capas del mapa para una extensión determinada, junto con la barra de escala, la flecha de norte, el título, texto descriptivo, una leyenda de símbolos, entre otros.

4.1.3. Programa Excel

Excel es una herramienta muy eficaz para obtener información con significado a partir de grandes cantidades de datos. También funciona muy bien con cálculos sencillos y para realizar el seguimiento de casi cualquier tipo de información. La clave para desbloquear todo este potencial es la cuadrícula de las celdas. Las celdas pueden contener números, texto o fórmulas. Los datos se escriben en las celdas y se agrupan en filas y columnas. Esto permite sumar datos, ordenarlos y filtrarlos, ponerlos en tablas y crear gráficos muy visuales.

4.1.4. Archivos DEM

En términos generales, es crucial establecer que los archivos DEM, acrónimo derivado del término en inglés Digital Elevation Model y traducido al español como Modelo de Elevación Digital, se refieren a una representación digital del relieve. En otras palabras, se trata de un modelo digital que representa la superficie terrestre.

4.1.5. Datos de Precipitación

La información sobre la precipitación en términos espaciotemporales suele obtenerse de diversas fuentes, como satélites, reanálisis, modelos de circulación global o instrumentos de medición de precipitación. No obstante, cada una de estas fuentes presenta limitaciones en términos de cobertura, precisión o detalle de manera individual, lo que restringe su utilidad para

numerosas aplicaciones posteriores, especialmente aquellas que involucran grandes extensiones espaciales y temporales.

Sin embargo, los datos climáticos de alta resolución desempeñan un papel fundamental en numerosas investigaciones relacionadas con el medio ambiente y la ecología. En este contexto, se ha diseñado e implementado un nuevo enfoque semi mecanístico para la reducción de escala, con el propósito de estimar la precipitación diaria, utilizando la frecuencia de nubes derivada de satélites de alta resolución (30 arcossegundos, ≈ 1 km). El algoritmo de reducción de escala incorpora predictores orográficos como campos de viento, exposición de vaguada y altura de la capa límite, seguido de una corrección de sesgo. Este método se aplica a los datos de precipitación de ERA5 y a la frecuencia mensual de nubosidad de MODIS para generar una serie temporal de precipitación diaria en una cuadrícula con una resolución de 1 km a partir del año 2003 (Karger et al., 2021).

La comparación entre predicciones propias y los productos de cuadrícula existentes, así como los datos de estaciones de la Red Histórica Mundial del Clima, revela una mejora en el rendimiento espaciotemporal de los datos redimensionados en la predicción de la precipitación. Un análisis regional de la corrección de la nubosidad en el territorio continental de Estados Unidos indica que CHELSA-EarthEnv presenta resultados favorables en comparación con otros productos de precipitación. El producto de precipitación diaria CHELSA-EarthEnv mejora la precisión temporal y experimenta una notable mejora en la precisión espacial, especialmente en terrenos complejos (Karger et al., 2021).

4.1.6. Datos Previos Estaciones Pluviométricas

Para el desarrollo de este trabajo también se consideraron las bases de datos de precipitaciones de las investigaciones realizadas por (Iñiguez et al., 2016). Dentro de esto se tiene la información de los años 2009, 2010, 2011 y 2012. Cada valor esta registrado para 3 estaciones ubicadas en diferentes puntos de la cuenca del río Cumbe (Cumbe bajo, Cumbe medio y Cumbe alto), lo cual es importante para poder comparar la información física y con la que brinda CHELSA-EarthEnv. Esta información ha resultado beneficiosa para otros territorios, y en esta ocasión se busca revisar si de igual forma podría ser útil para el área de estudio.

4.2. Métodos

En el presente apartado se detallan los procedimientos empleados en la investigación, centrándose en las investigaciones realizadas para encontrar datos de precipitaciones satelitales que nos ayudarán a comparar con la información presentada por las estaciones pluviométricas en la cuenca Cumbe.

4.2.1. Corrección de Unidades

A pesar de que la información que brinda CHELSA-EarthEnv es bastante valiosa, se debe considerar las unidades en las que vienen los datos de precipitaciones. Al analizar los datos, se observa que se encuentran bajo el siguiente esquema:

$$\frac{Kg}{m^2 * día}$$

Por lo tanto, se hace necesaria una modificación en las unidades proporcionadas por CHELSA para adecuarlas a las provenientes de las estaciones pluviométricas en la zona de estudio. Con este propósito, se llevó a cabo la siguiente conversión con base a la ecuación de densidad:

1 Ecuación de densidad

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

$$\text{masa} = \rho * \text{volumen}$$

$$\text{volumen} = \frac{\text{masa}}{\rho}$$

2 Ecuación para pasar las unidades a mm/día

$$\text{volumen} = \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 * \text{día}} * \frac{1\text{m}^3}{1000\text{Kg}} * \frac{1000\text{mm}}{1\text{m}} = \frac{\text{mm}}{\text{día}}$$

Se llevó a cabo el mismo proceso de la Ecuación 2 para cada valor, permitiendo así trabajar con los demás datos de manera consistente.

4.2.2. Método Gráfico

El método gráfico se refiere a una técnica utilizada en la investigación y presentación de datos en diversos campos, incluyendo la investigación científica, análisis estadístico y representación visual de la información. En el contexto de este proyecto, implica la creación y utilización de gráficos, tablas y otros elementos visuales para presentar y comunicar datos de manera efectiva.

4.2.3. Consideraciones Especiales

Debido a que cada dato corresponde al conjunto total de la extensa área de estudio, se debe ejercer precaución al abordar los valores proporcionados por la plataforma de CHELSEA-EarthEnv en el análisis. La necesidad de evitar el cálculo de promedios aritméticos entre puntos es evidente, ya que el terreno no se caracteriza por ser plano, sino por presentar elevaciones variables

en cada punto muestreado. En su lugar, se opta por realizar sumatorias totales de los datos respectivos, ajustándose a la segmentación elegida, que puede ser diaria, mensual o anual.

5. Paquete de Trabajo 1

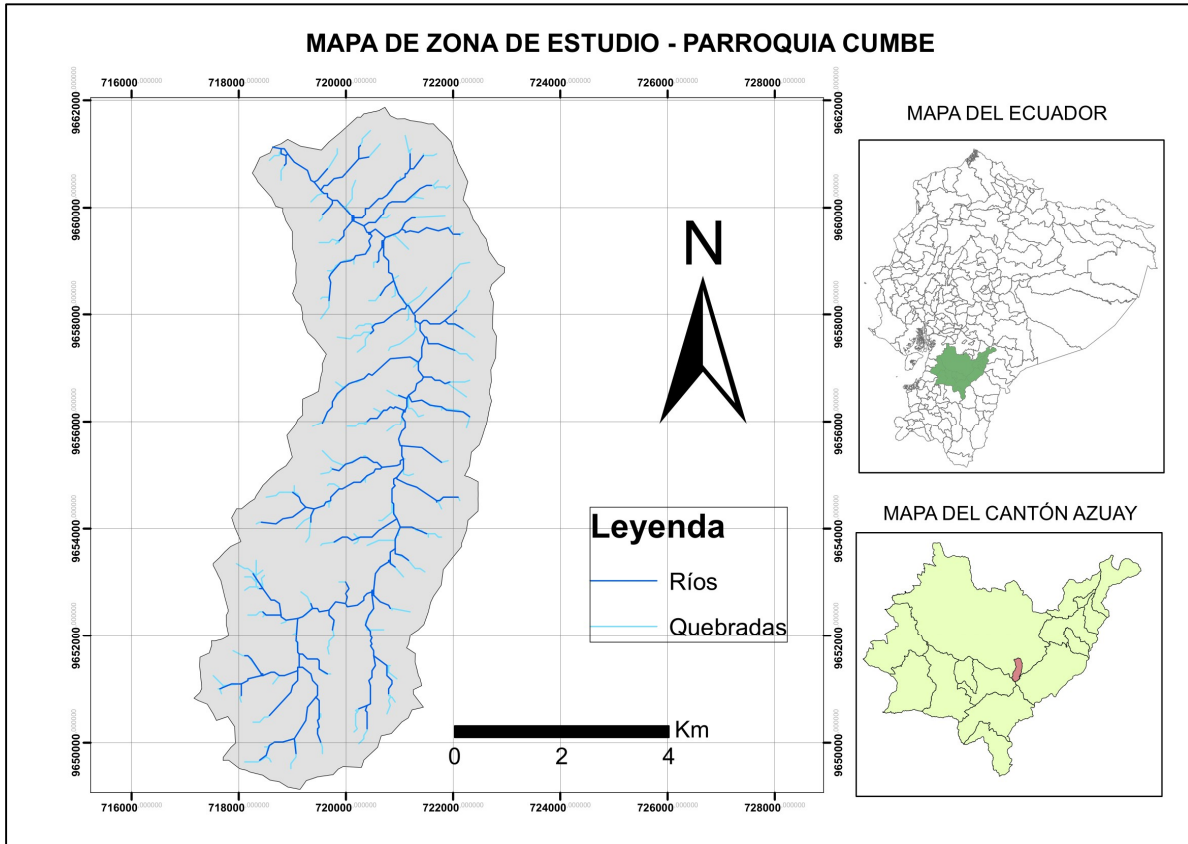
5.1. Área de Estudio

Preliminarmente, y en base de investigaciones realizadas anteriormente (Iñiguez et al., 2016), (Vanacker et al., 2007), se ha seleccionado la cuenca del río Cumbe. Esta cuenca revela elevaciones de sedimentos en suspensión cada invierno por procesos de los cambios de uso del suelo y deslizamientos superficiales.

La parroquia San Luis de Cumbe se encuentra en la parte sur del Cantón Cuenca, a una altitud de 2.640 metros sobre el nivel del mar. Su ubicación geográfica es aproximadamente a 3°4'5" S de latitud y 79°0'46" W de longitud. Con una extensión de 71.4 km², representa alrededor del 2.3 por ciento del territorio cantonal. Está situada a una distancia de 24 km de la ciudad de Cuenca y se conecta a través de la vía asfaltada Cuenca-Loja, puede visualizarse en el mapa de la Imagen 3.

La parroquia San Luis de Cumbe tiene los siguientes límites: al norte limita con la parroquia Tarqui, al sur con la parroquia Jima y la periferia cantonal de Girón, al este con las parroquias de Quingeo y San José de Raranga, y al oeste con la parroquia Victoria del Portete.

Imagen 3 Ubicación de la zona de estudio

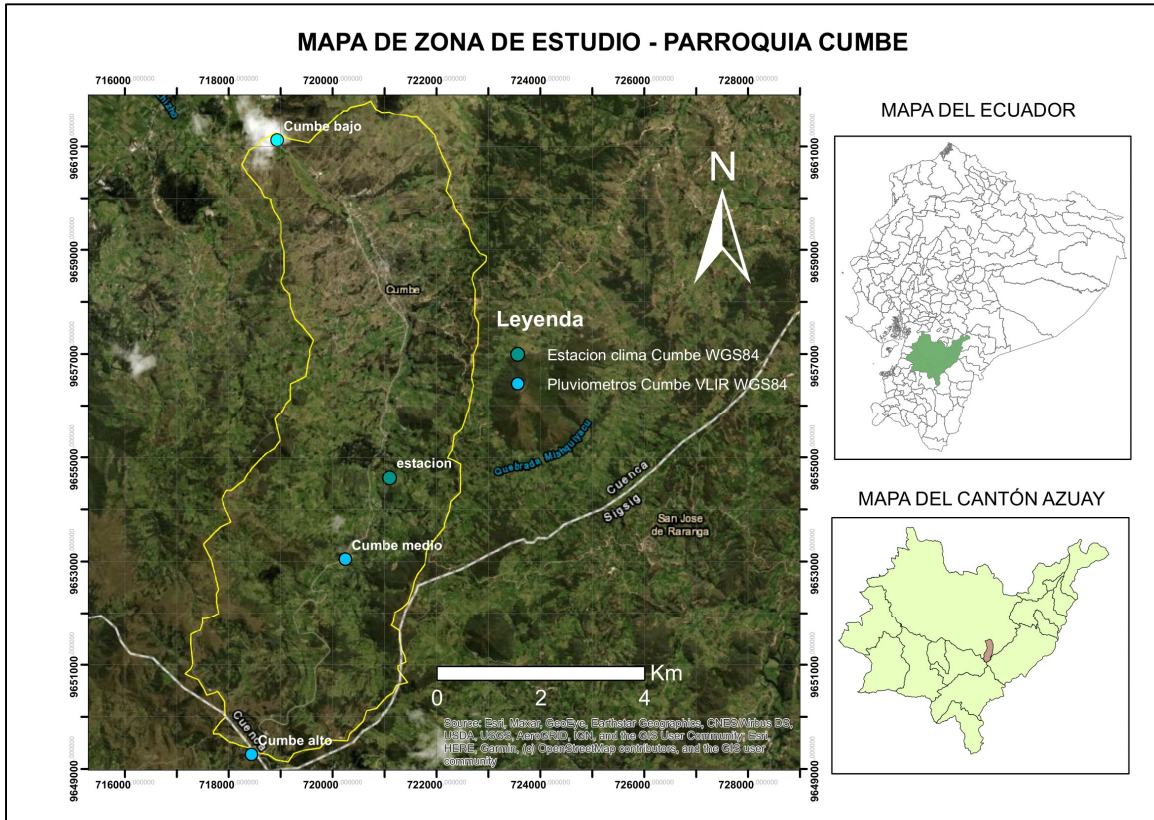


Fuente: Autor

5.2. Delimitación del Área de Estudio

Se recurrió al mapa presentado para la delimitación de la zona de estudio y se llevaron a cabo otras acciones para llegar a lo mencionado anteriormente, con la implementación de grillas y la ubicación de las estaciones pluviométricas. Esto se hizo con el objetivo de visualizar de una manera más eficaz cada dato proporcionado y encerrar el espacio de trabajo de forma más organizada. Este enfoque facilita la obtención de una información procesada que se apege lo más posible a la realidad.

Imagen 4 Mapa con estaciones pluviométricas



Fuente: Autor

6. Paquete de Trabajo 2

6.1. Aplicación del Programa

Para el desarrollo del proyecto se hará uso del programa Excel para automatizar ciertos datos y facilitar la interpretación de resultados, ya que la página CHELSEA-EarthEnv nos facilita documentos del tipo CSV (valores separados por comas) en su página oficial <https://www.earthenv.org/precipitation>.

Se basa en la información preliminar disponible en base a la investigación, donde se indica que cada dato representa una resolución de 1 km x 1 km. Es decir, se parte de utilizar el mapa

creado anteriormente (Imagen 3), y se sobrepone una grilla de 1 km x 1 km para identificar el número de puntos necesarios para realizar comparaciones de la información. Además, se aprovecha para insertar las coordenadas proporcionadas de las estaciones pluviométricas existentes en la cuenca Cumbe.

En base a la grilla realizada en el mapa de la Imagen 4, se ha determinado tomar 50 puntos que cubren el total de la cuenca Cumbe, dividiéndolos de acuerdo con cada estación existente (alta, media y baja). Esto abarca desde el año 2003 hasta el año 2016, que forma parte de la información liberada.

Tabla 1 Información del CHELSEA-EarthEnv

date	value
1/1/2003	0.35
2/1/2003	0.52
3/1/2003	0.56
4/1/2003	0.24
5/1/2003	0.45
6/1/2003	0.32
7/1/2003	0.61
8/1/2003	0.43
9/1/2003	0.65

Fuente: Autor

En la Tabla 1 se puede visualizar de qué manera CHELSEA-EarthEnv presenta la información, mostrando la precipitación diaria en un punto específico, adicional se emplea la Ecuación 2 mencionada con anterioridad para la corrección de las unidades de los valores con los cuales se va a desarrollar el presente proyecto.

6.2. Organización de Valores de Precipitación

Tabla 2 Información ordenada

Date	3299	3398	3420	3249	3253	3318	3413	3221
1/1/2003	0.35	0.31	0.31	0.38	0.36	0.36	0.31	0.29
2/1/2003	0.52	0.48	0.48	0.53	0.53	0.53	0.49	0.46
3/1/2003	0.56	0.5	0.5	0.58	0.58	0.56	0.5	0.47
4/1/2003	0.24	0.21	0.21	0.26	0.25	0.24	0.22	0.21
5/1/2003	0.45	0.4	0.4	0.48	0.47	0.46	0.4	0.38
6/1/2003	0.32	0.29	0.29	0.33	0.33	0.33	0.3	0.28
7/1/2003	0.61	0.54	0.54	0.64	0.64	0.62	0.55	0.52
8/1/2003	0.43	0.38	0.38	0.44	0.44	0.43	0.39	0.36
9/1/2003	0.65	0.58	0.58	0.68	0.67	0.66	0.58	0.53
10/1/2003	0.57	0.49	0.49	0.62	0.6	0.58	0.5	0.46
11/1/2003	0.39	0.36	0.36	0.41	0.4	0.39	0.37	0.34
12/1/2003	0.74	0.66	0.66	0.78	0.77	0.75	0.67	0.63
13/1/2003	0.91	0.84	0.84	0.93	0.93	0.92	0.86	0.8
14/1/2003	3.07	2.91	2.91	3.05	3.09	3.09	2.94	2.81
15/1/2003	2.08	1.92	1.92	2.09	2.09	2.08	1.93	1.82

Fuente: Autor

Se ordenaron los 50 puntos de información en base a la fecha, incluyendo también su elevación en caso de requerirse un análisis diferente, como muestra la Tabla 2 cada dato esta presentado de forma diaria.

Se obtuvieron los datos anuales de cada uno de los 50 puntos que conforman la cuenca Cumbe a lo largo de un total de 13 años. Se procede a interactuar con la base de datos facilitada anteriormente, que contiene la información detallada de la siguiente manera:

Tabla 3 Información de pluviómetros existentes

Fecha	PluvCumbeAlto	PluvCumbeMedio	PluvCumbeBajo
09/02/2009	0	0	0
09/03/2009	11	2.4	5.6
09/04/2009	0.8	0.4	0
09/05/2009	0	0	0
09/06/2009	0	0	0
09/07/2009	0	0	0
09/08/2009	0	0	0
09/09/2009	0.6	0	0
09/10/2009	8.2	3.6	2
09/11/2009	1.6	0.4	0.2
09/12/2009	0.2	0	0
09/13/2009	0	0	0
09/14/2009	0	0	0
09/15/2009	0.2	2.2	0.2
09/16/2009	3.8	3.4	3.8
09/17/2009	0.6	0	0.2
09/18/2009	0.4	0	0

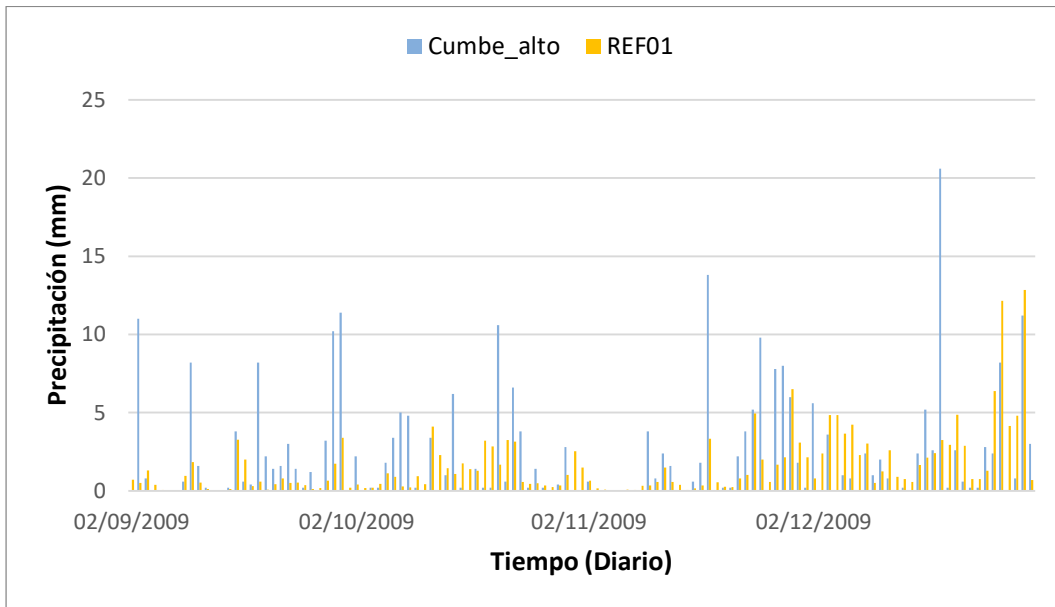
Fuente: Autor

Como se puede observar en la Tabla 3, la información es similar a la que presenta el CHELSEA-EarthEv, lo cual permitirá realizar la comparación con una mayor afinidad. Sin embargo, esta base de datos tiene una subclasificación que corresponde a las estaciones pluviométricas ubicadas a lo largo de la zona de estudio lo cual hay que considerar.

