



MAESTRÍA EN CAMBIOS GLOBALES Y RIESGOS DE DESASTRES

EXPERIENCIA DE ALGUNOS PAÍSES ANDINOS EN EL CONOCIMIENTO DE LAS AMENAZAS DESENCADENADAS POR LLUVIAS, Y SU APORTE AL CONOCIMIENTO DEL RIESGO DE DESASTRES. CASO DE ESTUDIO MUNICIPIO DE VILLAMARÍA, CALDAS.

JUAN CAMILO ÁLVAREZ RINCÓN



Universidad[®]
Católica
de Manizales

VIGILADA MINEDUCACIÓN

Obra de Iglesia
de la Congregación



Hermanas de la Caridad
Dominicas de La Presentación
de la Santísima Virgen

**EXPERIENCIA DE ALGUNOS PAÍSES ANDINOS EN EL CONOCIMIENTO DE
LAS AMENAZAS DESENCADENADAS POR LLUVIAS, Y SU APORTE AL
CONOCIMIENTO DEL RIESGO DE DESASTRES. CASO DE ESTUDIO
MUNICIPIO DE VILLAMARÍA, CALDAS**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de *Magister en
Cambios Globales y Riesgo de Desastres*.

Modalidad de grado: Proyecto de investigación de autoría del estudiante.

Tutor:
Vladimir Henao Céspedes¹

Nombre del autor:
Juan Camilo Álvarez Rincón²

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
MAESTRÍA EN CAMBIOS GLOBALES Y RIESGO DE DESASTRE
MANIZALES, CALDAS
2024

¹ Vladimir Henao Céspedes, <http://orcid.org/0000-0002-1938-3203>

² Juan Camilo Álvarez Rincón, <https://orcid.org/0009-0004-3040-2577>

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Agradecimientos

A la directora de la maestría María Nancy Marín Olaya, quien con su motivación y confianza me dio el impulso para continuar con mis estudios, a los profesores del programa de maestría quienes con sus enseñanzas y conocimientos hicieron parte fundamental de mi proceso de formación.

Al Doctor Vladimir Henao Céspedes por su enseñanza, seguimiento a mi proceso académico y su constante apoyo para la elaboración de este trabajo de investigación. A la Universidad Católica de Manizales por la valiosa oportunidad que me brindaron para continuar con mis estudios de posgrado.

Y a mi compañera de vida quien, con su apoyo constante en este proceso, me brindo toda la motivación para culminar esta etapa tan importante para mi vida profesional y personal.

Tabla de contenido

1	Introducción.....	12
1.1.	Planteamiento del problema.....	13
1.2.	Justificación.....	16
2	Objetivos.....	19
2.1	Objetivo General.....	19
2.2	Objetivos Específicos	19
3	Antecedentes.....	20
4	Marco teórico	23
5	Metodología.....	28
5.1	Definición de casos relacionados	29
5.2	Análisis y clasificación de la información.....	29
6	Resultados y análisis.....	31
6.1	Perfil municipio de Villamaría, Caldas.....	31
6.1.1	Geología.....	32
6.1.2	Geología Estructural	34
6.1.3	Geomorfología.....	35
6.1.4	Cobertura de la tierra.....	36
6.1.5	Pendiente.....	36
6.1.6	Clima.....	38
6.1.7	Histórico de eventos	45
6.2	Casos relacionados.....	52
6.2.1	Cuenca del Río Mantaro - Perú.....	52
6.2.2	Cuenca del Río Maipo - Chile.....	74
6.3	Matriz de comparación.....	92
6.4	Lecciones aprendidas	95
6.4.1	Lecciones aprendidas Perú	95
6.4.2	Lecciones aprendidas Chile	98
7	Conclusiones y Recomendaciones.....	102
8	Referencias bibliográficas	107
9	Anexos	116

Listado de figuras

Figura 1. Esquema metodológico.	28
Figura 2. Esquema metodológico para la definición de las unidades de análisis.....	29
Figura 3. Esquema metodológico para el análisis y clasificación de la información.....	30
Figura 4. Mapa de localización municipio de Villamaría - Caldas	32
Figura 5. Unidades geológicas del municipio de Villamaría - Caldas	33
Figura 6. Subunidades geomorfológicas del municipio de Villamaría - Caldas.....	35
Figura 7. Unidades de cobertura de la tierra del municipio de Villamaría - Caldas.....	36
Figura 8. Mapa de pendientes del municipio de Villamaría - Caldas	37
Figura 9. Comportamiento estacional de la lluvia mensual 1991-2020.	41
Figura 10. PPT media mensual 1991-2020.	41
Figura 11. PPT media anual 1991-2020.	42
Figura 12. Escenario de cambio en la TEMP, municipio de Villamaría (Caldas).	44
Figura 13. Escenario de cambio en la PPT, municipio de Villamaría (Caldas).	44
Figura 14. Relación entre la PPT media mensual y los eventos ocurridos en el periodo 1927-2022 en el municipio de Villamaría, Caldas.	48
Figura 15. Mapa de ubicación de la CMAN, Perú.....	56
Figura 16. Ciclo anual de la PPT en el sector norte de la CMAN en mm/mes.....	64
Figura 17. Ciclo anual de la PPT en el sector centro de la CMAN en mm/mes.	64
Figura 18. Ciclo anual de la PPT en el sector sur de la CMAN en mm/mes.	64
Figura 19. Mapa de ubicación de la CMAI, Chile.	76
Figura 20. Comportamiento de la TEMP y PPT medias mensual a 2500 msnm - Período de análisis 2001- 2012. Estación Yeso Embalse.....	82
Figura 21. Comportamiento de la TEMP y PPT media mensual en la parte media de la cuenca- Período de análisis 2000- 2012. Estación Quinta Normal.	84
Figura 22. PPT máxima diaria anual en las estaciones de las cuencas Costeras entre Maipo y Rapel.	85

Listado de tablas

Tabla 1. Ponderación – jerarquización de las variables definidas.....	31
Tabla 2. Rangos de PPT total anual y de intensidad de lluvia para definir las características climáticas de una región.....	39
Tabla 3. Estaciones tenidas en cuenta para el análisis de PPT en el municipio de Villamaría, Caldas.	40
Tabla 4. Rangos de PPT total anual y de intensidad de lluvia para definir las características climáticas de Villamaría-Caldas, normal climatológica 1971-2000.	40
Tabla 5. Rangos de PPT total anual y de intensidad de lluvia para definir las características climáticas de Villamaría-Caldas, normal climatológica 1981-2010.	40
Tabla 6. Rangos de PPT total anual y de intensidad de lluvia para definir las características climáticas de Villamaría-Caldas, normal climatológica 1991-2020.	40
Tabla 7. Comparación de los umbrales propuestos.	43
Tabla 8. Consolidado de eventos presentados en el municipio de Villamaría, Caldas. Registro desde 1927 al 2022.	45
Tabla 9. Eventos presentados en el municipio de Villamaría, Caldas, relacionados con el registro de las precipitaciones de las estaciones IDEAM que se encuentran en el territorio.	49
Tabla 10. Convenciones utilizadas	51
Tabla 11. Caracterización del municipio de Villamaría (Caldas).....	52
Tabla 12. Climatología del acumulado anual (mm/año) y estacional (mm/trimestre) de la PPT en la CMAN.	63
Tabla 13. Registros de lluvias intensas estación Huayao.	66
Tabla 14. Registros de lluvias intensas estación San Juan de Jarpa.	66
Tabla 15. Registros de lluvias estación Ingenio.	67
Tabla 16. Registros de lluvias intensas estación Santa Ana.	67
Tabla 17. Registros de lluvias intensas estación Shullcas.....	68
Tabla 18. Registros de lluvias intensas estación San Lorenzo.	69
Tabla 19. Registros de lluvias intensas.....	70
Tabla 20. Registros de lluvias intensas estación Viques.	71
Tabla 21. Comportamiento de la TEMP y PPT media mensual a 1500 msnm – Período de análisis 2001- 2012. Estación San José del Maipo en Reten (valores en mm).....	82
Tabla 22. Comportamiento de la PPT media mensual para la comuna de San José del Maipo. Registros de las estaciones Los Maitenes y El Canelo	83
Tabla 23. Comportamiento de la TEMP y PPT media mensual en la parte media de la cuenca – Período de análisis 2000- 2012. Estación Quinta Normal (valores en mm).	84
Tabla 24. PPT mensual promedio en las cuencas Costeras entre Maipo y Rapel – Período de análisis 1990- 2020.	85
Tabla 25. Datos de PPT y caudales en las estaciones utilizadas para estudiar el evento entre el 14 y 18 de abril de 2016.....	88
Tabla 26. Datos de PPT en las estaciones utilizadas para estudiar el evento entre el 24 y 26 de febrero de 2017.	89