6.3. Representación de Precipitaciones de Forma Diaria

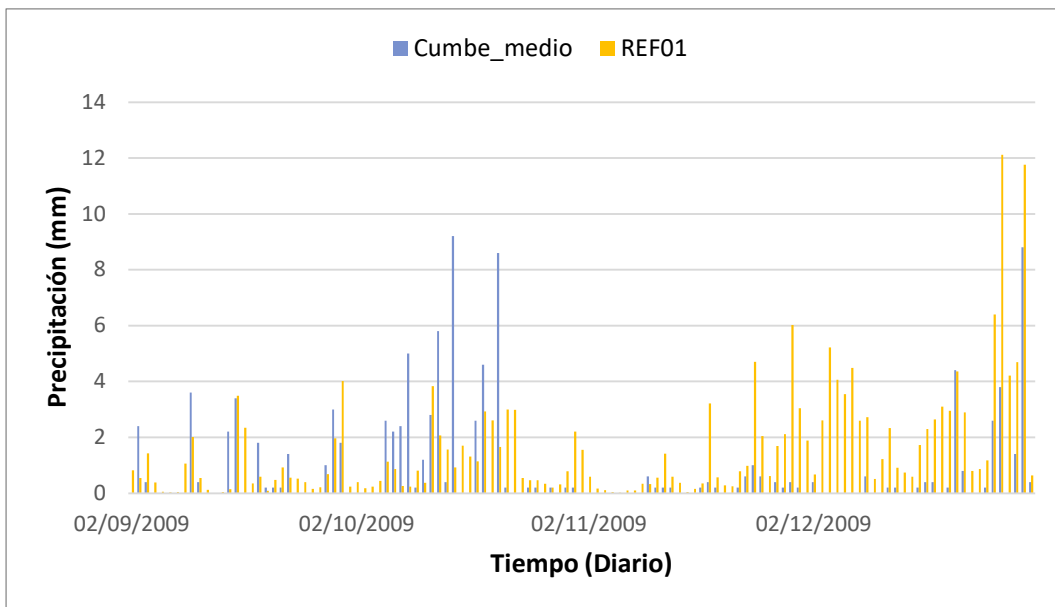
Se inicia realizando una comparación por día de los diferentes años, lo que proporciona los siguientes resultados:

Imagen 5 Precipitación diaria - Año 2009-Cumbe Alto



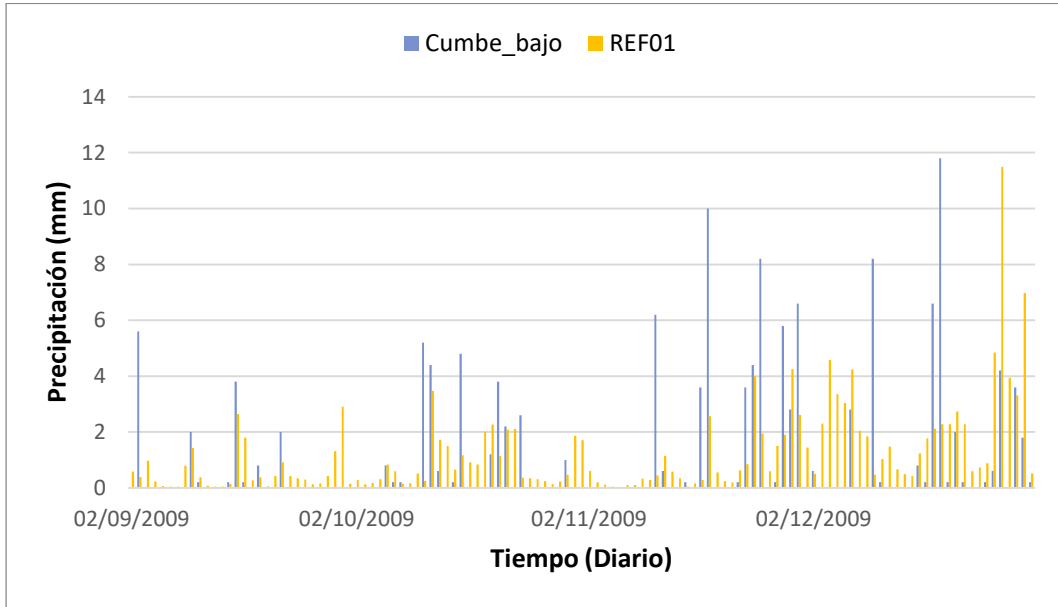
Fuente: Autor

Imagen 6 Precipitación diaria - Año 2009-Cumbe Medio



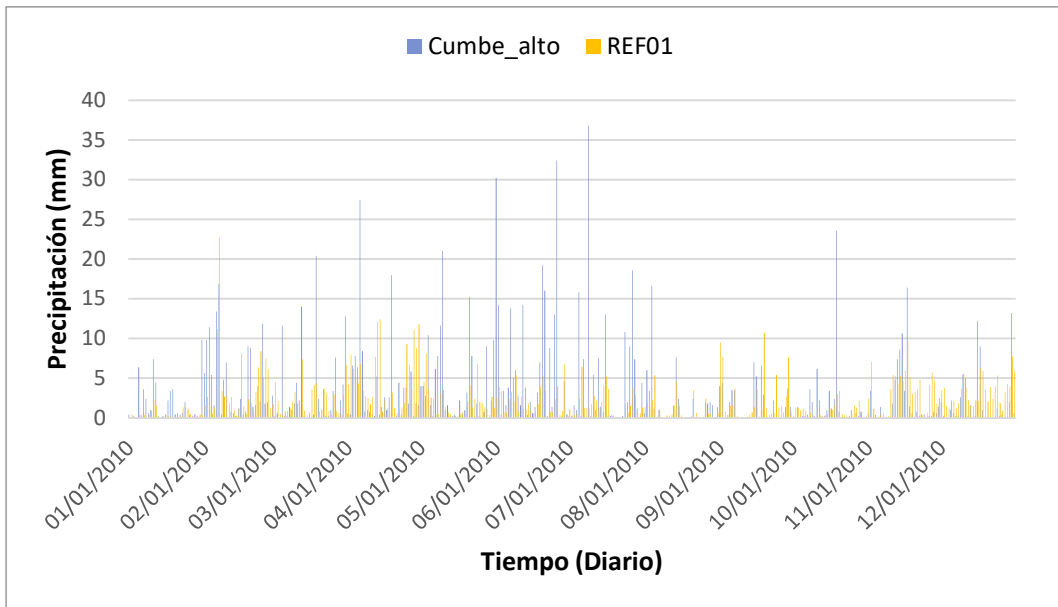
Fuente: Autor

Imagen 7 Precipitación diaria - Año 2009-Cumbe Bajo



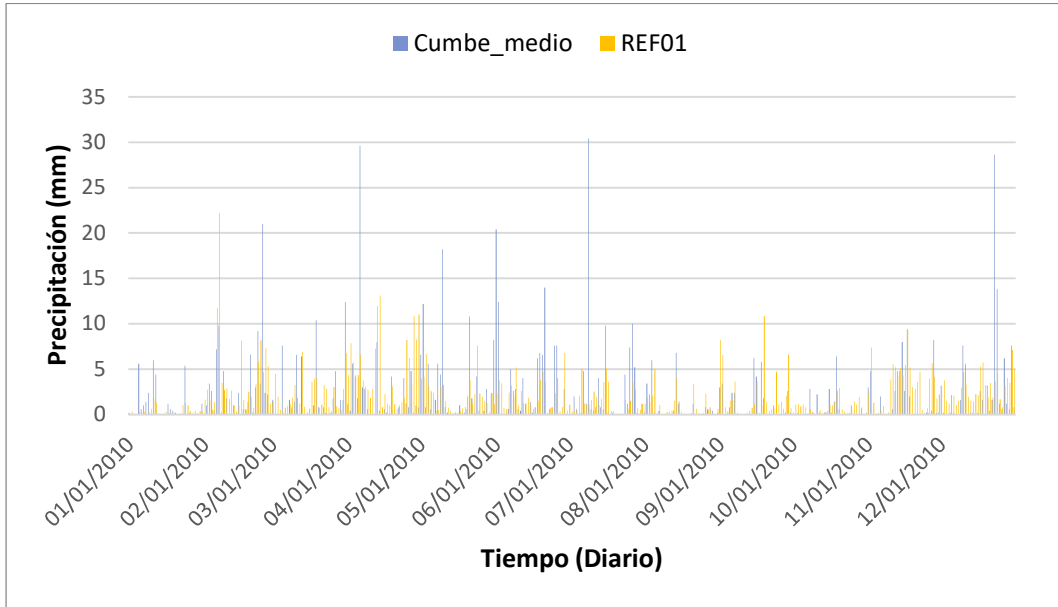
Fuente: Autor

Imagen 8 Precipitación diaria - Año 2010-Cumbe Alto



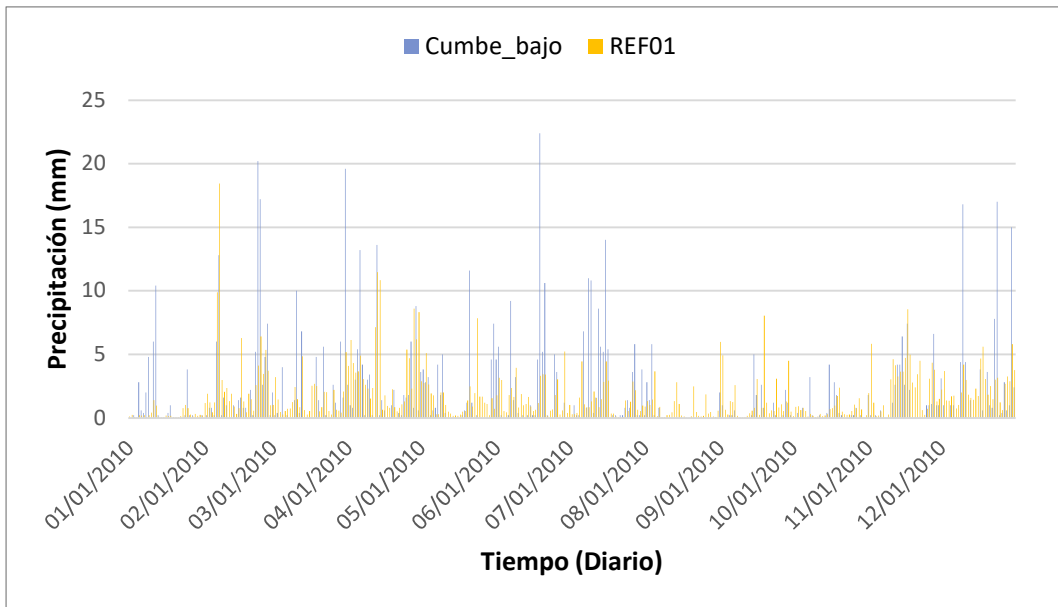
Fuente: Autor

Imagen 9 Precipitación diaria - Año 2010-Cumbe Medio



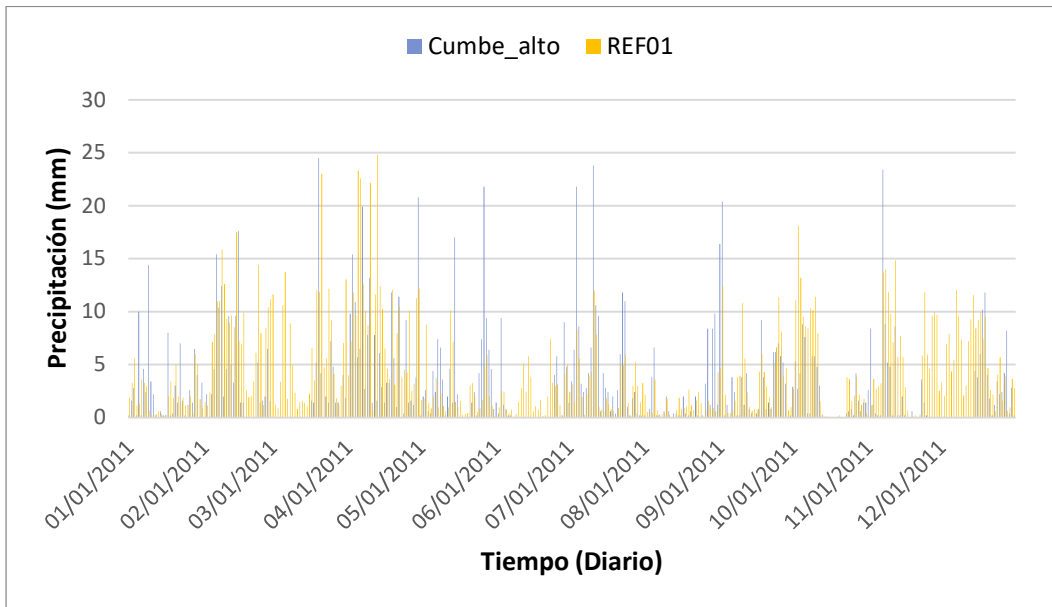
Fuente: Autor

Imagen 10 Precipitación diaria - Año 2010-Cumbe Bajo



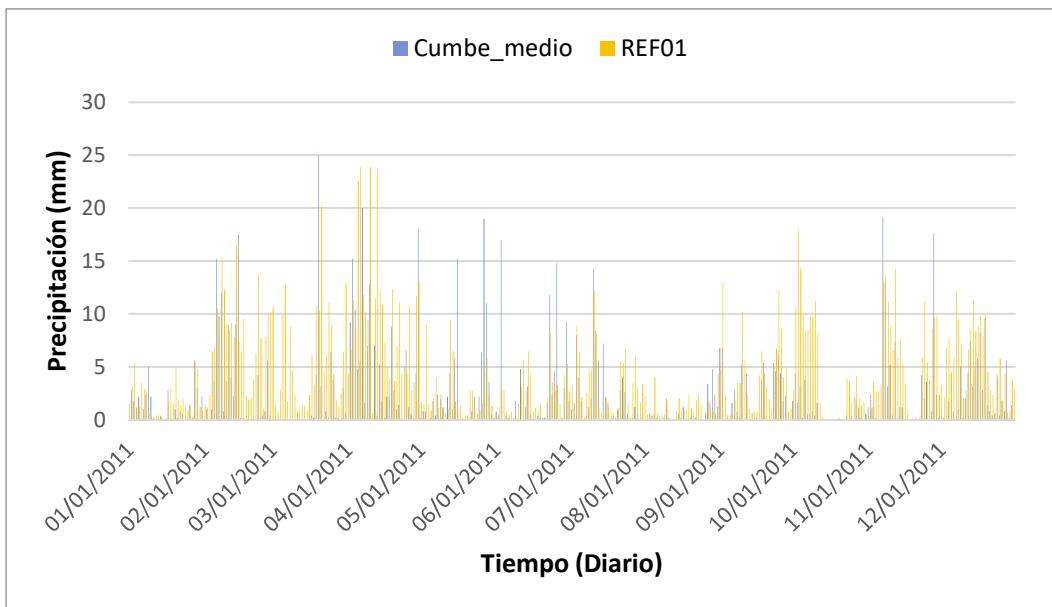
Fuente: Autor

Imagen 11 Precipitación diaria - Año 2011-Cumbe Alto



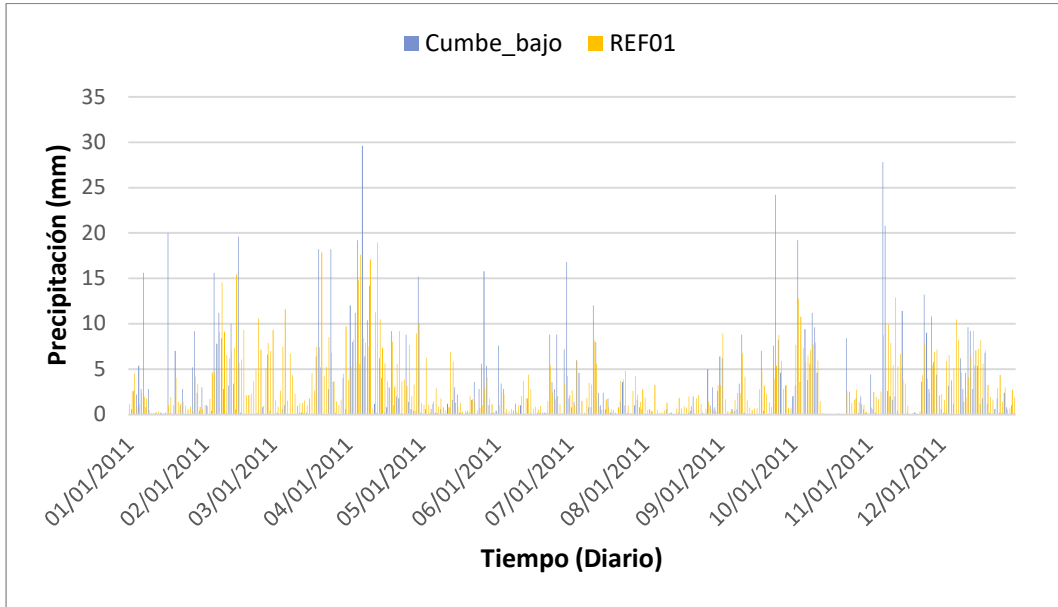
Fuente: Autor

Imagen 12 Precipitación diaria - Año 2011-Cumbe Medio



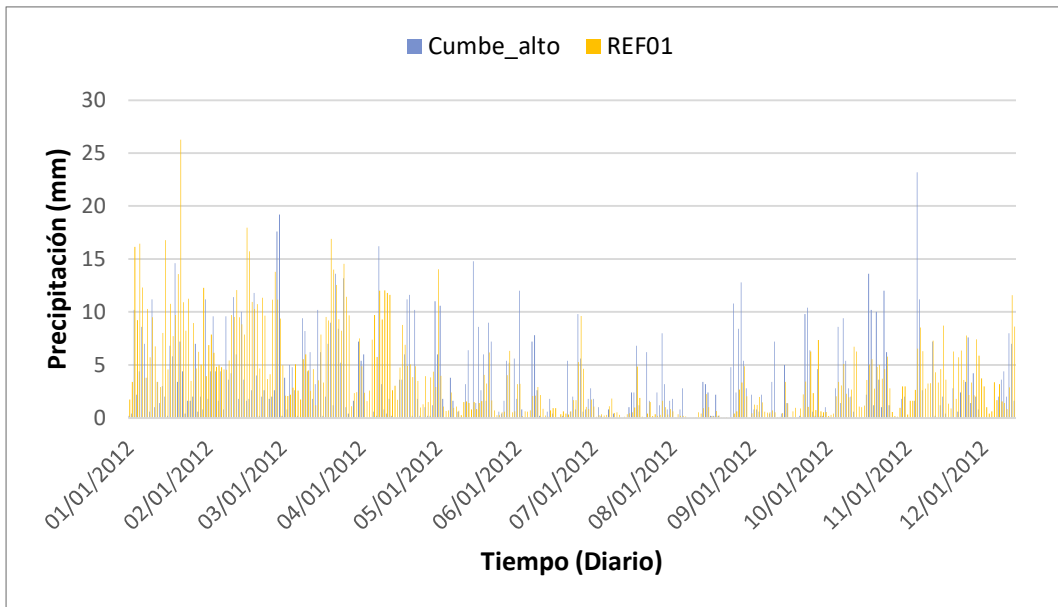
Fuente: Autor

Imagen 13 Precipitación diaria - Año 2011-Cumbe Bajo



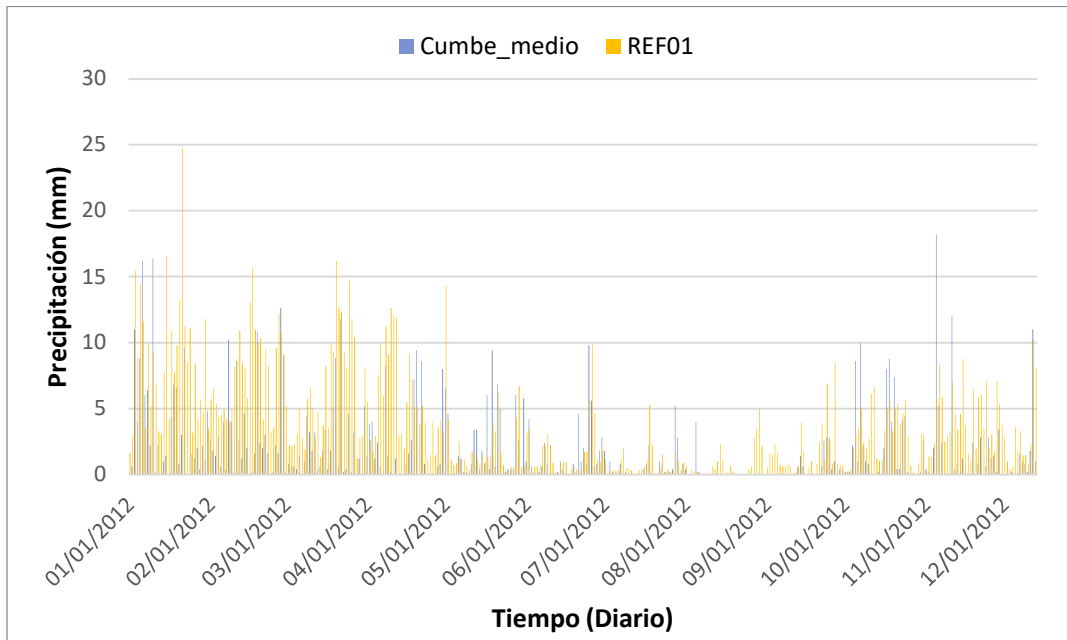
Fuente: Autor

Imagen 14 Precipitación diaria - Año 2012-Cumbe Alto



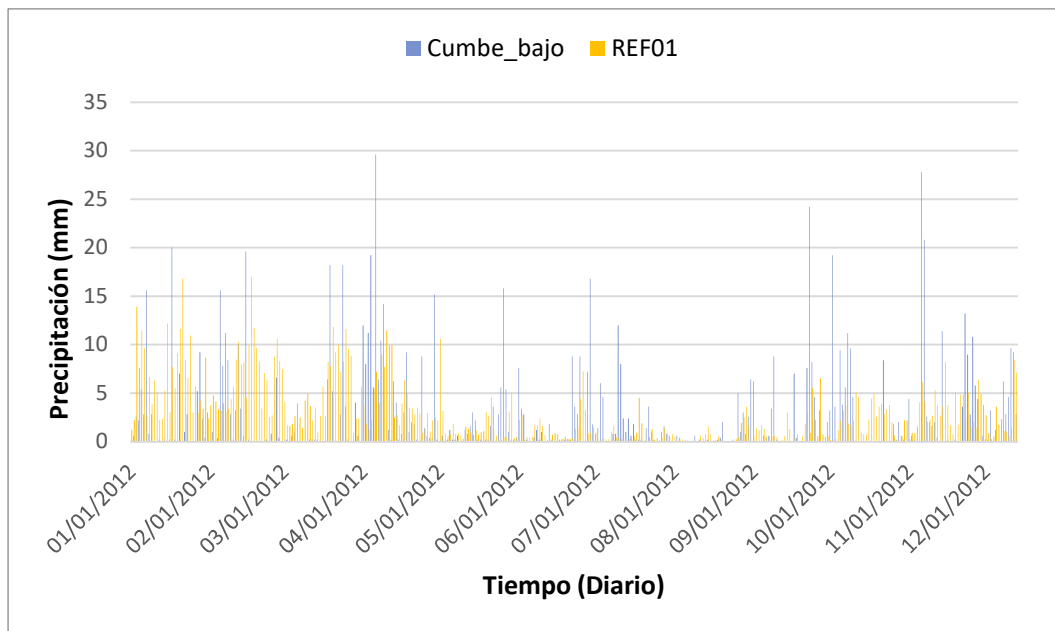
Fuente: Autor

Imagen 15 Precipitación diaria - Año 2012-Cumbe Medio



Fuente: Autor

Imagen 16 Precipitación diaria - Año 2012-Cumbe Bajo

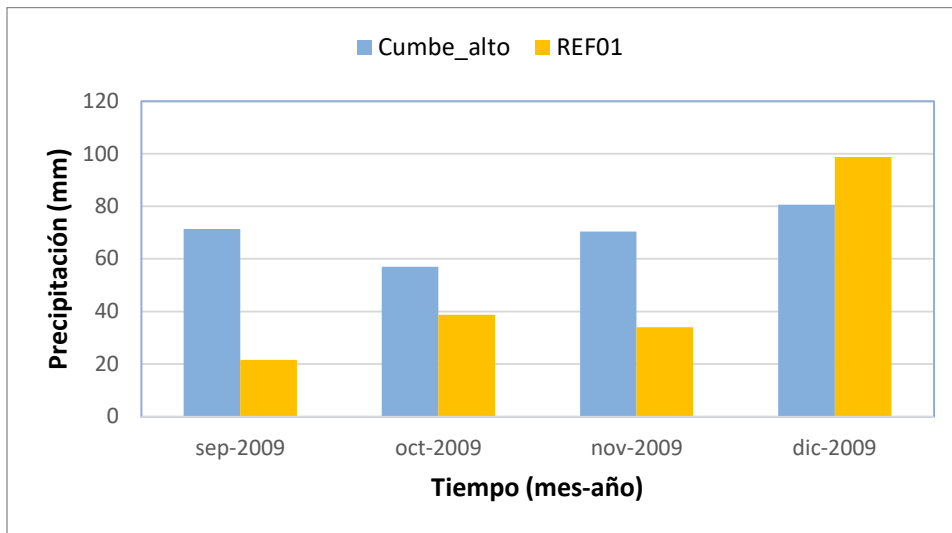


Fuente: Autor

Como se puede visualizar en las Imágenes 5 – 16, los datos diarios abarcan todo el campo visual de los gráficos, lo que no permite ver de forma más clara el estado de los datos de las estaciones pluviométricas existentes y del CHELSA-EarthEnv. Por tal motivo, se procede también a realizar una comparación mensual correspondiente a cada año y ubicación de las estaciones.

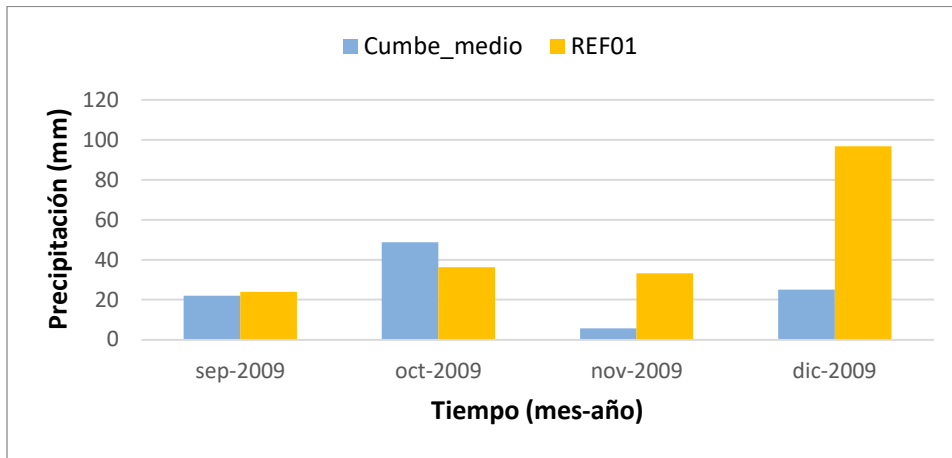
6.4. Representación de Precipitaciones de Forma Mensual

Imagen 17 Precipitación mensual - Año 2009 – Cumbe Alto



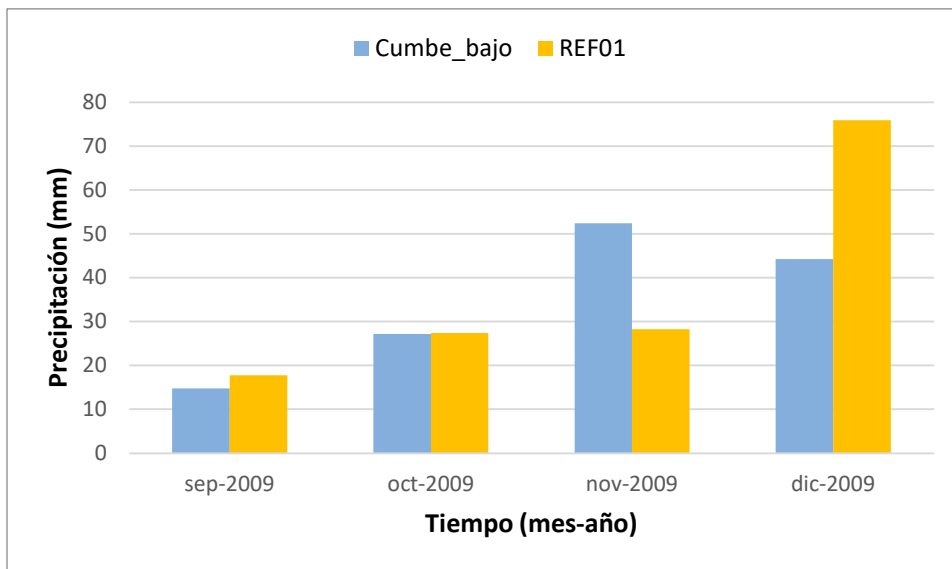
Fuente: Autor

Imagen 18 Precipitación mensual - Año 2009 – Cumbe Medio



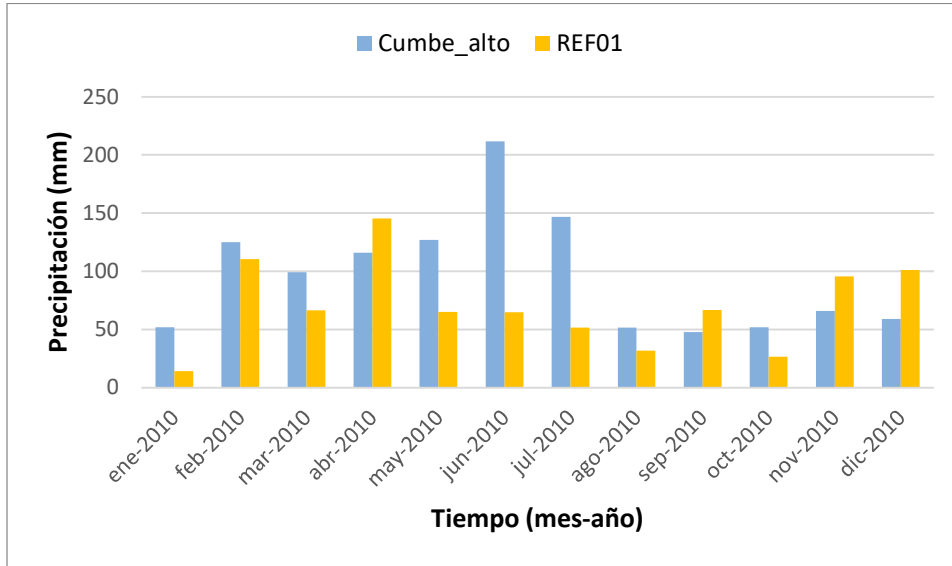
Fuente: Autor

Imagen 19 Precipitación mensual - Año 2009 – Cumbe Bajo



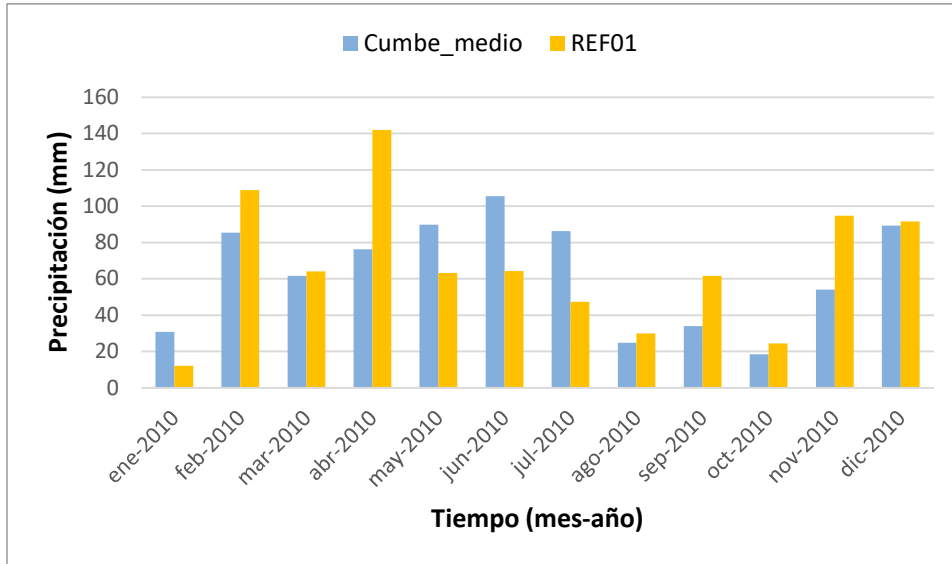
Fuente: Autor

Imagen 20 Precipitación mensual - Año 2010 – Cumbe Alto



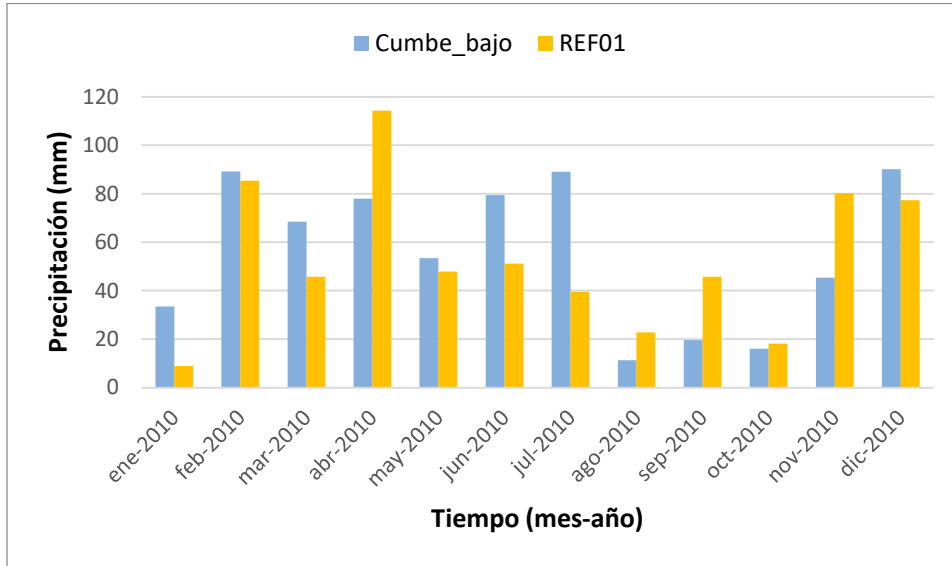
Fuente: Autor

Imagen 21 Precipitación mensual - Año 2010 – Cumbe Medio



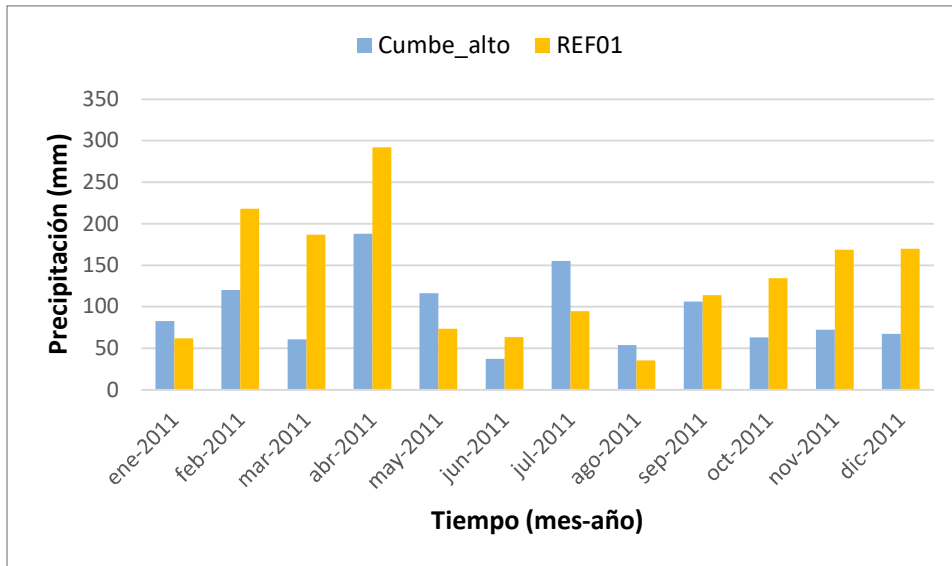
Fuente: Autor

Imagen 22 Precipitación mensual - Año 2010 – Cumbe Bajo



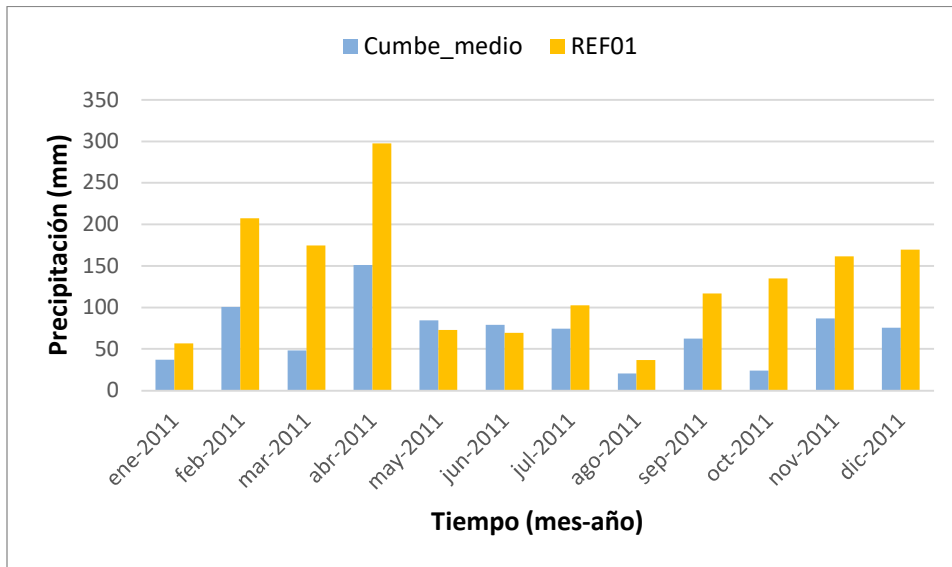
Fuente: Autor

Imagen 23 Precipitación mensual - Año 2011 – Cumbe Alto



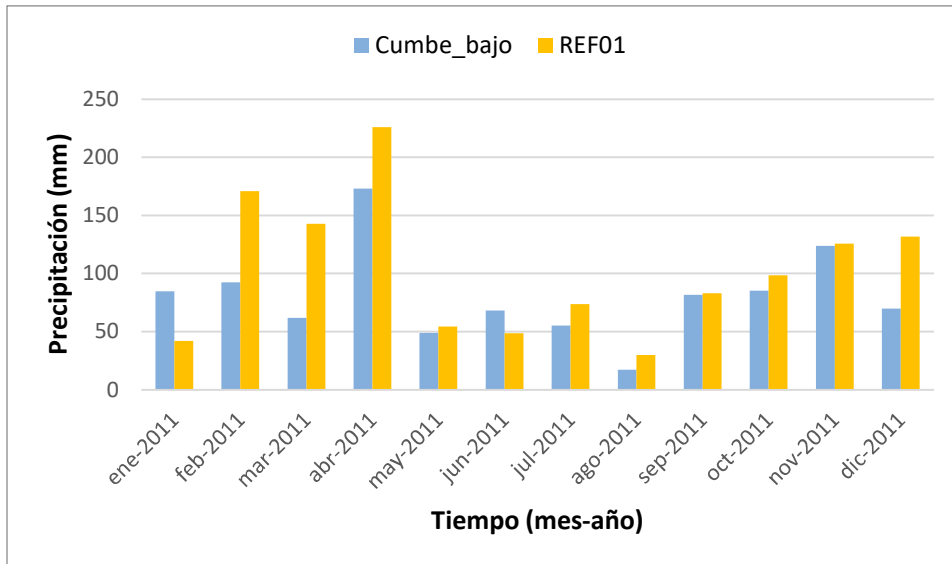
Fuente: Autor

Imagen 24 Precipitación mensual - Año 2011 – Cumbe Medio



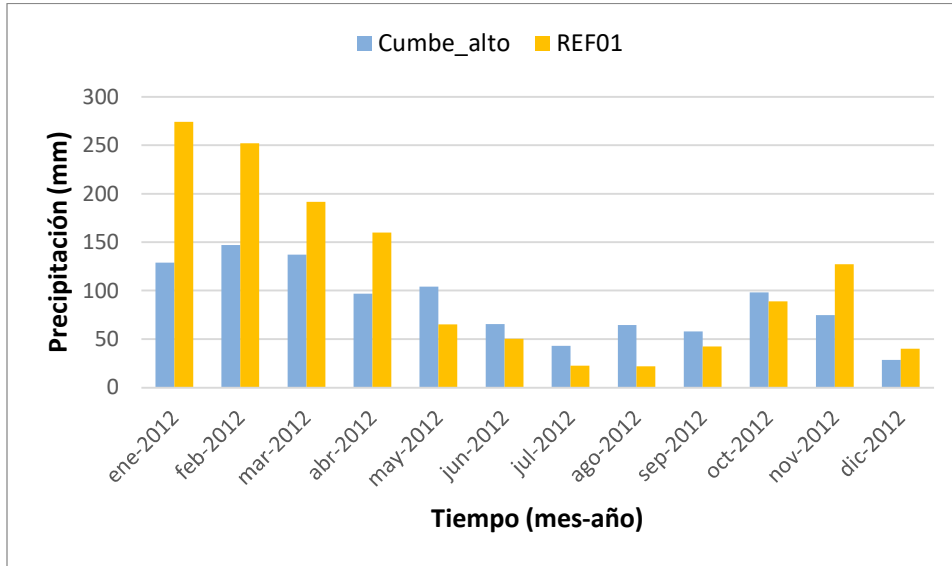
Fuente: Autor

Imagen 25 Precipitación mensual - Año 2011 – Cumbe Bajo



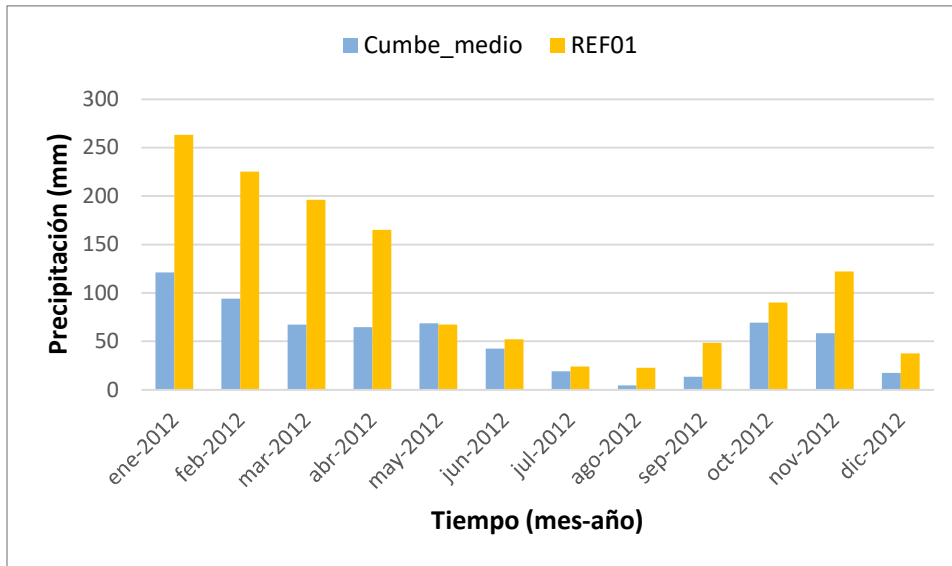
Fuente: Autor

Imagen 26 Precipitación mensual - Año 2012 – Cumbe Alto



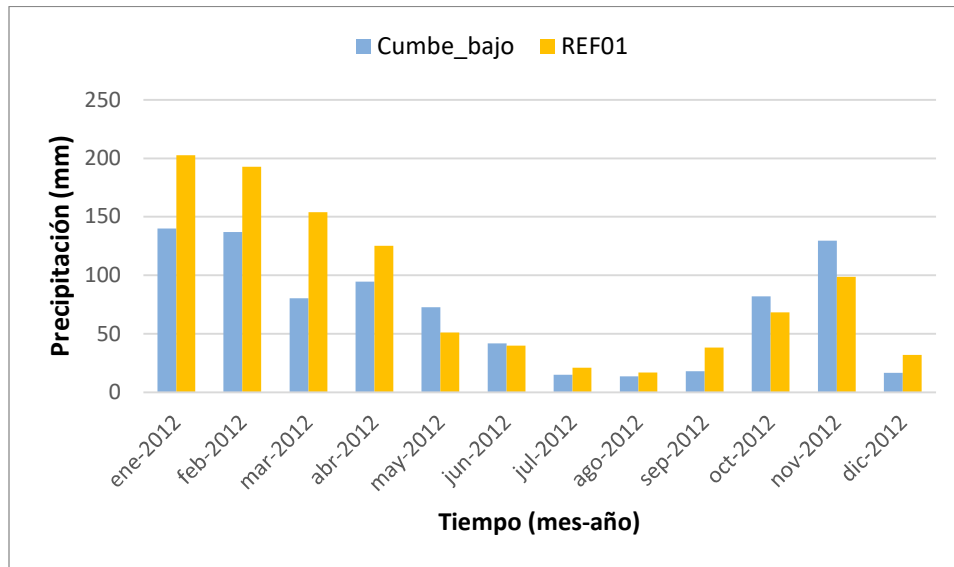
Fuente: Autor

Imagen 27 Precipitación mensual - Año 2012 – Cumbe Medio



Fuente: Autor

Imagen 28 Precipitación mensual - Año 2012 – Cumbe Bajo

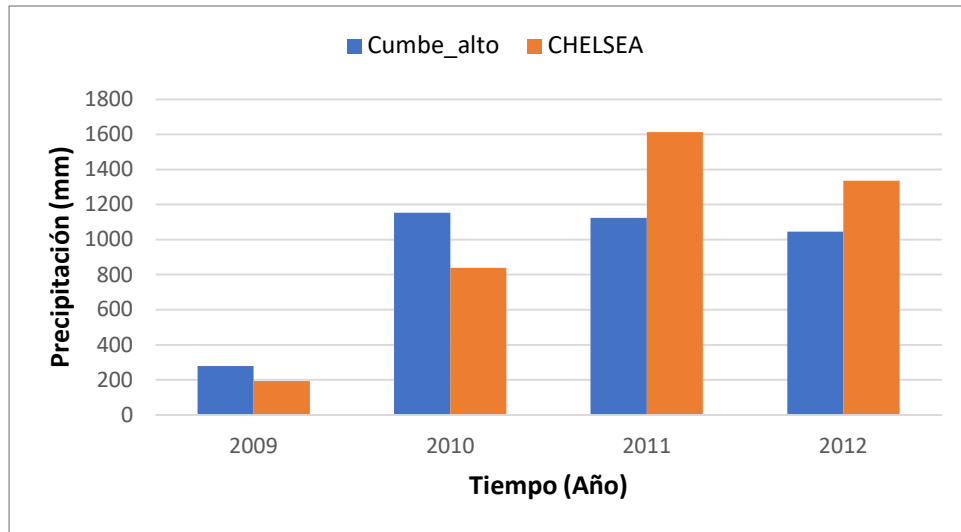


Fuente: Autor

A pesar de que los datos se han clasificado diaria y mensualmente como se presenta en las Imágenes 17-28, aún se pueden agrupar de forma anual. Al realizar esta agrupación anual, se podrá observar el comportamiento de las precipitaciones de una manera más notoria. Esto permitirá visualizar el comportamiento de las estaciones existentes y de las estaciones anuales, teniendo en cuenta el tiempo como el factor determinante.