Tabla 27. Datos y análisis estadísticos de las precipitaciones registradas desde el 19 al 27 de junio de 2023 para las 6 estaciones utilizadas para estudiar el evento. Los datos están representados en función de su ubicación W-E..... 91

Tabla 28. Matriz de comparación con la descripción de las variables y parámetros utilizados. 93

Listado de anexos

Anexo 1. Inventario y evaluación de información secundaria..... 116

Resumen

En el presente trabajo de investigación se pretende tener herramientas para aportar al conocimiento del riesgo de desastres, identificando que los recursos destinados para la gestión del riesgo de desastres se distribuyen en mayor medida para procesos relacionados con la reducción del riesgo de desastres, seguidas por el proceso de manejo de desastres y en una menor proporción para el proceso de conocimiento del riesgo de desastres, apuntar a mejorar el conocimiento del riesgo es un aporte para fortalecer la planificación territorial y el desarrollo de la región, lo cual es sumamente importante para tener territorios más seguros.

Analizar la experiencia que han tenido algunos países de la región andina en el proceso del conocimiento del riesgo de desastres relacionado con movimientos en masa, inundación y avenida torrencial, exacerbados por las lluvias y como este conocimiento puede ser aplicado al municipio de Villamaría, Caldas es el objetivo de este trabajo de investigación. Se describen las características físicas de la zona de estudio teniendo en cuenta los factores ambientales que inciden en su territorio, identificando parámetros y variables similares para hacer la comparación con los casos relacionados, además de considerar el histórico de eventos, lo anterior nos permite identificar las lecciones aprendidas que serán adoptadas y también, sirve para poder conocer, de manera empírica, umbrales de precipitación que detonan fenómenos de movimiento en masa, inundación y avenidas torrenciales.

Los resultados de este trabajo de investigación establecen un aporte para mejorar el conocimiento del riesgo de desastres relacionados con lluvia en el territorio nacional, mediante la adopción de las lecciones aprendidas de algunos países andinos. Se espera que los resultados obtenidos puedan ser incorporados en el componente de la gestión de riesgo de desastres de los diferentes instrumentos de planificación ambiental y territorial.

Palabras clave: *avenida torrencial, conocimiento del riesgo de desastres, inundación, movimientos en masa, precipitación, umbrales.*

Abstract

In this research work we aim to have tools to contribute to the knowledge of risk identifying that resources destined for disaster risk management are distributed to a greater extent for processes related to disaster risk reduction, followed by the disaster management process and in a lesser proportion by the disaster risk knowledge process, aiming to improve risk knowledge is a contribution to strengthening territorial planning and development of the región, which is extremely important to have safer territories.

Analyze the experience that some countries in the Andean region have had in understanding disaster risk related to mass movements, flooding and torrential floods, exacerbated by rains and how their knowledge can be applied to the municipality of Villamaría, Caldas is the objective of this research work. The physical characteristics of the study area are described, taking into account the environmental factors that affect its territory, identifying similar parameters and variables to make comparison with related cases, in addition to considering the history of events, the above allows us to identify the lessons learned that will be adopted and also, serves to be able to know, empirically, precipitation thresholds that trigger mass movement phenomena, flood and torrential floods.