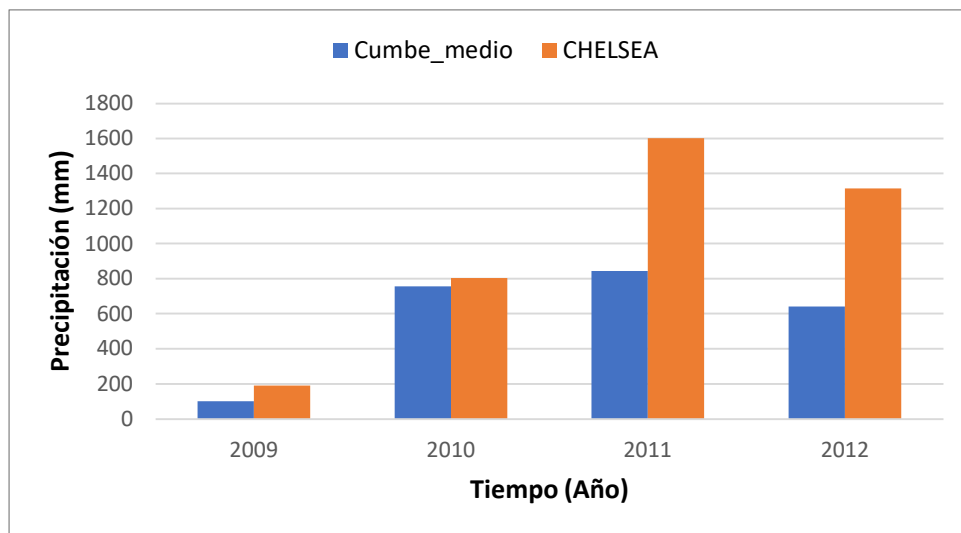
6.5. Representación de Precipitaciones de Forma Anual

Imagen 29 Precipitación anual - Cumbe alto



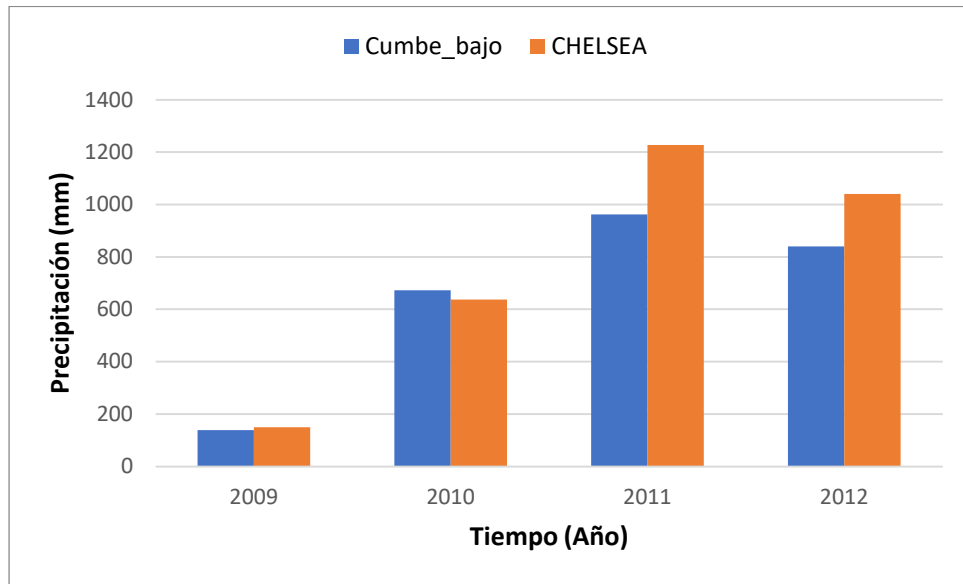
Fuente: Autor

Imagen 30 Precipitación anual - Cumbe medio



Fuente: Autor

Imagen 31 Precipitación anual - Cumbe bajo



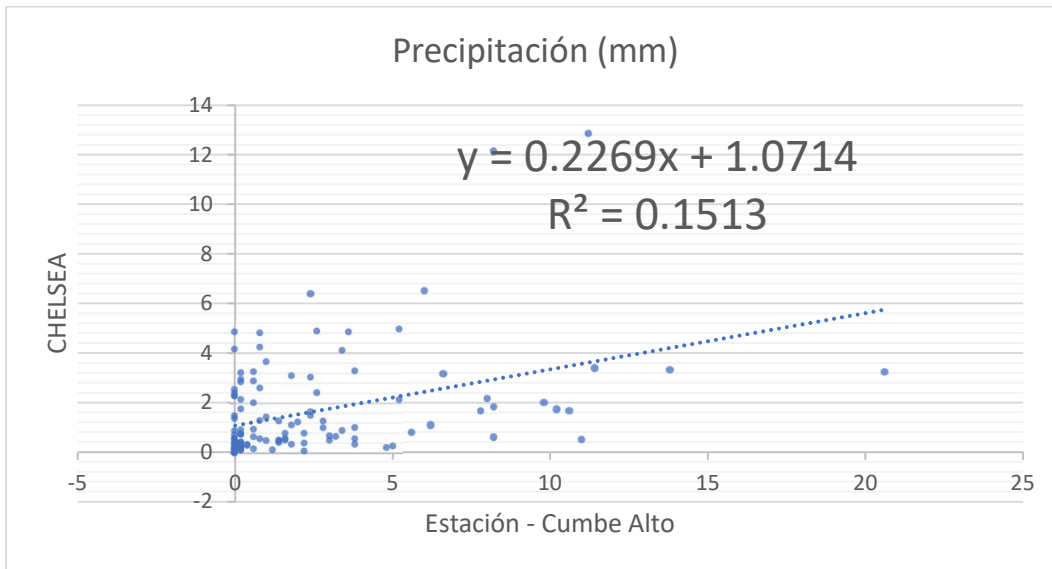
Fuente: Autor

Los gráficos obtenidos anteriormente Imagen 29 - 31 representan la comparación de los datos de las estaciones pluviométricas existentes con los valores proporcionados por CHELSA-EarthEnv en cada punto seleccionado en relación con el tiempo. No obstante, es necesario realizar también el análisis de dispersión de datos para observar la comparación entre cada dato de forma directa y analizar qué tan lejos de la realidad se encuentran.

6.6. Comparaciones Entre Datos de Lluvia Provenientes de Satélites y de Pluviómetros

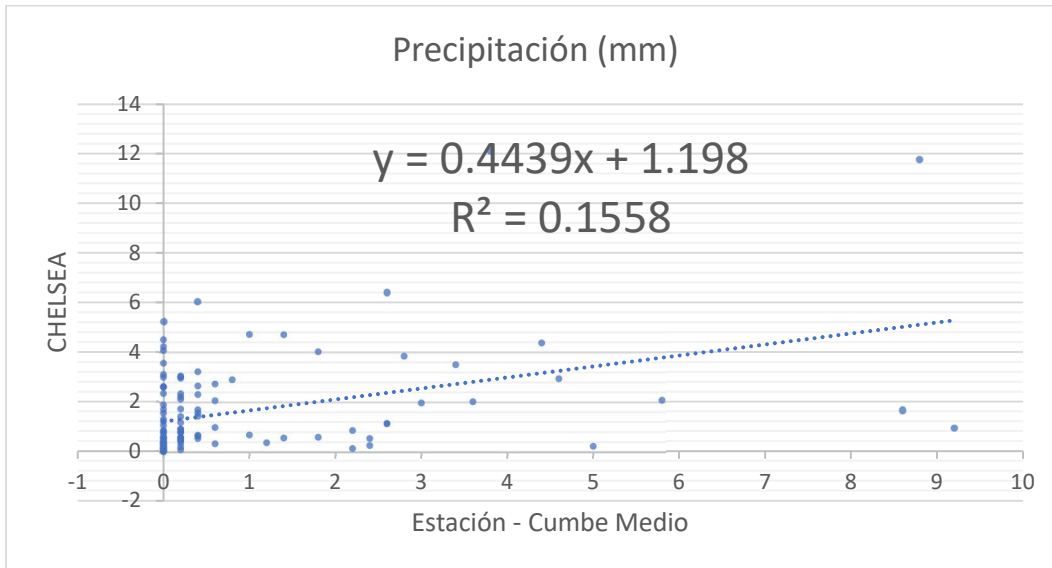
Es así como se procede nuevamente a rescatar todas las comparaciones posibles con el fin de poder visualizar las inconsistencias o las relaciones existentes dato a dato.

Imagen 32 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2009|Diario|Cumbe Alto



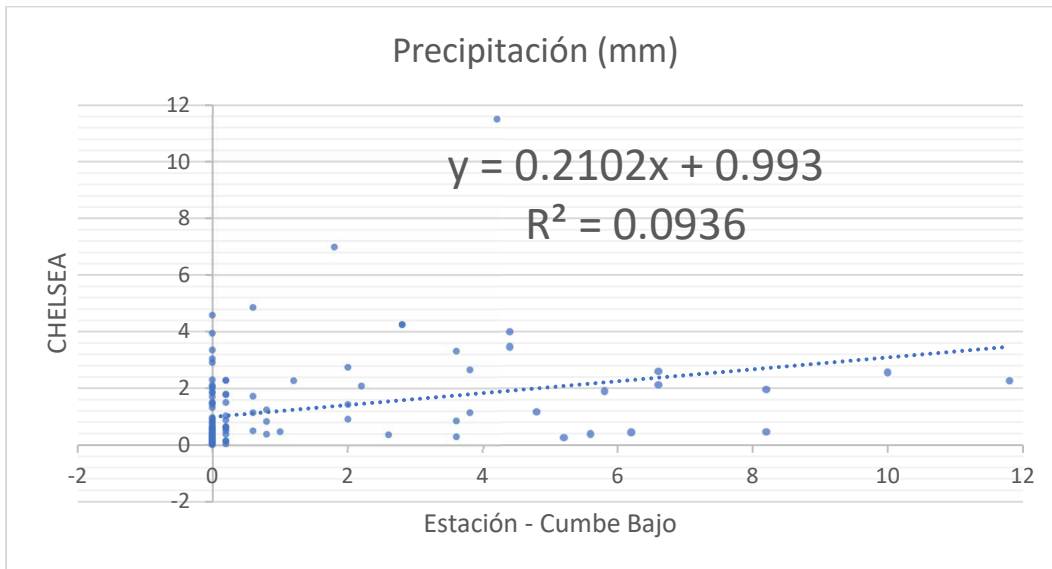
Fuente: Autor

Imagen 33 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2009|Diario|Cumbe Medio



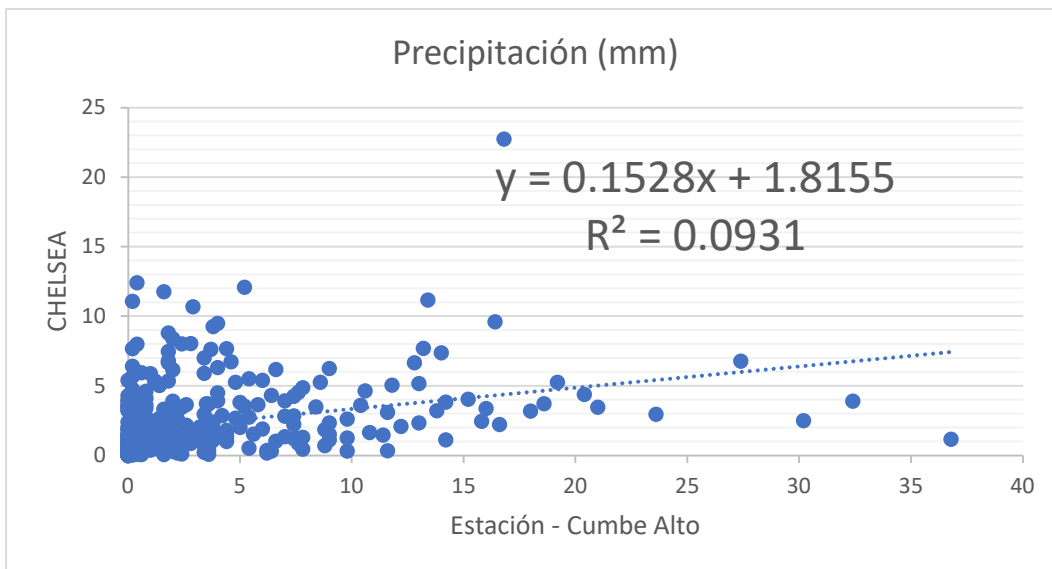
Fuente: Autor

Imagen 34 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2009|Diario|Cumbe Bajo



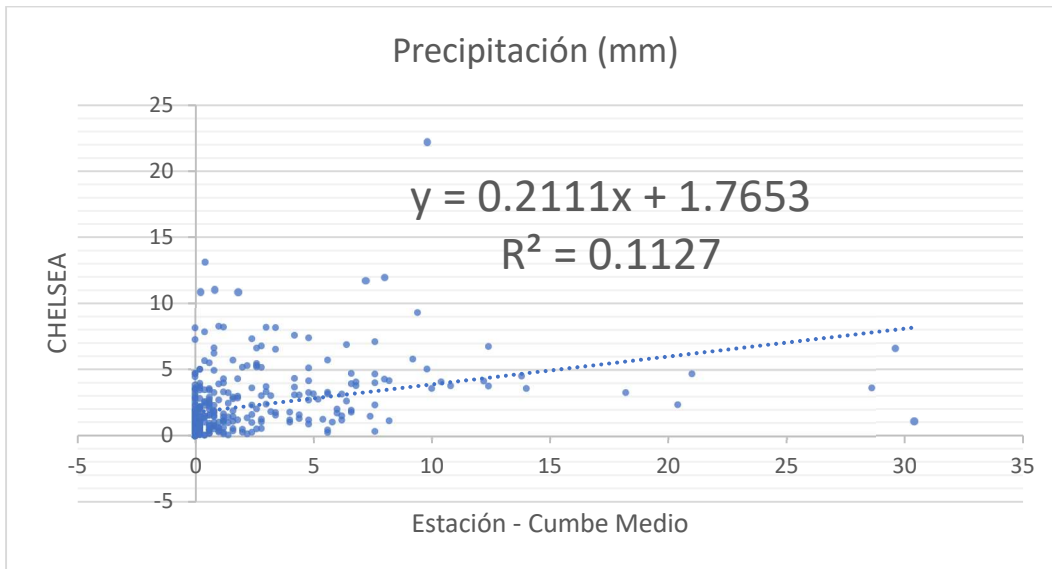
Fuente: Autor

Imagen 35 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2010|Diario|Cumbe Medio



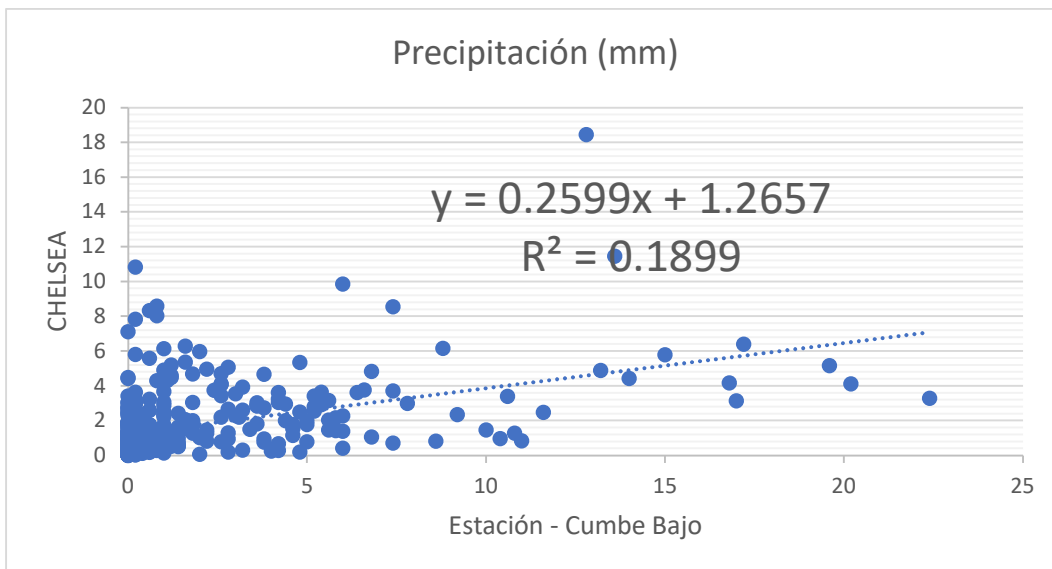
Fuente: Autor

Imagen 36 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2010|Diario|Cumbe Medio



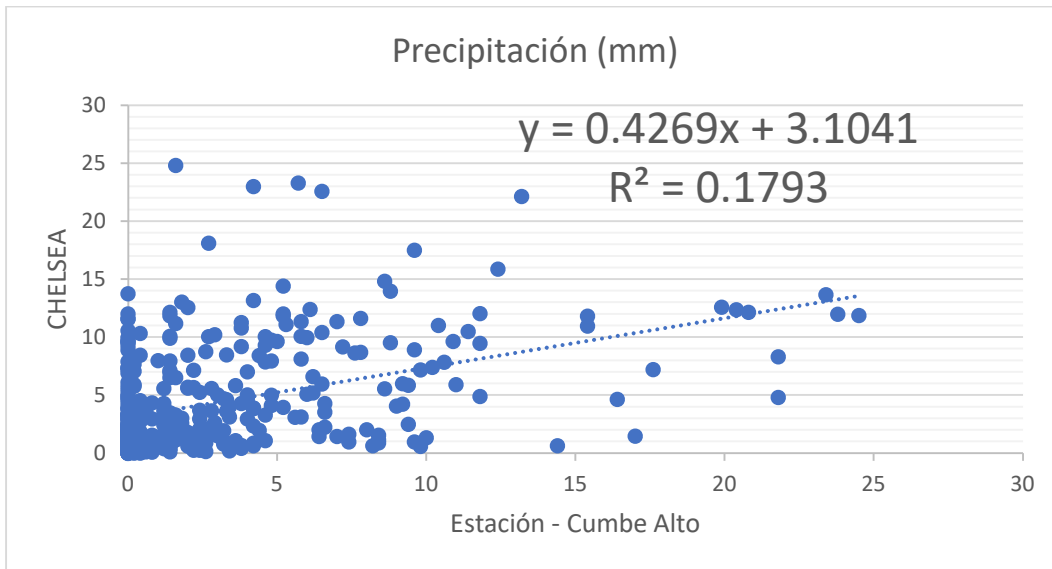
Fuente: Autor

Imagen 37 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2010|Diario|Cumbe Bajo



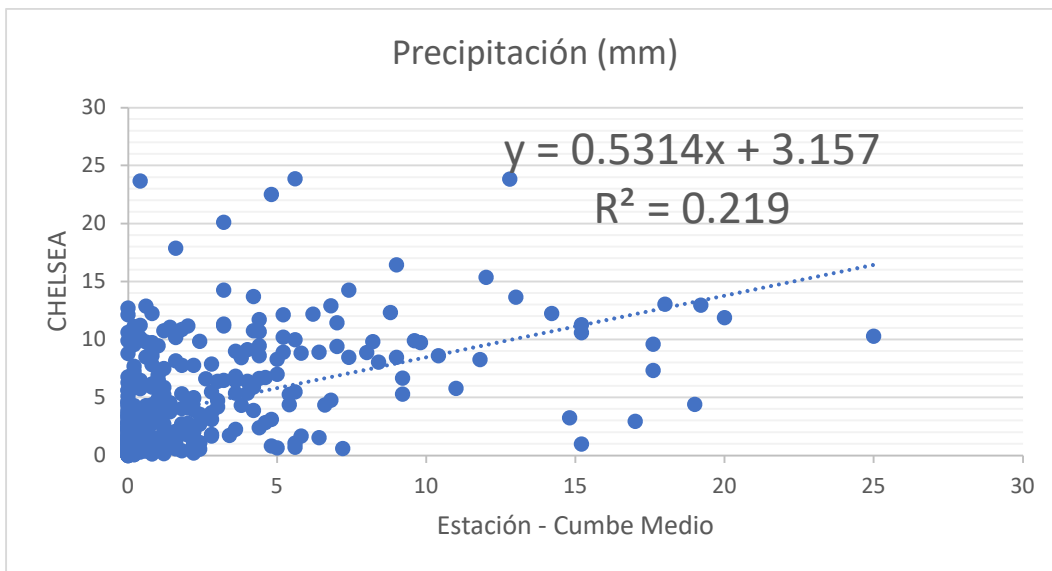
Fuente: Autor

Imagen 38 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2011 |Diario|Cumbe Alto



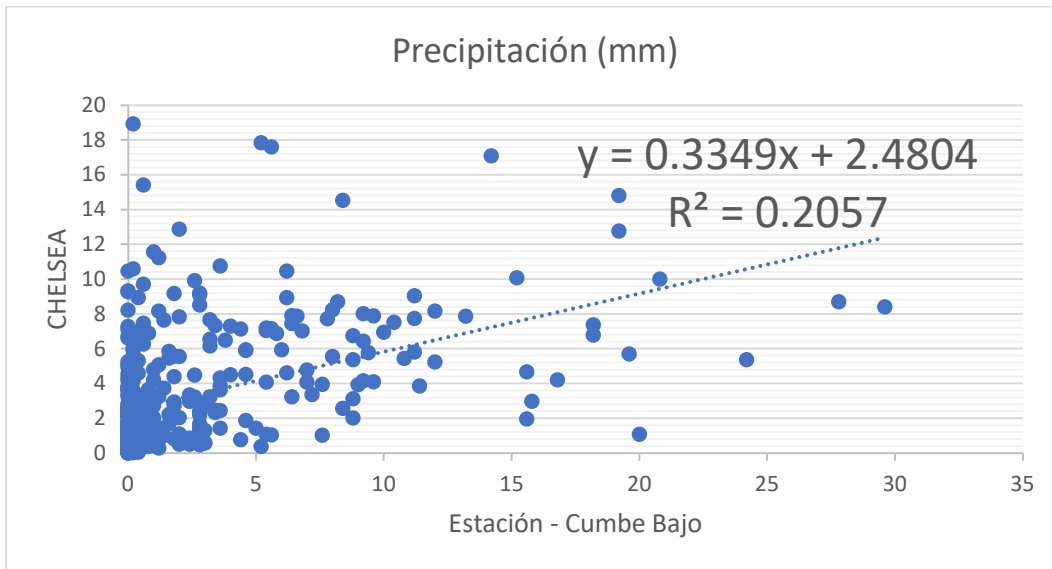
Fuente: Autor

Imagen 39 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2011 |Diario|Cumbe Medio



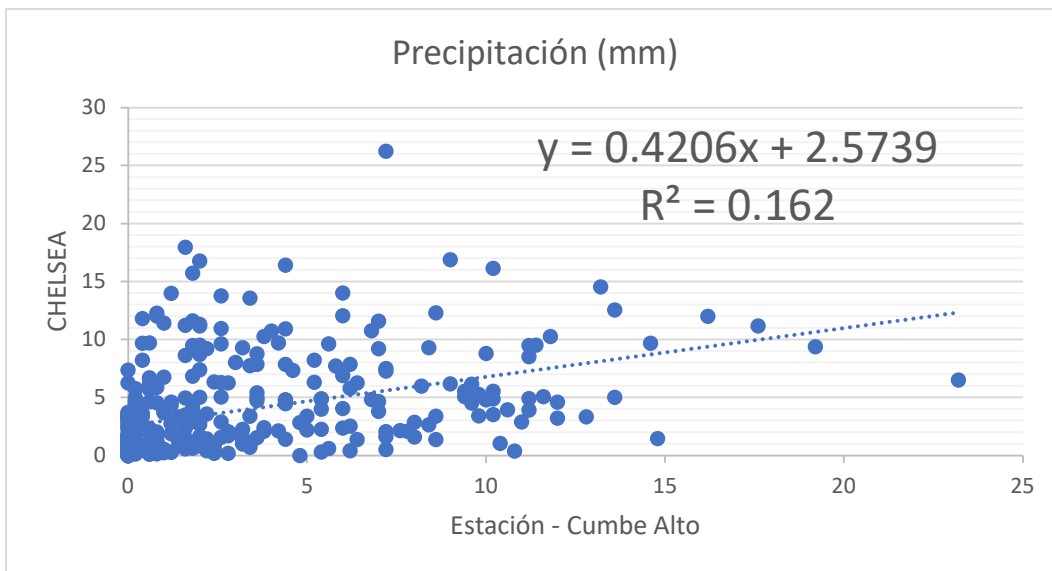
Fuente: Autor

Imagen 40 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2011|Diario|Cumbe Bajo



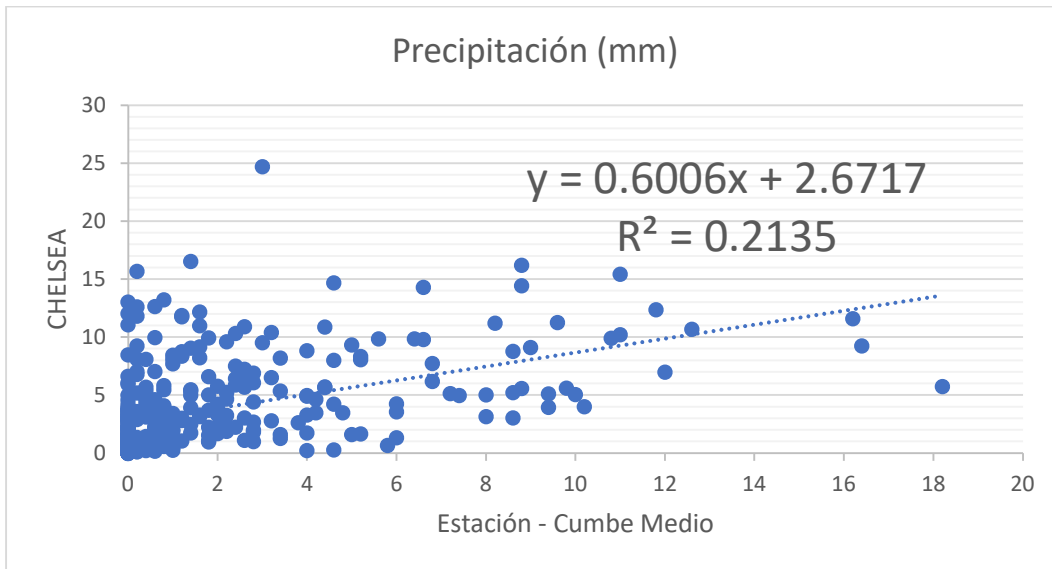
Fuente: Autor

Imagen 41 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2012|Diario|Cumbe Alto



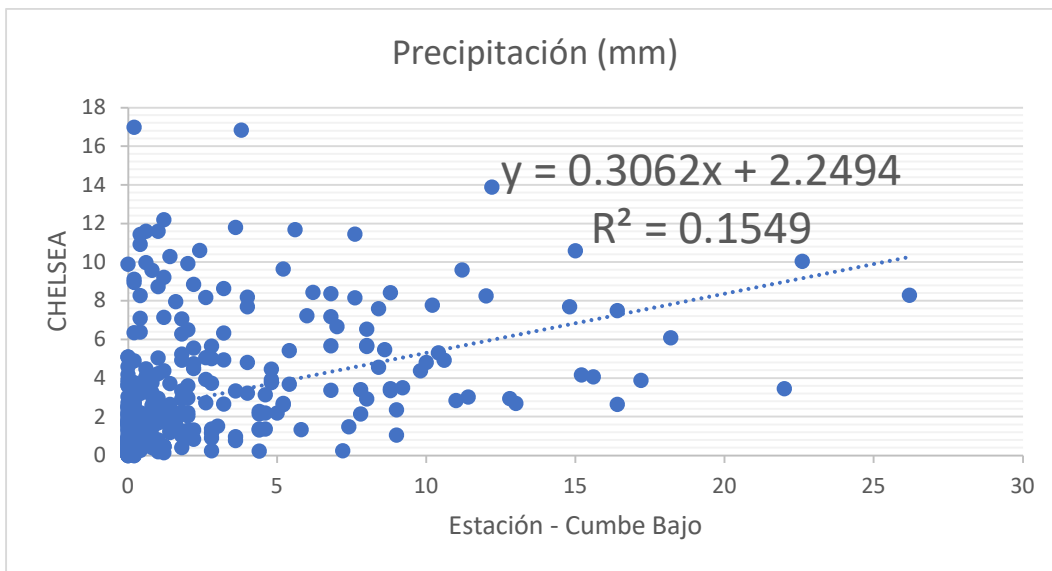
Fuente: Autor

Imagen 42 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas |2012|Diario|Cumbe Medio



Fuente: Autor

Imagen 43 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2012|Diario|Cumbe Bajo

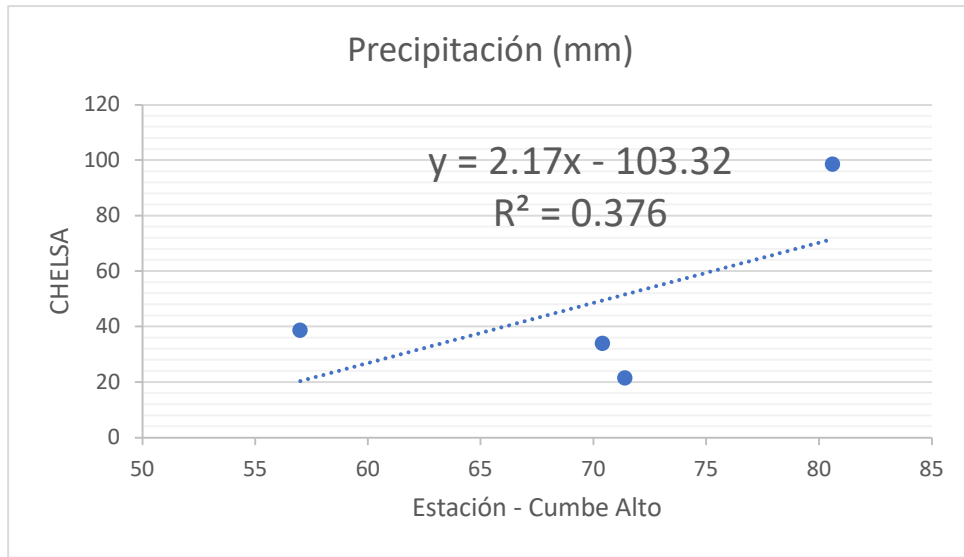


Fuente: Autor

Se obtiene el resultado de los gráficos de la imagen 32-43 donde se aprecia que la bondad de ajusta R2 se encuentra bastante alejada entre los valores, sin embargo, igual que con los datos

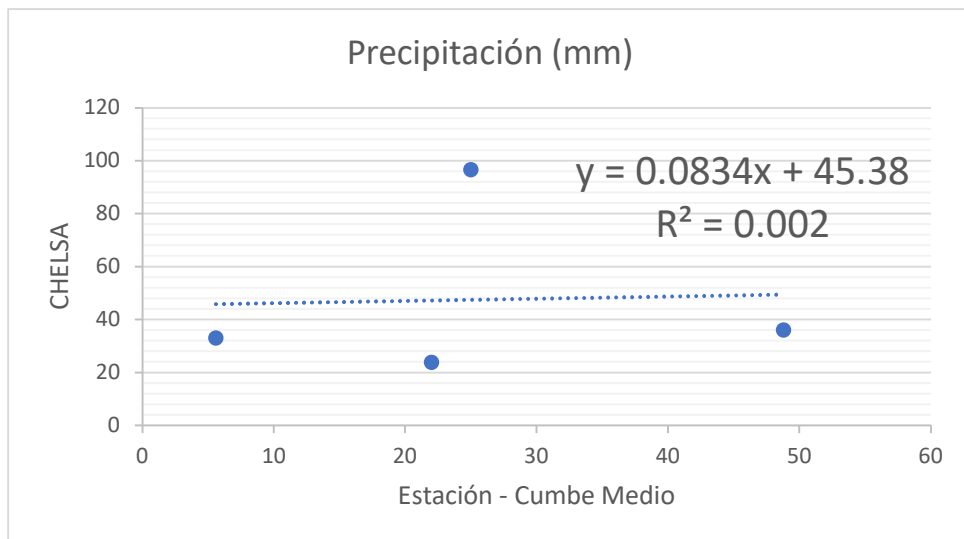
anteriores, se procede también a realizar el gráfico de forma mensual para observar las correlaciones entre los valores existentes, tanto satelitales como pluviométricos.

Imagen 44 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2009|Mensual|Cumbe Alto



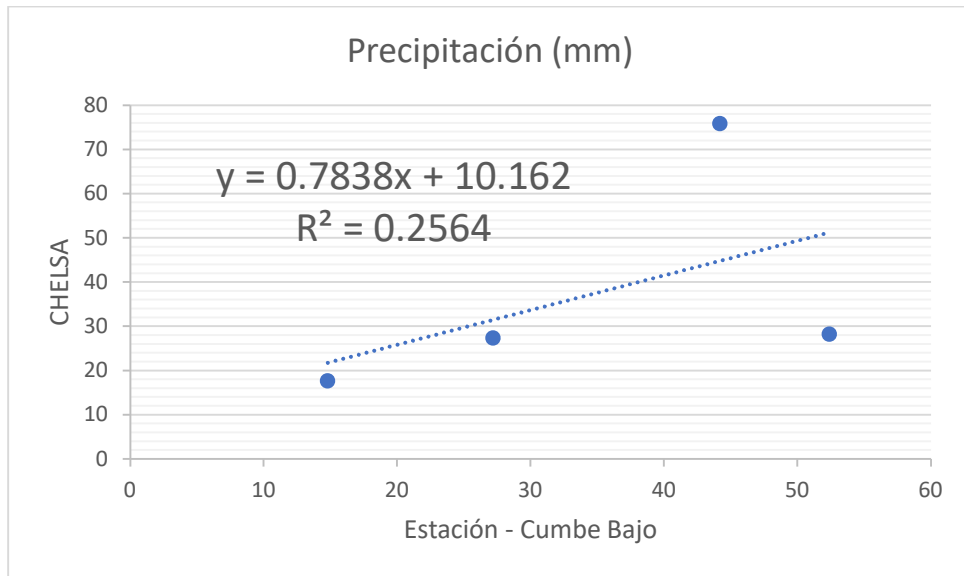
Fuente: Autor

Imagen 45 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2009|Mensual|Cumbe Medio



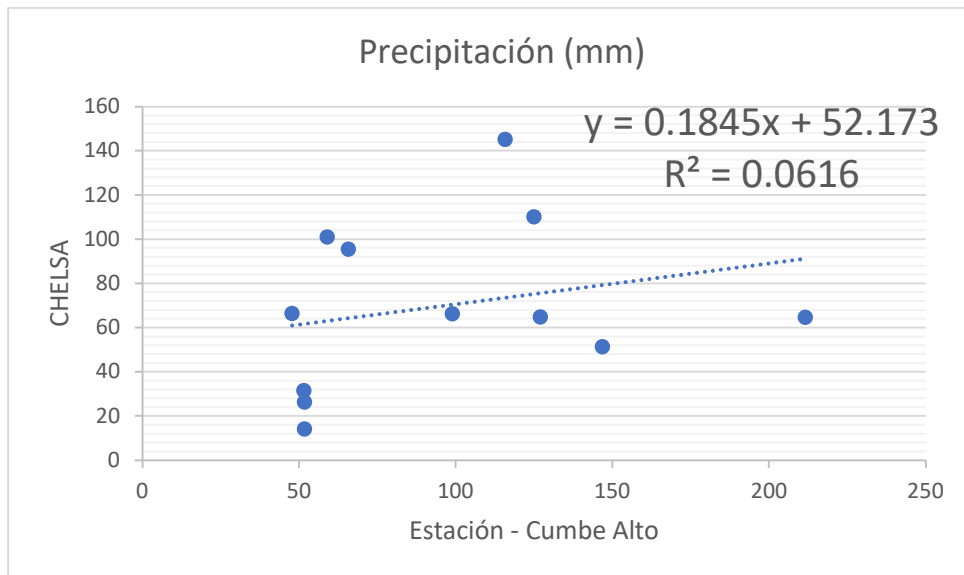
Fuente: Autor

Imagen 46 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2009 | Mensual | Cumbe Bajo



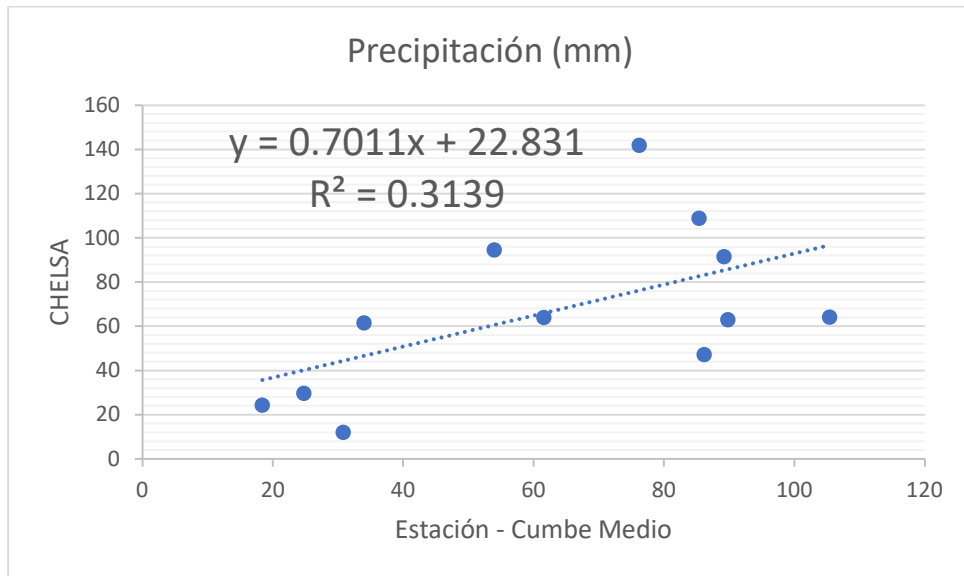
Fuente: Autor

Imagen 47 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2010 | Mensual | Cumbe Alto



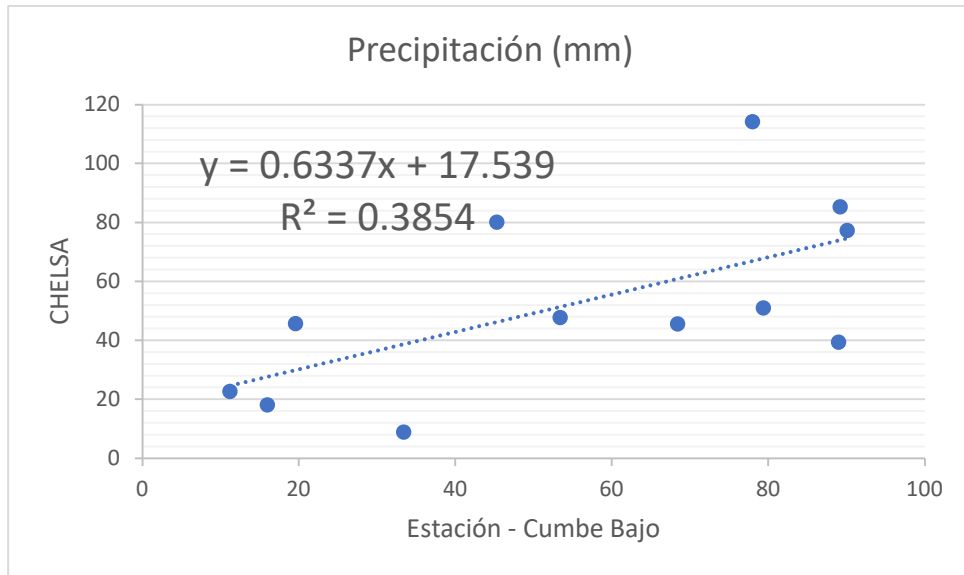
Fuente: Autor

Imagen 48 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2010|Mensual|Cumbe Medio



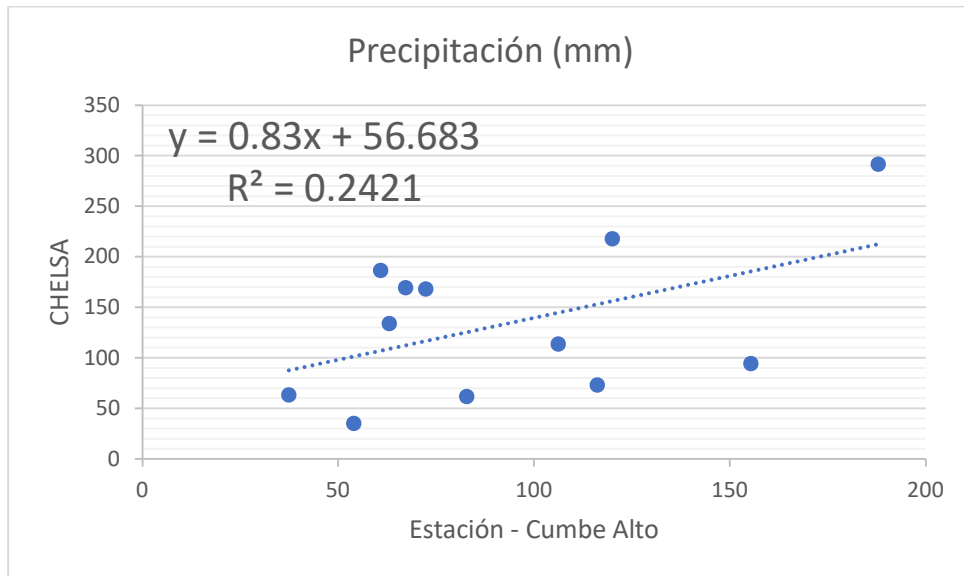
Fuente: Autor

Imagen 49 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2010|Mensual|Cumbe Bajo



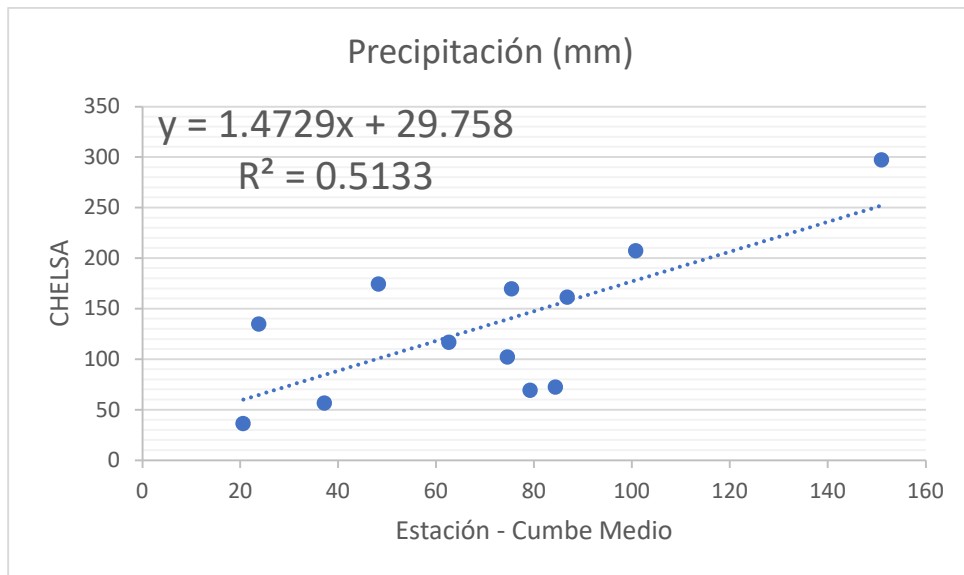
Fuente: Autor

Imagen 50 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2011 | Mensual | Cumbe Alto



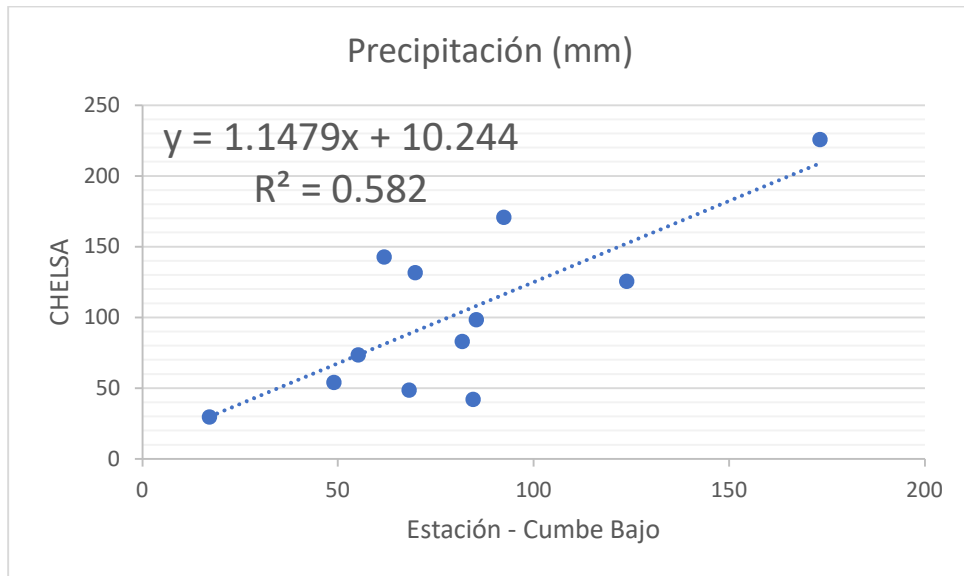
Fuente: Autor

Imagen 51 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2011 | Mensual | Cumbe Medio



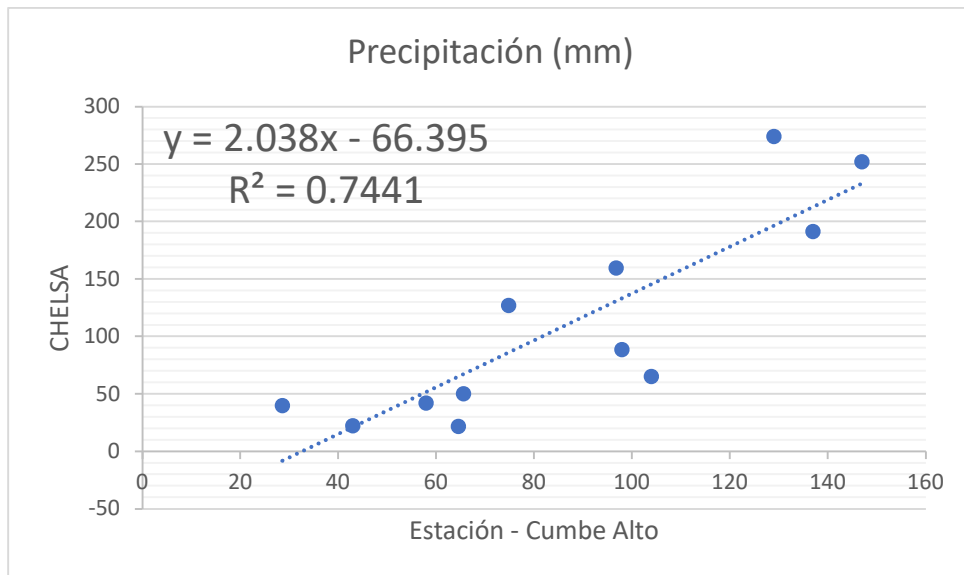
Fuente: Autor

Imagen 52 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2011 | Mensual | Cumbe Bajo



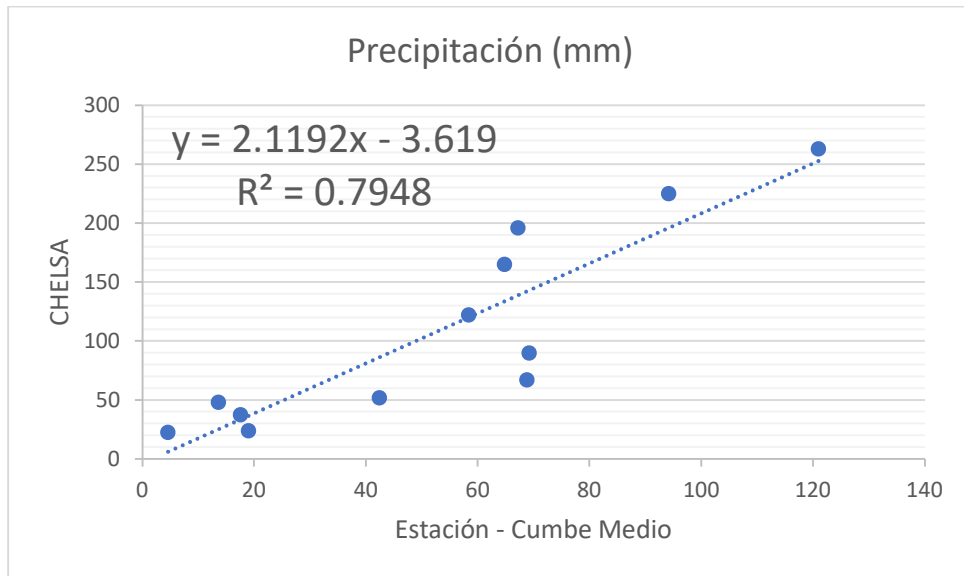
Fuente: Autor

Imagen 53 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2012 | Mensual | Cumbe Alto



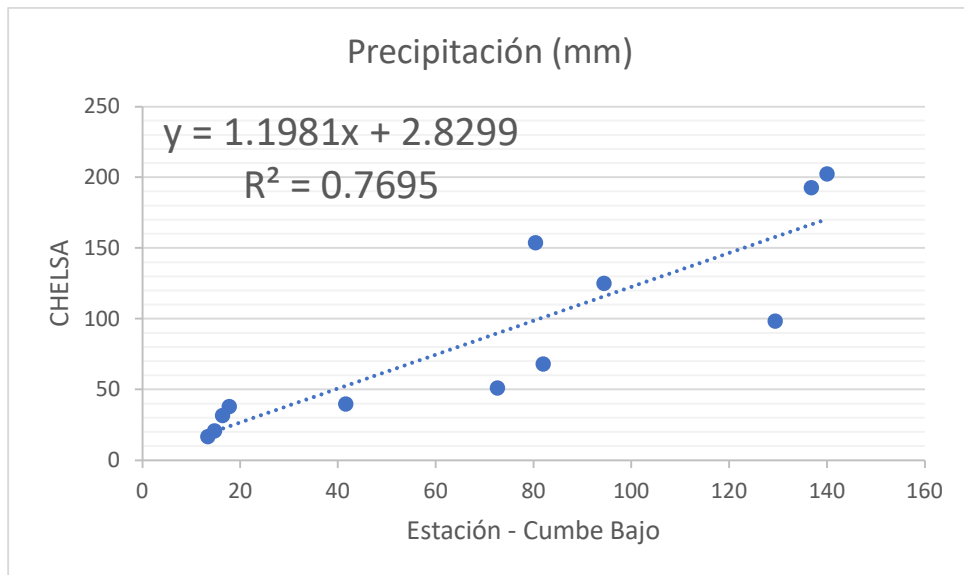
Fuente: Autor

Imagen 54 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2012 | Mensual | Cumbe Medio



Fuente: Autor

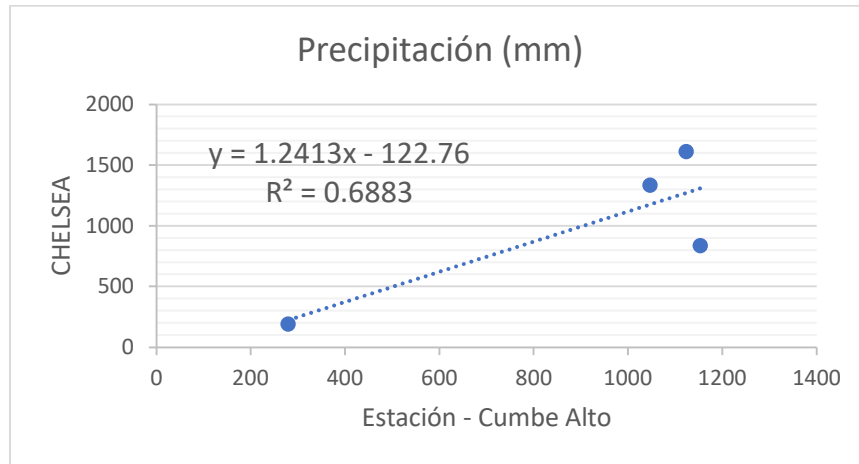
Imagen 55 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-2012 | Mensual | Cumbe Bajo



Fuente: Autor

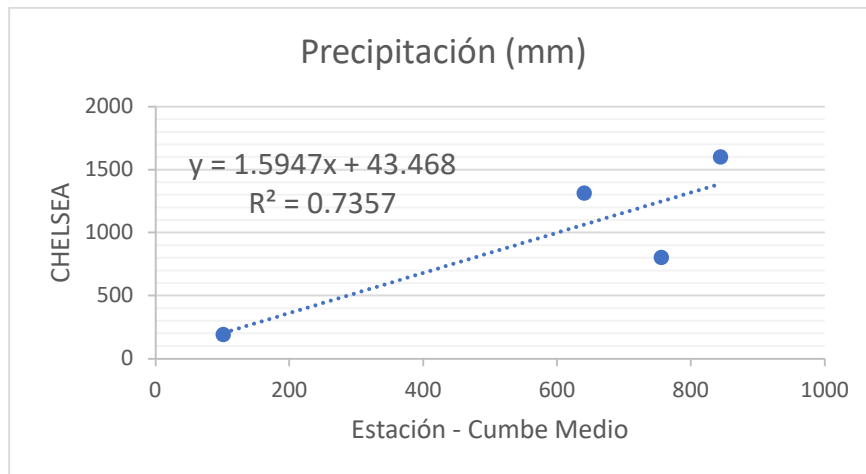
Se pueden visualizar las Imágenes 44- 55 de forma mensual, de igual manera, se realizaron los últimos gráficos comparativos de forma anual para poder visualizar también el comportamiento de los datos bajo este esquema.