The results of this research work establish a contribution to improve knowledge of the risk of disasters related to rain in the national territory, through the adoption of lessons learned from some Andean countries. It is expected that the results obtained can be incorporated into the disaster risk management component of the different environmental and territorial planning instruments.

Keyword: *torrential floods, disaster risk knowledge, flood, mass movement, precipitation, thresholds.*

Siglas y abreviaturas

ALUV	Aluviones
AVT	Avenida Torrencial
CAND	Cordillera de los Andes
CC	Cambio Climático
CCDC	Conocimiento Científico del Clima
CCOS	Cordillera de la Costa
CMAI	Cuenca del Río Maipo
CMAN	Cuenca del Río Mantaro
CRD	Conocimiento del Riesgo de Desastres
CVRT	Complejo Volcánico Ruiz Tolima
DESL	Deslizamientos
EDC	Estudio de Caso
GRD	Gestión del Riesgo de Desastres
HUMD	Humedad
INU	Inundación
MDD	Manejo de Desastres
MM	Movimientos en Masa
PNN	Parque Natural de los Nevados
PPT	Precipitación
REMA	Remoción en Masa
RRD	Reducción del Riesgo de Desastres
TEMP	Temperatura
VC	Variabilidad Climática
VIE	Viento
VNR	Volcán Nevado del Ruiz
ZDE	Zona de Estudio

1 Introducción

En este trabajo de investigación se presenta el resultado de la identificación de la experiencia que han tenido algunos países de la región andina, como Perú y Chile, en torno al entendimiento de cómo las lluvias, más precisamente las lluvias intensas de corta duración, exacerbaban los fenómenos amenazantes como inundaciones (INU), avenidas (AVT) torrenciales y movimientos en masa (MM).

Se debe tener en cuenta que el clima es un factor ambiental que incide bastante sobre un territorio. Las anomalías climáticas ocurren de manera recurrente o cíclica impactando de diversa manera los asentamientos y sistemas humanos; y su fluctuación es lo que se denomina variabilidad climática (VC). Por otro lado, las condiciones climáticas se están modificando de una manera paulatina y al largo plazo debido al cambio climático (CC), el cual afectará cada vez más a las poblaciones y sus actividades (IDEAM - UNAL, 2018).

De acuerdo con lo anterior, en el presente estudio se analizan las características físicas de la zona de estudio (ZDE) teniendo en cuenta los factores ambientales que inciden en su territorio, se establecen los parámetros y variables que permiten caracterizar la ZDE y se identifica la información relacionada. Se elabora a partir de los resultados del proceso de caracterización, el perfil del estudio de caso (EDC).

Finalmente, se identifican los casos relacionados con amenazas desencadenadas por lluvias y su aporte al conocimiento del riesgo de desastres (CRD) del municipio de Villamaría, Caldas.

Los resultados de este trabajo de investigación establecen un aporte para mejorar el CRD relacionados con las lluvias en el territorio nacional, mediante la adopción de las lecciones aprendidas de algunos países andinos. Se espera que los resultados obtenidos puedan ser incorporados en el componente de la gestión de riesgo de desastres (GRD) de los diferentes instrumentos de planificación ambiental y territorial.

1.1. Planteamiento del problema

El clima corresponde a una serie de procesos que involucran un conjunto de patrones climáticos, dentro de los que se tienen el ciclo anual y distribución espacial de la temperatura (TEMP), humedad (HUMD), viento (VIE), precipitación (PPT) y los fenómenos extremos; los cuales son los que regulan los diferentes procesos que se dan en un determinado territorio, incidiendo en diversos aspectos de este y de la sociedad que se establece allí (IDEAM - UNAL, 2018). Cuando se desestabilizan estos patrones, esta pérdida del equilibrio origina temperaturas y lluvias extremas que afecta los territorios produciendo impactos económicos y socio-ambientales, acelerando procesos naturales y degradando el sistema terrestre. Por otra parte, los riesgos futuros y los impactos ocasionados sobre los sistemas humanos y naturales son generados por la influencia antrópica sobre el sistema climático. Los impactos más significativos sobre los sistemas físicos naturales que ocasiona el CC corresponden a la alteración de los sistemas hidrológicos, variaciones en la PPT, afectación de la escorrentía, deshielo y pérdida de glaciares (MADS, 2017). En cuanto a los riesgos futuros, se tiene que eventos climáticos extremos relacionados con INU, sequías, incendios forestales y ciclones, son eventos que conllevan a impactos que afectan el recurso hídrico llevando a problemas de desabastecimiento, igualmente afecta la agricultura, la infraestructura y asentamientos, igualmente es la causante de migraciones ambientales e influyen en la morbilidad y mortalidad de las poblaciones.