Imagen 56 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-Anual|Cumbe Alto

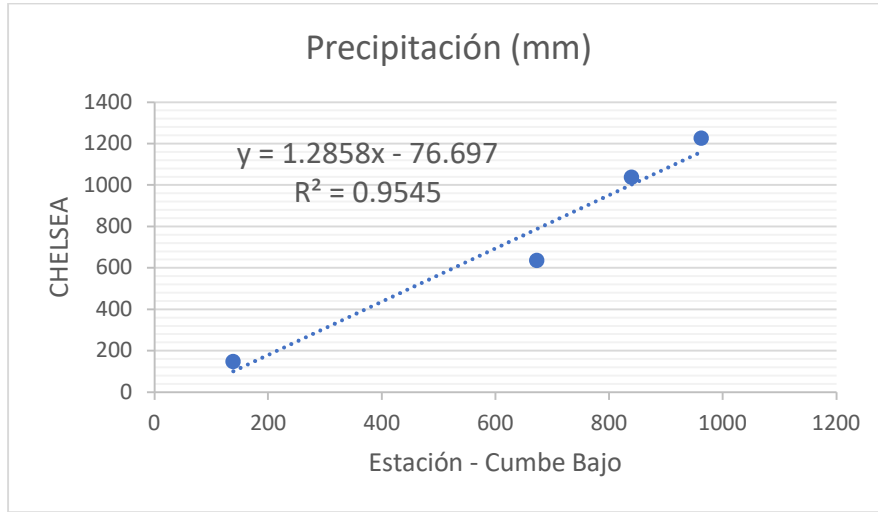


Fuente: Autor

Imagen 57 CHELSA-EarthEnv Vs Estaciones Pluviométricas-Anual|Cumbe Medio



Fuente: Autor



Fuente: Autor

En los gráficos anuales presentados en las Imágenes 56-58, se observa una aproximación bastante buena de 0,9545 en su bondad de ajuste R², reflejada en la gráfica de la Imagen 61.

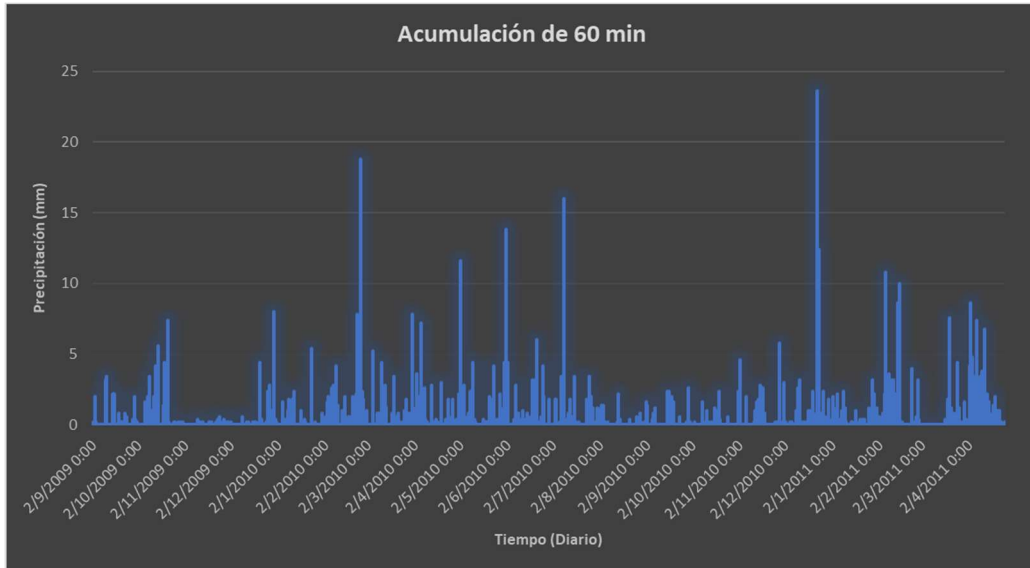
La investigación global de la precipitación se ha vuelto común, ya que constituye un componente meteorológico fundamental en el ciclo hidrológico y desempeña un papel indispensable como fuente primaria de abastecimiento para diversos recursos hídricos.

6.7. Acumulación de Precipitaciones Sobre la Zona de Estudio

Aprovechando los datos de precipitación minuto a minuto, se procede a realizar una evaluación de la acumulación de precipitación en el lapso de 60 minutos. Esto permite evaluar los periodos de tormentas que se han desarrollado sobre el lugar de estudio, con el fin de determinar y analizar eventos de precipitaciones previos a deslizamientos. En particular, se toman los datos de la estación Cumbe Medio, dado que se cuenta con historial de un desprendimiento de tierra cercano a este lugar.

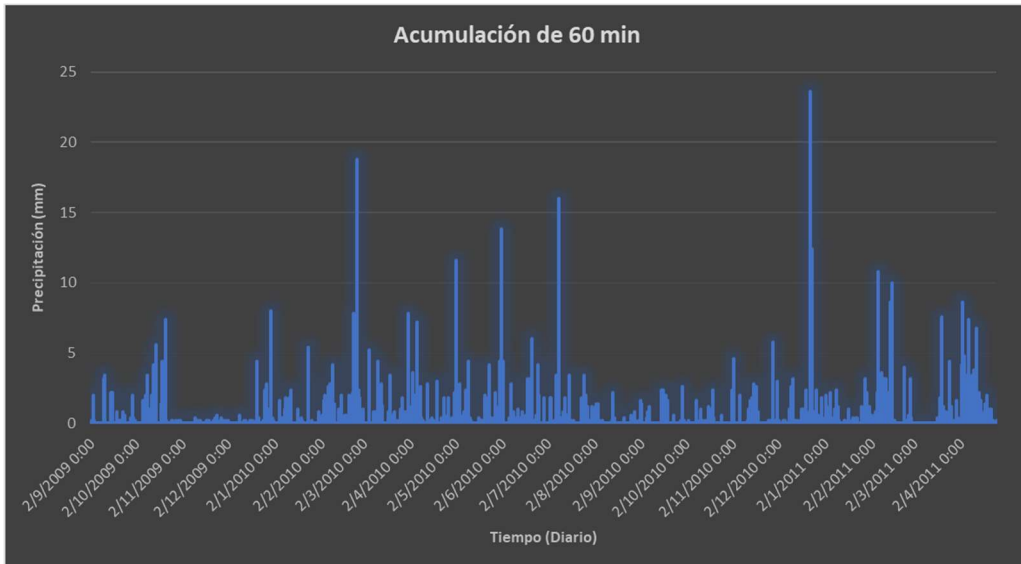
Una vez que los valores se han segmentado a 60 minutos, se procede a realizar un gráfico con el objetivo de visualizar los periodos de tormenta más extremos.

Imagen 59 Acumulación de precipitación - Pt1



Fuente: Autor

Imagen 60 Acumulación de precipitación – Pt2

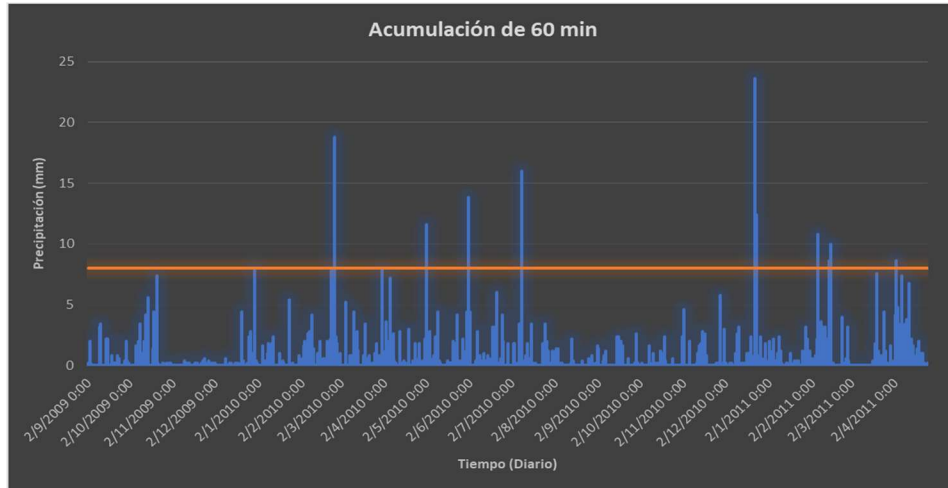


Fuente: Autor

6.8. Análisis de Tormentas

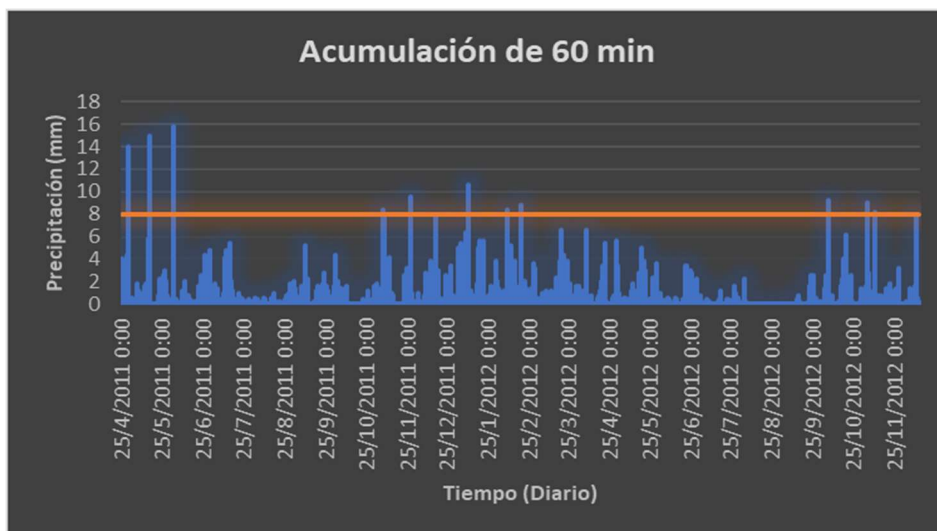
A continuación, se procede a clasificar las precipitaciones mayores a 8 mm con el fin de catalogarlas como aquellas de mayor duración e impacto sobre el área, es decir tormentas.

Imagen 61 Análisis de Tormenta > 8 mm - Pt1



Fuente: Autor

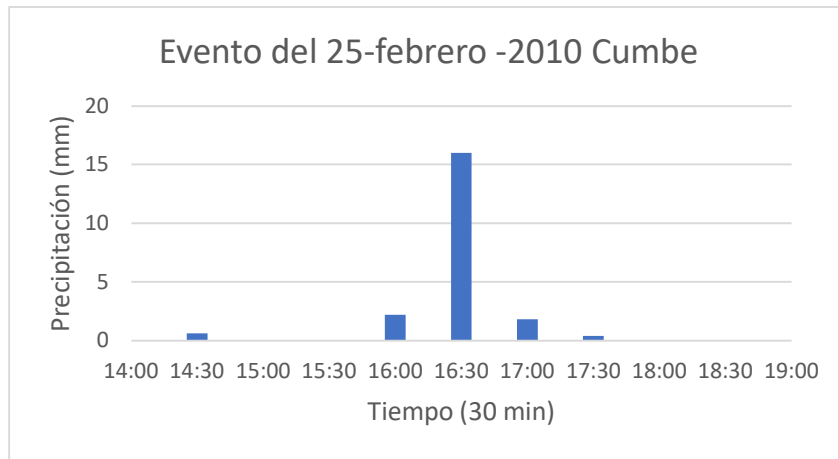
Imagen 62 Análisis de Tormenta > 8 mm - Pt2



Fuente: Autor

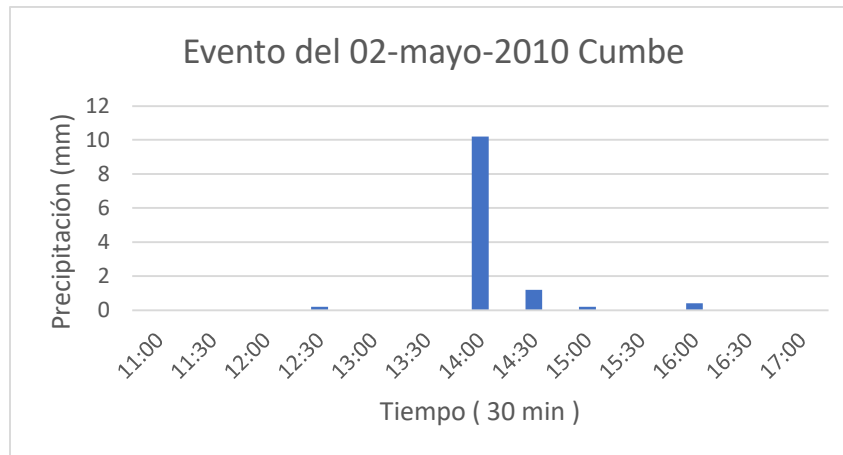
Al delimitar las tormentas, se procede a realizar un conteo del total de tormentas presentadas bajo el rango de 60 minutos con más de 8 mm de precipitación. El resultado es de alrededor de 17 tormentas de forma individual correspondientes a la base de datos. Estas se expresan a continuación:

Imagen 63 Tormenta 25-02-2010



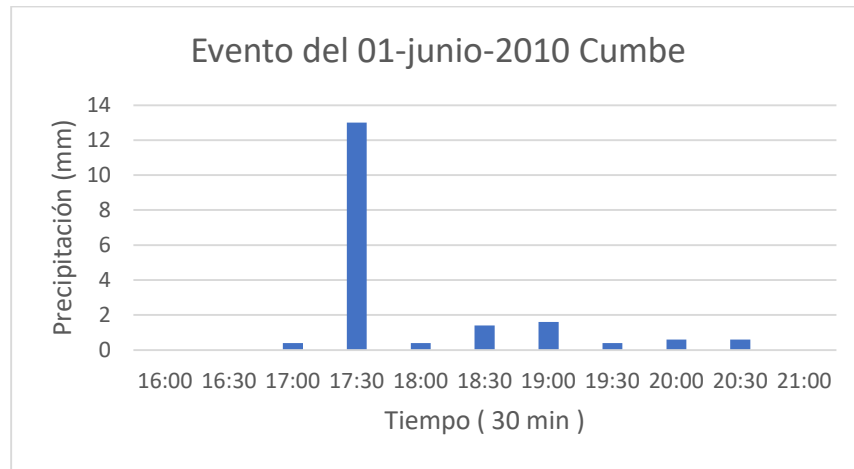
Fuente: Autor

Imagen 64 Tormenta 02-05-2010



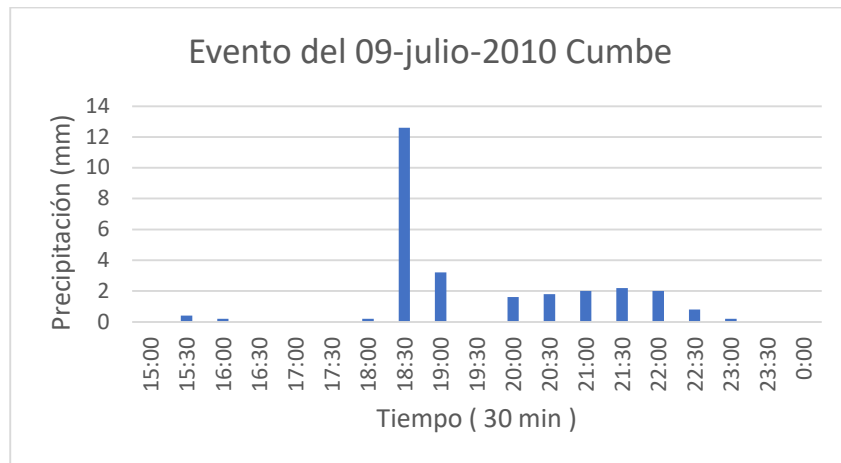
Fuente: Autor

Imagen 65 Tormenta 01-06-2010



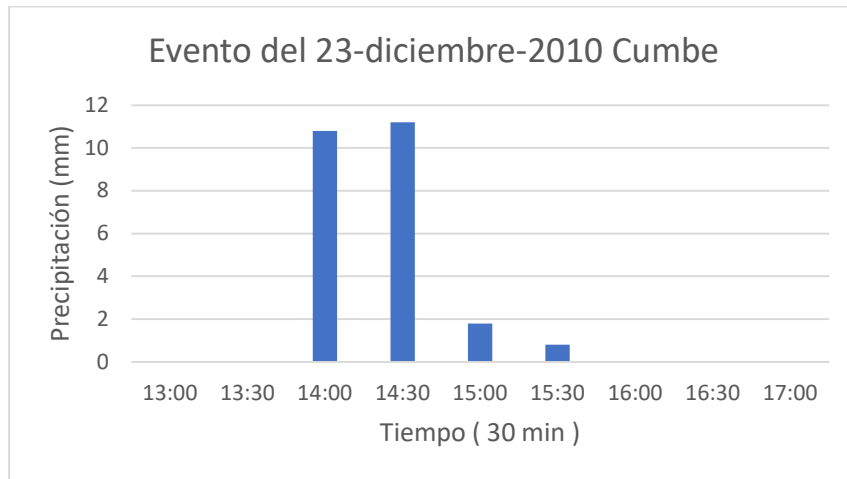
Fuente: Autor

Imagen 66 Tormenta 09-07-2010



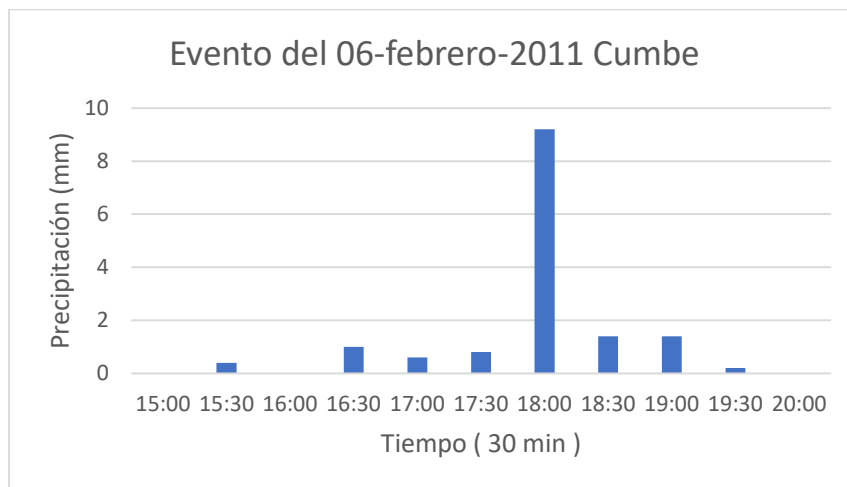
Fuente: Autor

Imagen 67 Tormenta 23-12-2010



Fuente: Autor

Imagen 68 Tormenta 06-02-2011



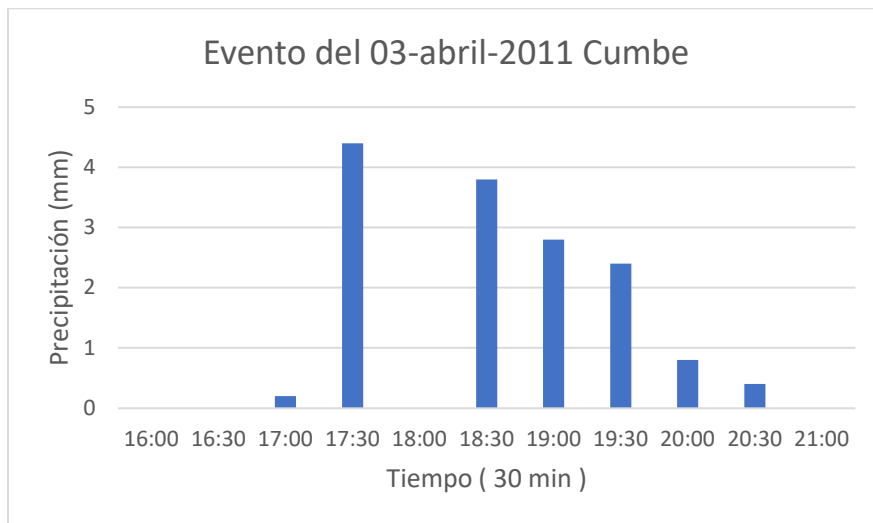
Fuente: Autor

Imagen 69 Tormenta 15-02-2011



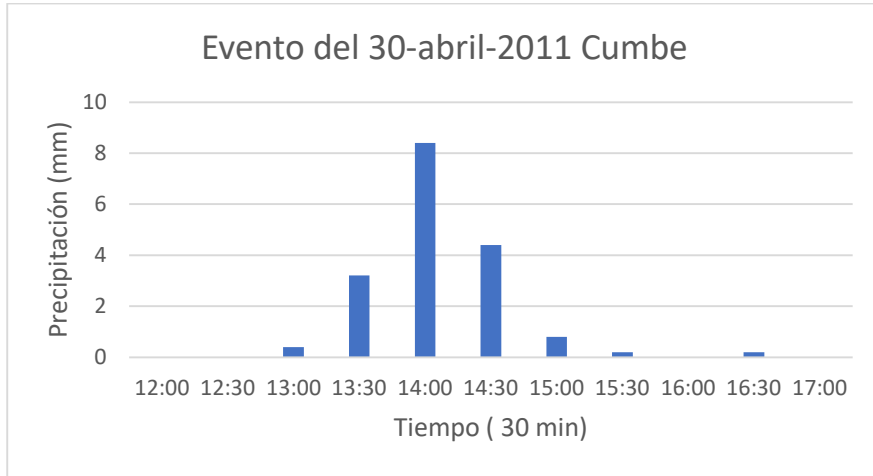
Fuente: Autor

Imagen 70 Tormenta 03-04-2011



Fuente: Autor

Imagen 71 Tormenta 30-04-2011



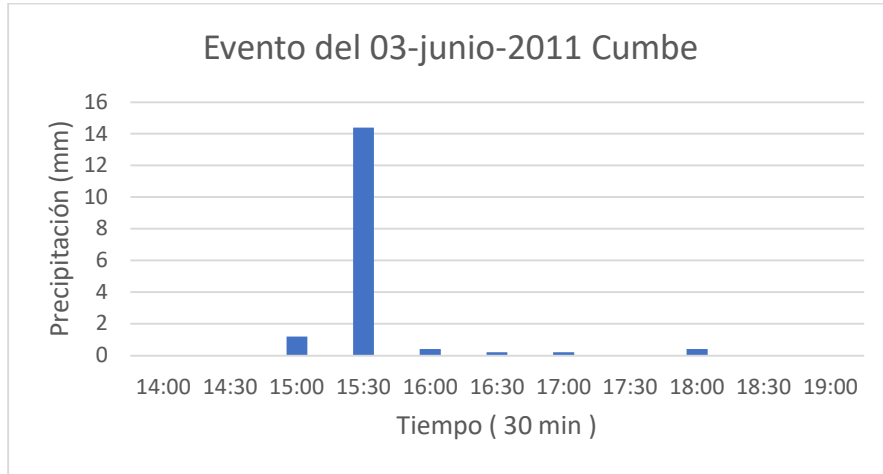
Fuente: Autor

Imagen 72 Tormenta 16-05-2011



Fuente: Autor

Imagen 73 Tormenta 03-06-2011



Fuente: Autor

Imagen 74 Tormenta 07-11-2011



Fuente: Autor

Se obtienen todos estos productos presentados en las gráficas, lo que permite contemplar de mejor manera el impacto de las precipitaciones sobre la zona de estudio.

Tabla 4 Caracterización de tormentas

Fecha	Cantidad Total de Lluvia (mm)	Intensidad máxima de lluvia (mm)
25/02/2010	21	16
02/05/2010	13	10.2
01/06/2010	24.4	13
09/07/2010	27.2	12.6
23/12/2010	27.2	11.2
06/02/2011	15	9.2
15/02/2011	15.8	8.8
03/04/2011	14.8	4.4
30/04/2011	17.6	8.4
16/05/2011	15.2	13.2
03/06/2011	17	14.4
07/11/2011	19.2	4

Fuente: Autor

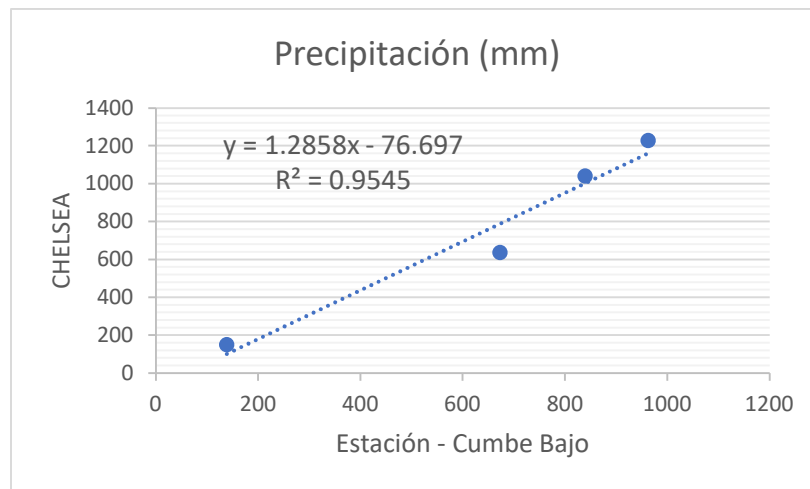
En la Tabla 4, se puede apreciar los valores de cantidad total de lluvia y la intensidad máxima en acuerdo con las Imágenes 63 – 74, los datos descritos sirven para observar de mejor manera el comportamiento de las tormentas.

7. Resultados

En base a las comparaciones entre los valores del CHELSA-EarthEnv que se observan en la Tabla 2 y los de las estaciones pluviométricas reflejados en la Tabla 3, se puede observar que no existen muchas coincidencias cercanas entre ellas. Incluso, en algunos meses, los valores difieren considerablemente de la realidad como por ejemplo en la Imagen 24 y la Imagen 27. Sin embargo, es necesario enfatizar que, para los meses de agosto, septiembre y octubre, los valores coinciden de forma cercana entre ellas. En segundo lugar, mayo también presenta coincidencias cercanas, haciendo referencia a las comparaciones mensuales.

Si se opta por revisar las precipitaciones anuales, se puede notar que, para las estaciones de Cumbe Bajo, en conjunto con los datos tomados cercanos a este sitio, existe una aproximación bastante buena como se observa en la Imagen 75, es decir, mayor cercanía en comparación con las demás estaciones, ya que el valor de bondad de ajuste R^2 es el más cercano a 1.

Imagen 75 Comparación más cercana - Estación cumbe bajo



Fuente: Autor

Al analizar el gráfico general de tormentas reflejado en la Imagen 61 y 62, resulta interesante observar la forma de estas y de igual forma su caracterización reflejada en la Tabla 4. Se enfatiza en lo mencionado anteriormente, y se pueden visualizar patrones similares para el mes de mayo en los tres años que abarca la base de datos de las estaciones físicas.

Ahora bien, basándose en los resultados obtenidos y en un proceso de investigación, se ha determinado una fecha específica correspondiente a un deslizamiento. Esta fecha se sitúa el 10 de mayo de 2010, cerca de la estación de Cumbe Medio, lugar donde se produjo el siguiente suceso visual, reflejado en la Imagen 76:

Imagen 76 Deslizamiento 10-05-2010

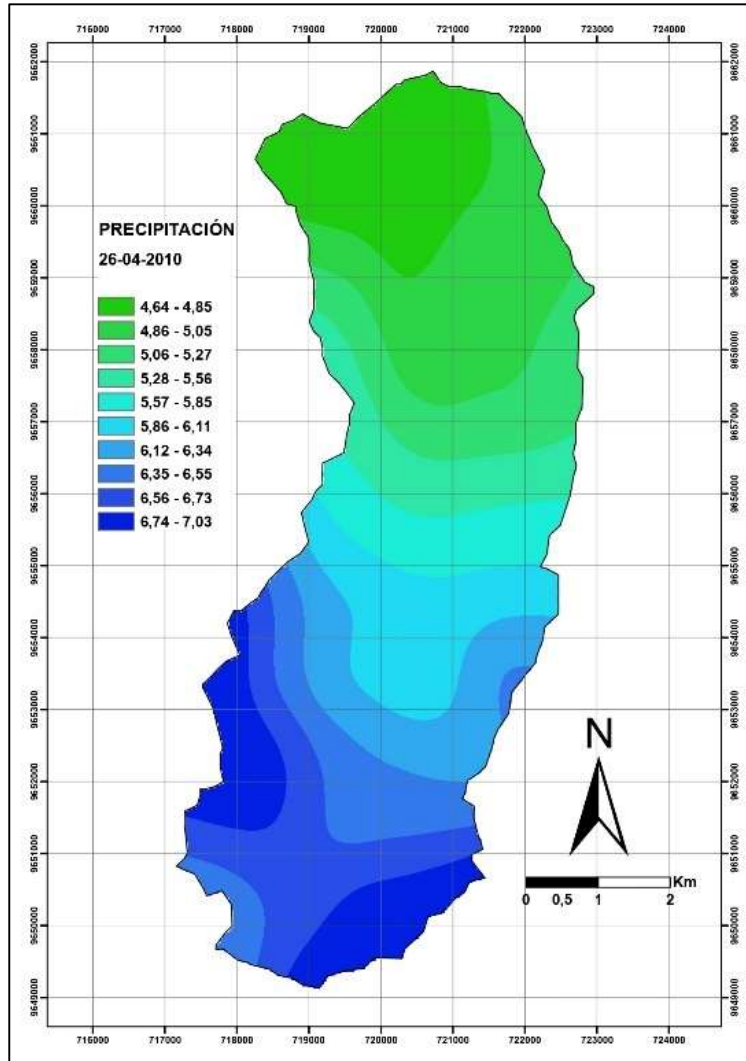


Fuente: Ing. Vicente Iñiguez

Sin embargo, para llegar a este punto, debieron haberse producido eventos previos en cuanto a precipitaciones. Utilizando los datos recopilados anteriormente, se procederá a crear un mapa de precipitaciones, centrándose en fechas anteriores al deslizamiento hasta llegar a dicho evento.

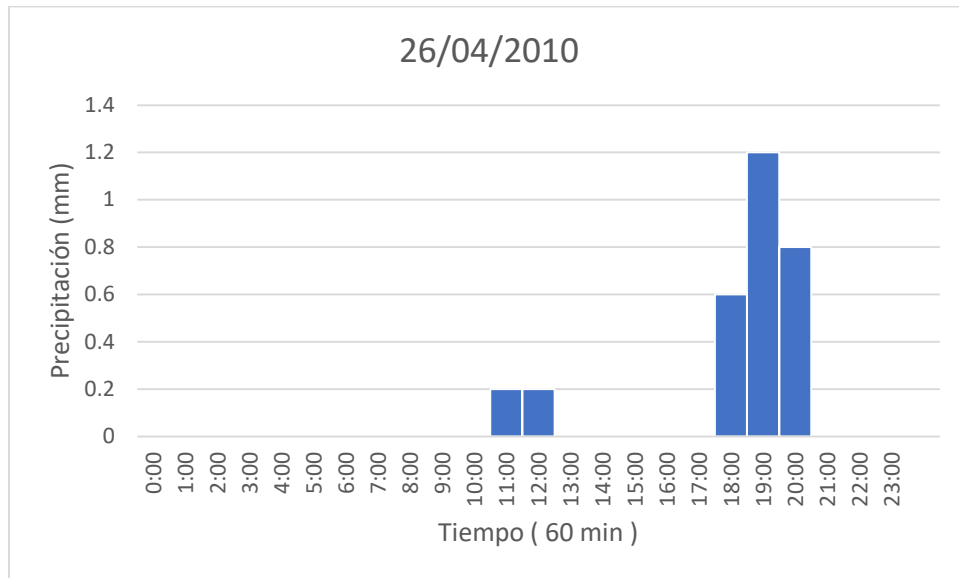
Todo este proceso arroja el siguiente resultado:

Imagen 77 Mapa 15 días antes del deslizamiento



Fuente: Autor

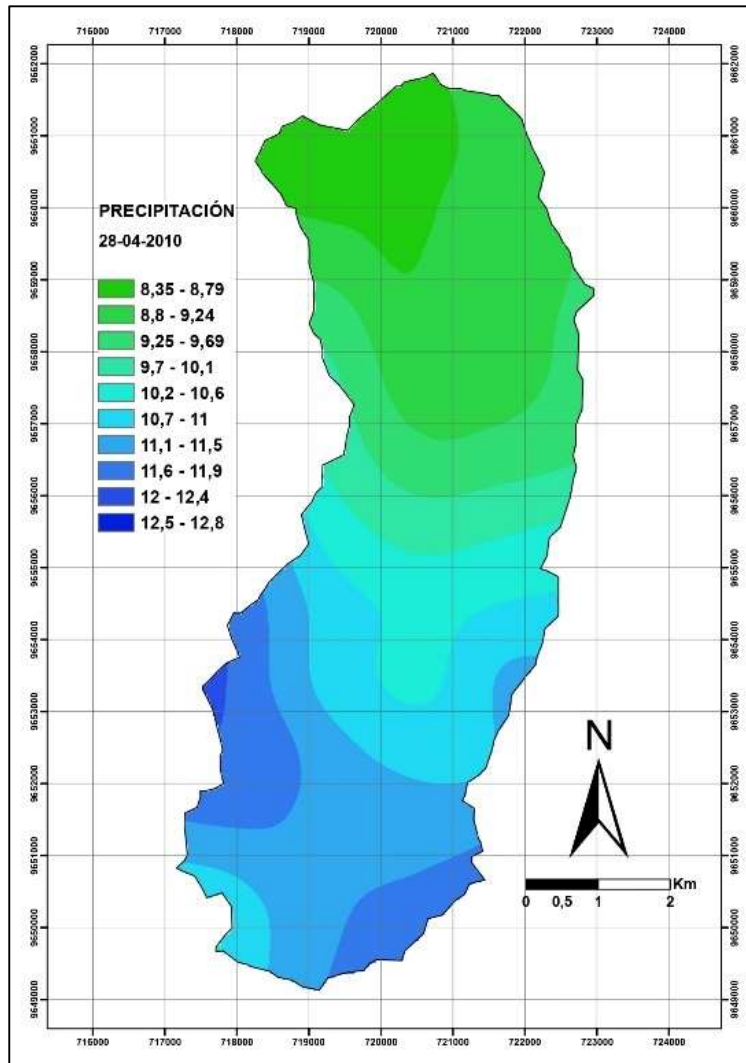
Imagen 78 Lluvia 15 días antes del deslizamiento



Fuente: Autor

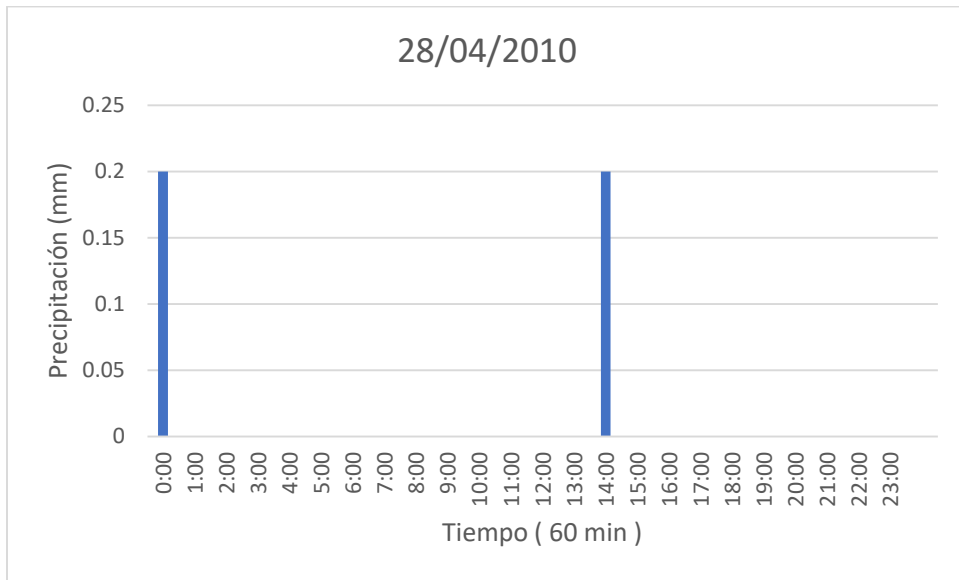
La imagen 77, refleja el estado de las condiciones de humedad antecedentes en términos de precipitaciones sobre el área de estudio, en este caso, 15 días previos a que se produzca el deslizamiento.

Imagen 79 Mapa 13 días antes del deslizamiento



Fuente: Autor

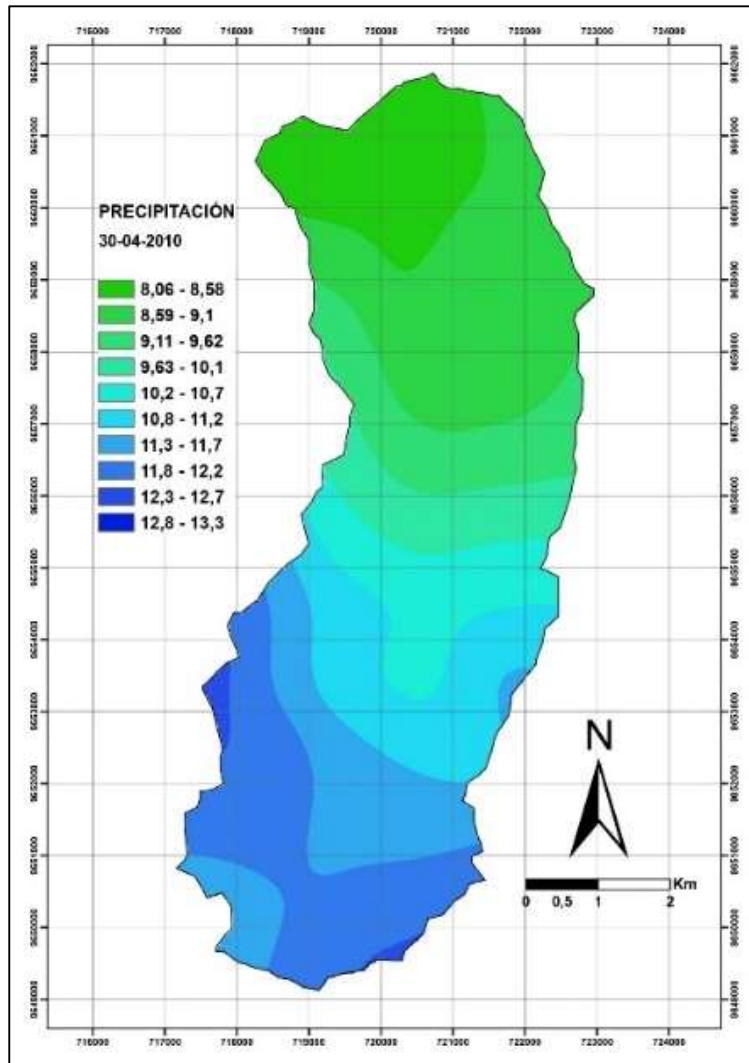
Imagen 80 Lluvia 13 días antes del deslizamiento



Fuente: Autor

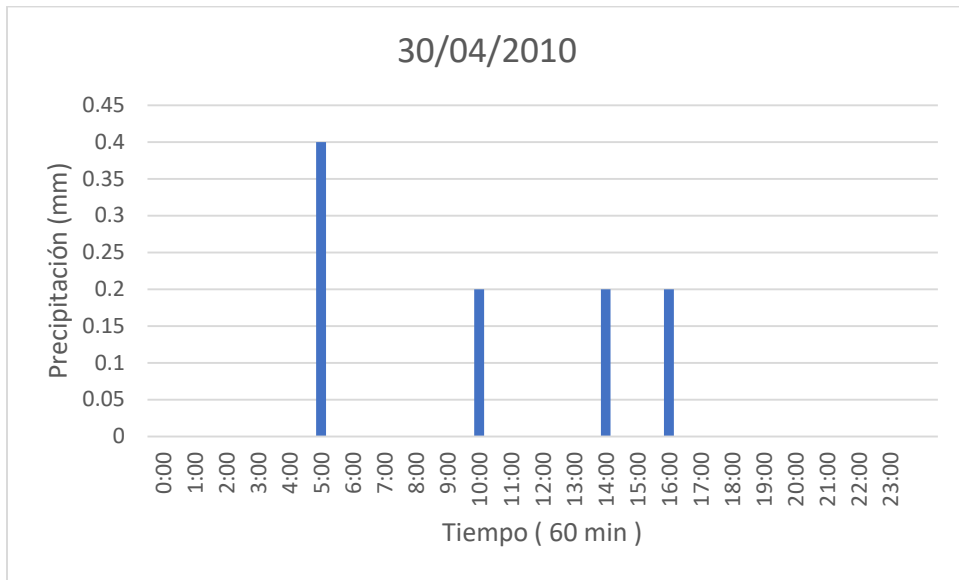
La imagen 79, refleja las condiciones de humedad 13 días antes de que se produzca el deslizamiento.

Imagen 81 Mapa 11 días antes del deslizamiento



Fuente: Autor

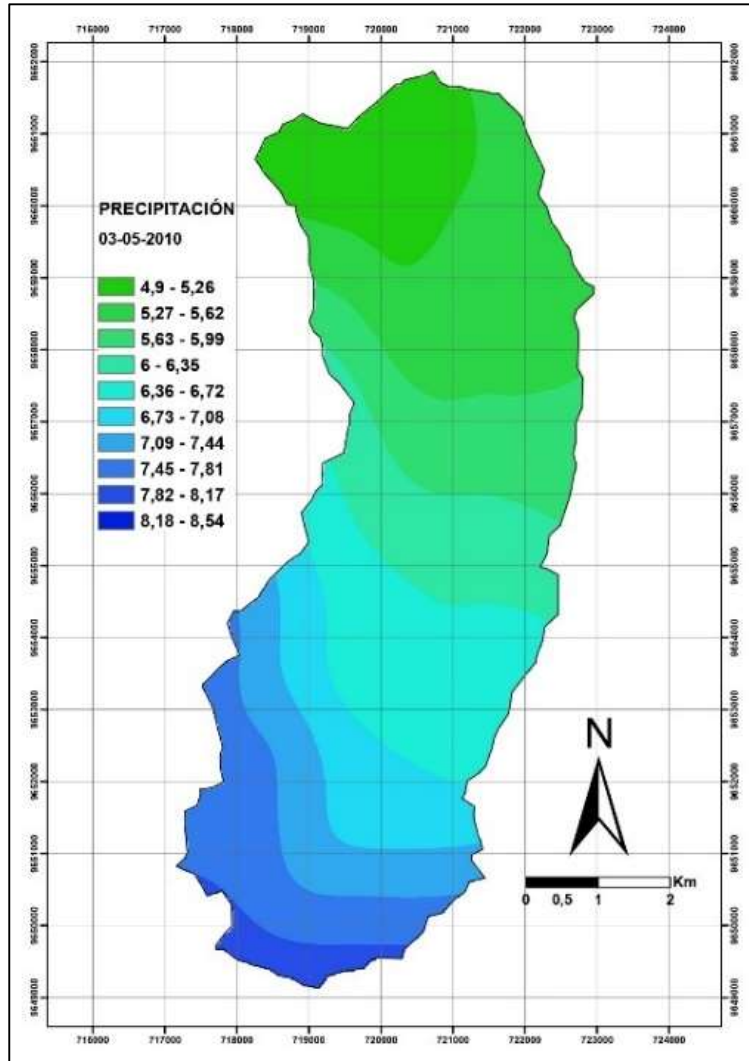
Imagen 82 Lluvia 11 días antes del deslizamiento



Fuente: Autor

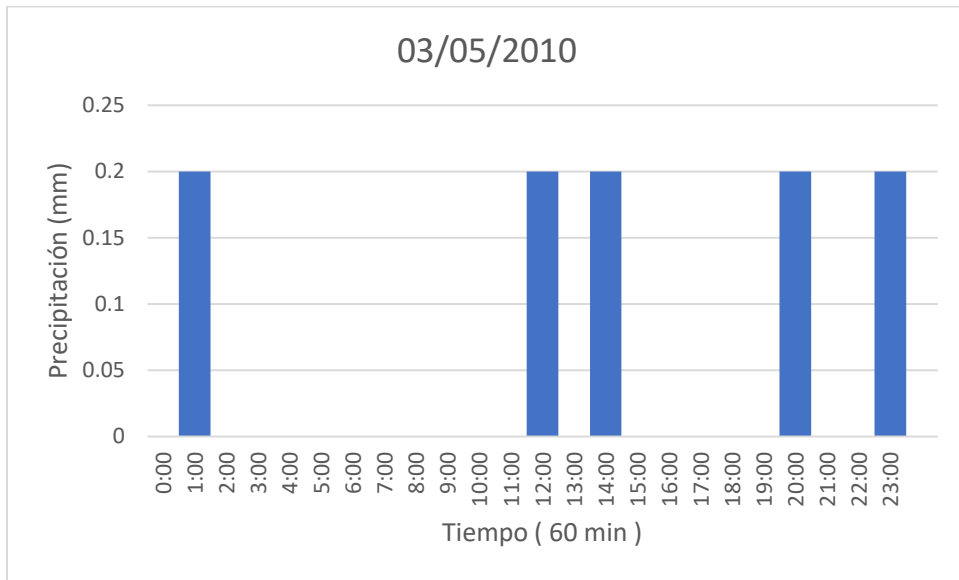
La imagen 81, refleja las condiciones de humedad en términos de precipitaciones 11 días previos al deslizamiento.

Imagen 83 Mapa 08 días antes del deslizamiento



Fuente: Autor

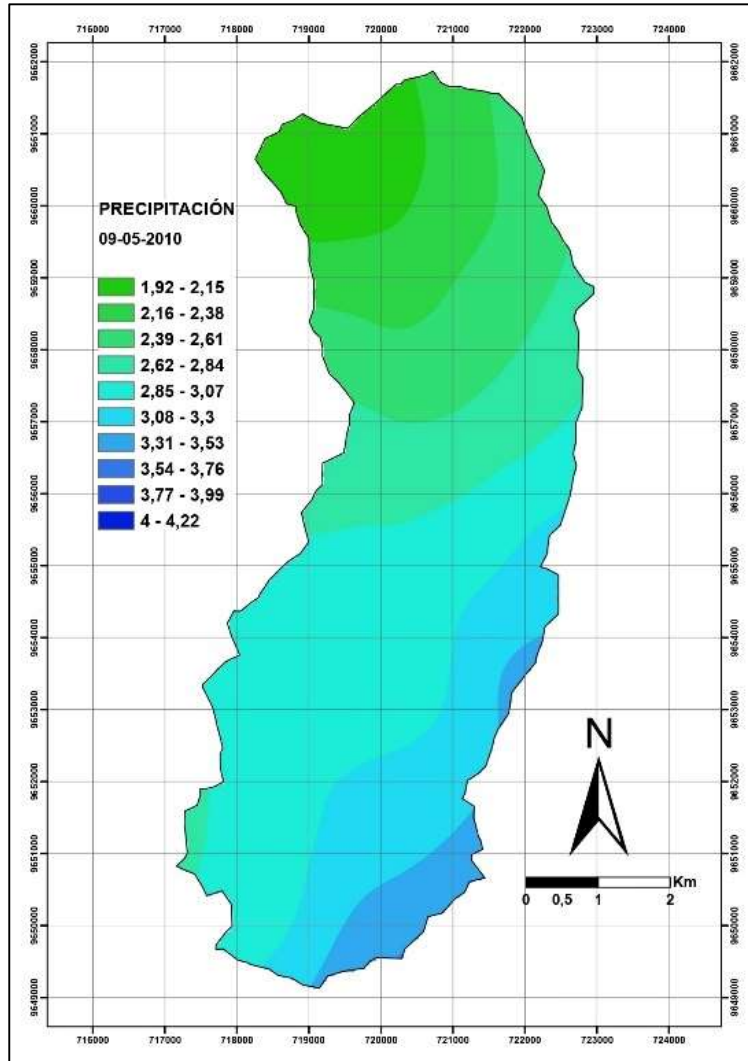
Imagen 84 Lluvia 08 días antes del deslizamiento



Fuente: Autor

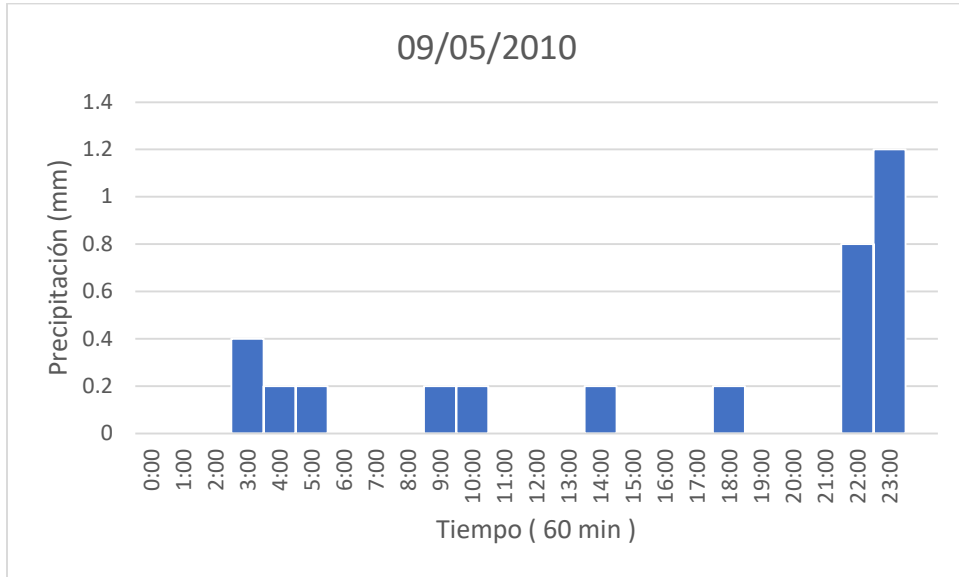
La imagen 83, refleja las condiciones de humedad en la cuenca del río Cumbe 8 días previos a que se produzca el deslizamiento.

Imagen 85 Mapa 02 días antes del deslizamiento



Fuente: Autor

Imagen 86 Lluvia 02 días antes del deslizamiento



Fuente: Autor

La imagen 85, revela las precipitaciones registradas por CHELSA EarthEnv, pero en este caso el día anterior al deslizamiento, lo que permite observar las condiciones de humedad en la zona de estudio.

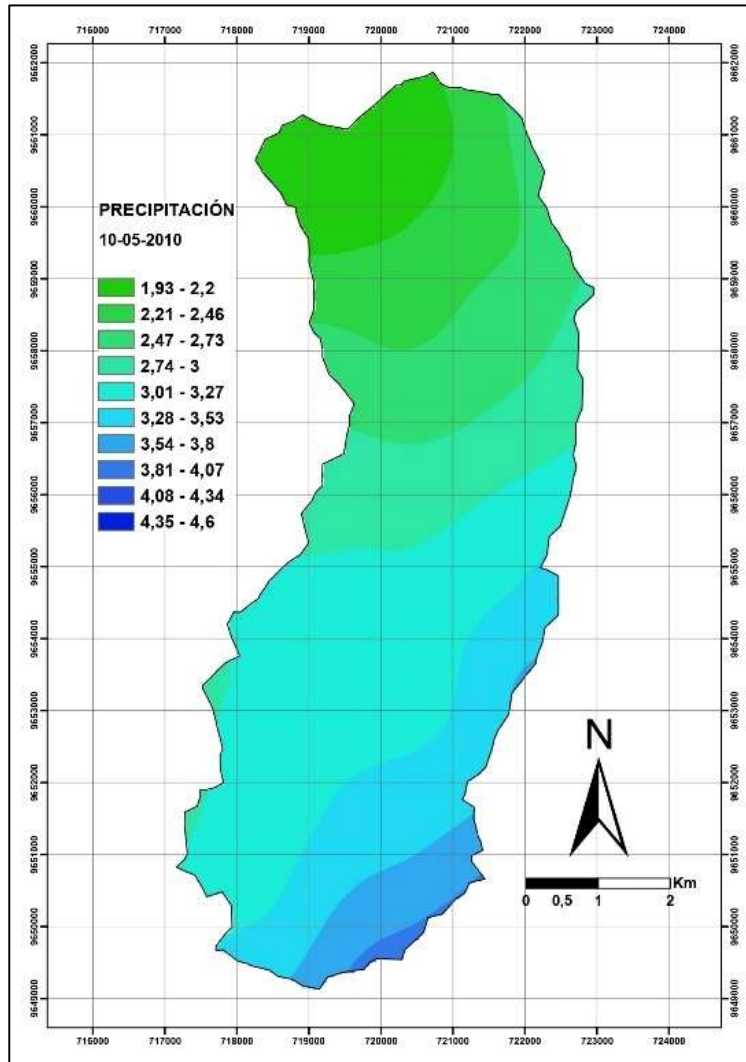
Tabla 5 Caracterización de lluvias que influencia el deslizamiento

Fecha	Cantidad Total de Lluvia (mm)	Intensidad Máxima Registrada (mm)
26/04/2010	3	1.2
28/04/2010	0.4	0.2
30/04/2010	1	0.4
03/05/2010	1	0.2
09/05/2010	3.6	1.2
10/05/2010	18.2	3.2

Fuente: Autor

En la Tabla 5, se puede apreciar la forma en la que se desarrollaron las lluvias en días previos al deslizamiento, y por el último el día del deslizamiento propiamente.

Imagen 87 Día del deslizamiento



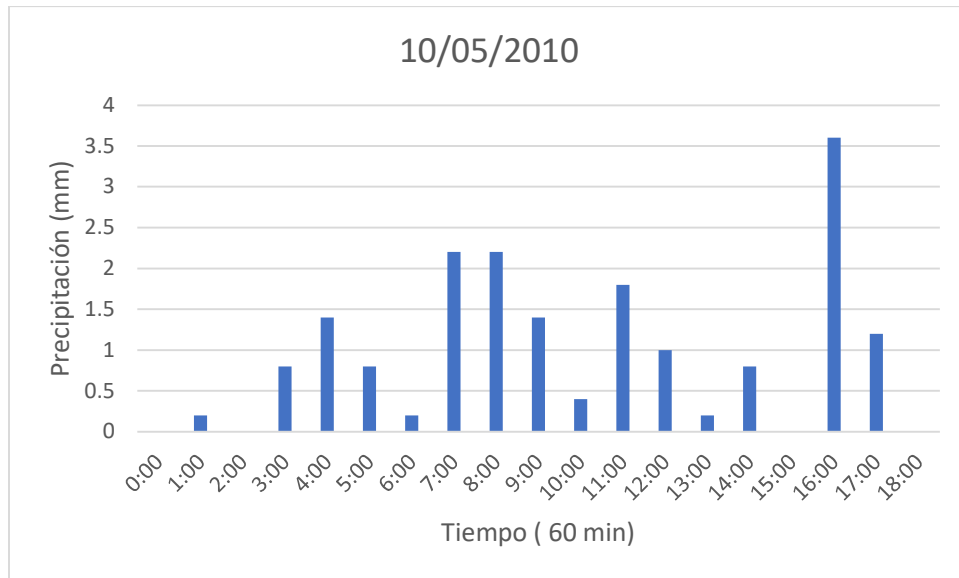
Fuente: Autor

La imagen 87, presenta la precipitación registrada el mismo día del deslizamiento.

Cada gráfico muestra el estado de la zona de estudio desde 15 días antes hasta la fecha del deslizamiento. De esta forma, se puede observar que las lluvias fueron bastante fuertes, los 15 días

antes se dio una intensidad máxima de 1.2 mm/h y una acumulación de 3 mm refiriéndonos a la Imagen 91. Continuando, los días consecuentes se mantuvo una intensidad máxima de 0.2 mm/h y una cantidad total de lluvia 1 mm, sin embargo, el día previo al deslizamiento se dio una intensidad de 1.2 mm/h con una acumulación de 3.6 mm como se observa en la Imagen 85. También se analizó detalladamente cómo fue el día preciso del deslizamiento, el mismo que es presentado a continuación:

Imagen 88 Lluvias durante el deslizamiento del 10-05-2010



Fuente: Autor

Como se puede observar en la Tabla 5, entre el periodo de 7 a 8 de la mañana, se registra una precipitación continua de 2.2 mm/h, que podría haber sido la causa del deslizamiento.

Imagen 89 Antes y después del deslizamiento



Fuente: Ing. Vicente Iñiguez

Como se puede visualizar, la zona donde se produce este deslizamiento superficial presenta una inclinación bastante pronunciada, además de otras características visibles como; los cambios de uso del suelo, en el caso de la cuenca del río Cumbe: la deforestación, ganadería extensiva, construcción de canales en las laderas sin un recubrimiento incrementando la infiltración en suelos propensos a movimientos de masa. Esta combinación de factores más la ocurrencia de eventos extremos de lluvia o precipitaciones son la causa principal de los deslizamientos superficiales.

Es decir, los eventos extremos de lluvia son el factor desencadenante.

8. Conclusiones

Se han obtenido los registros históricos de las precipitaciones pluviométricas en la cuenca del río Cumbe. La recopilación de los datos provenientes de estaciones pluviométricas abarca un período de 4 años, iniciando en septiembre de 2009 y concluyendo en diciembre de 2012. Los

datos se registraron cada minuto y de manera diaria, a través de tres estaciones ubicadas a lo largo de la zona de estudio.

Se consideró también por primera vez en la región los datos satelitales proporcionados por la página de CHELSA-EarthEnv que se ven reflejado en la Tabla 2. En este contexto, se evaluó la fiabilidad de sus datos, utilizando como referencia el polígono registrado de la cuenca del río Cumbe y la grilla de 1 km x 1 km. De esta manera, se rescataron los valores exactos buscando que correspondan a los registrados por las estaciones ubicadas físicamente. Al realizar una comparación entre los datos satelitales y los provenientes de las estaciones pluviométricas, se observó una diferencia clara en las comparaciones, diarias y mensuales, donde el factor de determinación o R^2 se encontraba alejado de valor de 1, por ejemplo, se tenía valores de 0.002 en la Imagen 45 otro de 0.0616 en la Imagen 47, y así en su mayoría, indicando que no se logra encontrar afinidad entre los valores. Se determina la inexistencia de una relación directa; sin embargo, cabe destacar que no todos los datos están alejados entre sí, ya que, para meses como agosto, septiembre, octubre y mayo, existe cercanía entre sus valores como en la Imagen 25, indicando cierta precisión de la información proporcionada por CHELSA-EarthEnv.

CHELSA-EarthEnv ciertamente es una base de datos excelente, y ha sido puesta a prueba en diferentes zonas del área norteamericana, brindando resultados apegados a la realidad. Sin embargo, en puntos como la zona andina, parece reflejar ciertos datos con errores o aproximaciones que no están estimadas en su totalidad, según las evaluaciones realizadas.

Ahora bien, no se descartan los datos del CHELSA-EarthEnv, se aprovecha de la cercanía existente en los valores correspondientes a mayo entre los datos de las estaciones pluviométricas y los valores satelitales, para realizar un análisis, en base al deslizamiento ocurrido el 10 de mayo de 2010, donde la precipitación desarrollada 15 días antes del suceso presentó una intensidad de

1.2 mm/h con una cantidad de lluvia de 3 mm y los días consecutivos entre 0.2 mm/h y 0.4 mm/h, sin embargo, el día previo al deslizamiento se da una intensidad máxima de precipitación de 1.2 mm/h.

Debido a la acumulación de precipitaciones sobre el suelo a los 15 días de 3 mm, los siguientes de 1 mm, todo esto junto con el día previo de 3.6 mm de acumulación y que según los resultados el día del deslizamiento a lo largo de una hora entre las 7:00 a 8:00 A.M., se observa una intensidad de 2.2 mm/h, se estima que esto fue la causa del movimiento de masa. No obstante, hay más aspectos que se describen a continuación.

Como se pudo apreciar de los registros fotográficos existentes de aquella época, la existencia de canales de agua o drenajes construidos por los agricultores que los utilizan para la ganadería extensiva y los sembríos. Estos canales alteran el ciclo hidrológico normal de la zona, desviando la escorrentía y generando estancamientos de agua que provocan la sobresaturación de los suelos y por ende, el movimiento en masa.

No obstante, en la parte superior del deslizamiento se pudo contemplar una vegetación arbustiva extensa o lo que queda de ella, indicando que la zona en su conjunto tenía esa cobertura vegetal. Sin embargo, las acciones humanas relacionadas con la ganadería y la agricultura han resultado en un sobrepastoreo e inestabilidad de las laderas desde el punto de vista de la mecánica de suelos, puesto que los eventos extremos de lluvias son el factor desencadenante de los deslizamientos superficiales.

9. Recomendaciones

Hoy en día, se cuentan con diversas páginas que ofrecen información satelital sobre precipitaciones, temperatura, entre otros aspectos. Sin embargo, es esencial verificar la fiabilidad

de dicha información al desarrollar proyectos. Por lo tanto, se hace necesario investigar y utilizar múltiples fuentes con el objetivo de seleccionar aquella que se aproxime más a los valores proporcionados por estaciones pluviométricas presentes sobre el área de estudio.

Cuando se trabaja con datos como los de precipitaciones, es fundamental considerar y analizar las unidades de presentación para asegurar que todos los valores se manejen en un mismo contexto, garantizando resultados óptimos. En el marco del presente proyecto, es imperativo adquirir conocimientos sobre las plataformas a utilizar, dado que la cantidad de información es extensa y debe ser canalizada de la mejor manera para ofrecer visualizaciones claras del comportamiento de las precipitaciones y su impacto en el suelo.

Se recomienda analizar ampliamente la falta de relación entre los datos satelitales y físicos, dado que, se puede deber a la ubicación geográfica donde se está desarrollando el presente estudio, recordando que se planteó que los datos fueron validados en zonas norteamericanas demostrando su fiabilidad para esos lugares, posiblemente exista una condición que se deba tener en cuenta para los Andes Ecuatorianos.

Brindar una capacitación a los habitantes de zonas similares a la del caso estudiado, en cuanto a la manipulación correcta de los suelos, para que de esta manera las acciones antrópicas no afecten la sostenibilidad del medio ambiente, y sobre todo evitar posibles accidentes que demanden la vida humana como resultado.

10. Bibliografía

- Alonso, E., Gens, A., Lloret, A., & Delahaye, C. (1995). *EFFECT OF RAIN INFILTRATION ON THE STABILITY OF SLOPES*. PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS/UNSAT '95/PARIS/FRANCE/6-8 SEPTEMBER 1995. VOLUME 1. <https://trid.trb.org/view/468433>
- Bilz, P. (1995). *SLOPE STABILITY IN PARTIALLY SATURATED SANDY SOILS*. PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS/UNSAT '95/PARIS/FRANCE/6-8 SEPTEMBER 1995. VOLUME 1. <https://trid.trb.org/view/468434>
- Broeckeaert, S. (2012). *Land use dynamics and the spatial occurrence of shallow landslides in a tropical mountainous catchment, Ecuador*. Vrije Universiteit Brussel. <https://researchportal.vub.be/nl/studentTheses/land-use-dynamics-and-the-spatial-occurrence-of-shallow-landslide>
- Carrera-Villacrés, D. V., Guevara-García, P. V., Tamayo-Bacacela, L. C., Balarezo-Aguilar, A. L., Narváez-Rivera, C. A., & Morocho-López, D. R. (2016). Filling series annual meteorological data by statistical methods in the coastal zone from Ecuador and Andes, and calculation of rainfall. *Idesia (Arica)*, 34(3), 81-90. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292016000300010>
- CDC. (2019, marzo 27). *Deslizamientos de tierra y aludes de barro*|CDC [Educativa]. Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades. <https://www.cdc.gov/es/disasters/landslides.html>
- CNC. (2023). *Lluvias e inundaciones*. Portal UNAM. <https://www.unam.mx/medidas-de-emergencia/lluvias-e-inundaciones>

- Farfán, F. P. (2018). *Agroclimatología del Ecuador*. Editorial Abya-Yala.
- IFRC. (2023). *Deslizamiento de tierras | IFRC* [Informativa]. Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Media Luna Roja. <https://www.ifrc.org/es/nuestro-trabajo/desastres-clima-y-crisis/que-es-desastre/deslizamiento-tierras>
- Íñiguez, V., Morales, O., Cisneros, F., Bauwens, W., & Wyseure, G. (2016). Analysis of the drought recovery of Andosols on southern Ecuadorian Andean páramos. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 2421-2435. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2421-2016>
- Jiménez-Ramos, G., Echaveguren, T., Vargas-Baecheler, J., & Chamorro, A. (2023). Traffic interruption risk induced by cut-slope failure: The rainfall effect. *Transportation Geotechnics*, 41, 100993. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.100993>
- Karger, D. N., Wilson, A. M., Mahony, C., Zimmermann, N. E., & Jetz, W. (2021). Global daily 1 km land surface precipitation based on cloud cover-informed downscaling. *Scientific Data*, 8(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-01084-6>
- Marín, R. J., Velásquez, M. F., García, E. F., Alvioli, M., & Aristizábal, E. (2021). Assessing two methods of defining rainfall intensity and duration thresholds for shallow landslides in data-scarce catchments of the Colombian Andean Mountains. *CATENA*, 206, 105563. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105563>
- Otero, M., & Van Kesteren, A. (1998). *Fenómeno climático de El Niño: Elementos de consenso del seminario experiencias para la prevención de daños y la reconstrucción de zonas afectadas en la agricultura*. <https://repositorio.iica.int/handle/11324/16629>
- Pabón, J. D., & Montealegre, J. E. (2017). *Los fenómenos de El Niño y de La Niña, su efecto climático e impactos socioeconómicos*. <https://repositorio.acefyn.org.co/handle/001/113>
- Pourrut, P. (1995). *El agua en el Ecuador* (1.ª ed., Vol. 7). Corporación Editora Nacional.

- Primicias, R. (2023). 1.790 emergencias atendidas en Ecuador por deslaves e inundaciones [Primicias]. *Primicias*. <https://www.primicias.ec/noticias/sucesos/emergencias-ecuador-deslaves-inundaciones/>
- Reichenbach, P., Cardinali, M., De Vita, P., & Guzzetti, F. (1998). Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River Basin (central Italy). *Environmental Geology*, 35(2), 146-159. <https://doi.org/10.1007/s002540050301>
- Revelo Burgos, V. U. (2008). *Modelo para la estabilización de taludes en las carreteras del subtrópico del nor occidente del Ecuador a fin de evitar accidentes de tránsito y disminuir los costos de operación vehicular* [masterThesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Maestría en Vías Terrestres]. <https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/2714>
- Sánchez, F. D., Marín, R., Gúzman, H., Verdugo, N., Domínguez, E., Vargas, O., Panizzo, L., Sánchez, N., Gómez, J., Cortés, G., & García, M. (2001). *El agua*. 114-189.
- Schnellmann, R., Busslinger, M., Schneider, H. R., & Rahardjo, H. (2010). Effect of rising water table in an unsaturated slope. *Engineering Geology*, 114(1), 71-83. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.04.005>
- Shen, Y., Gu, J., Liu, G., Wang, X., Shi, H., Shu, C., Zhang, Q., Guo, Z., & Zhang, Y. (2023). Predicting soil erosion and deposition on sloping farmland with different shapes in northeast China by using ¹³⁷Cs. *CATENA*, 229, 107238. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107238>
- Suárez Díaz, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Ingeniería de Suelos Ltda.

Taypanta J., J. R. (1993). *La erosión hídrica: Proceso, factores y formas*.

<http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/271>

Vanacker, V., Molina, A., Govers, G., Poesen, J., & Deckers, J. (2007). Spatial variation of suspended sediment concentrations in a tropical Andean river system: The Paute River, southern Ecuador. *Human Impact and Geomorphology in Tropical Mountain Areas*, 87(1), 53-67. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.042>

Wilcke, W., Valladarez, H., Stoyan, R., Yasin, S., Valarezo, C., & Zech, W. (2003). Soil properties on a chronosequence of landslides in montane rain forest, Ecuador. *CATENA*, 53(1), 79-95. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00196-0](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00196-0)

Xu, W., Jie, Y., Li, Q., Wang, X., & Yu, Y. (2014). Genesis, mechanism, and stability of the Dongmiaojia landslide, yellow river, China. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 67, 57-68. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.01.010>

11. Anexos