De acuerdo a lo anterior, es importante considerar que el CC también incrementa el riesgo de enfermedades humanas al aumentar la TEMP y lluvia, igualmente, se generan cambios en los patrones de circulación del aire que llevan consigo concentraciones de polvo atmosférico los cuales causan alergias que actualmente afectan a la población. Estos cambios afectarán con mayor intensidad a las poblaciones más pobres, ya que son ellos quienes tienen menos capacidad de resiliencia y, por lo tanto, sus probabilidades de desarrollo sostenible también son frenadas, Liu et al., (2019) y Banco Mundial (2010) citado por (Córdova Aguilar, 2020).

Sin embargo, este trabajo de investigación se centra en analizar el conocimiento científico encaminado a comprender los eventos climáticos relacionados con las precipitaciones que exacerbaban las intensidades de los fenómenos de INU, AVT y MM. *“Durante mucho tiempo, los fenómenos meteorológicos e hidroclimáticos extremos han sido los responsables de la generación de amenazas que pueden afectar de manera significativa el desarrollo económico y territorial de una población, así como afectar el desarrollo humano y sustentable. Aunque debe considerarse que la mayoría de estos fenómenos naturales se han dado en el pasado, hoy día es más evidente que el CC influye en el aumento de la intensidad, frecuencia y magnitud de los mismos (UNGRD, 2018)”*.

De acuerdo con (UNDRR, 2021), los desastres que se relacionan con emergencias climáticas y geológicas, entre 1998 y 2017, afectaron en América Latina y el Caribe alrededor de 277'000.000 de personas, cobrando la vida de 312.000 personas. El 93% de los 1.786 eventos que se registraron se encuentran relacionados con eventos de origen climático como INU y tormentas, mientras que el 7% corresponde a eventos de origen geológico como sismos y deslizamientos (DESL). Las INU corresponden a fenómenos naturales que son causados por eventos naturales, sin embargo, su ocurrencia y riesgos asociados se han venido incrementando en los últimos cincuenta años debido a las actividades humanas. Igualmente, el aumento de la deforestación y pérdida de cobertura

dejando las laderas expuestas a lluvias intensas, la ocupación de cauces y del lecho de las quebradas, disposición de basuras en los ríos y la inadecuada canalización de sus cauces, la reclamación de las zonas inundables, sumado a la ausencia de ordenamiento territorial y una deficiente infraestructura, son los responsables del aumento de las vulnerabilidades y riesgos asociados (Córdova Aguilar, 2020). También es importante tener en cuenta que el incremento de lluvias produce INU al igual que AVT o crecientes súbitas; de la misma manera en los últimos años en la región andina se han estado presentando lluvias torrenciales que producen, no solo INU y AVT, sino también DESL de tierra, lo que afecta directamente el desarrollo económico al generarse gastos cuantiosos.

En consecuencia, es necesario considerar diferentes acciones para que los impactos relacionados con estos fenómenos puedan ser reducidos, como por ejemplo diseñar e implementar políticas y estrategias relacionadas con la GRD, incluyendo las fluctuaciones que la VC genera en estos fenómenos extremos al modificar sus características. Igualmente, las alteraciones en el largo plazo que puedan generarse en los fenómenos meteorológicos e hidroclimáticos por consecuencia del CC deben ser consideradas, y obtener insumos necesarios para adelantar procesos de adaptación ante las amenazas que se manifiesten en los diferentes escenarios territoriales (UNGRD, 2018). El diseño e implementación de las estrategias y políticas relacionadas con la GRD deben estar encaminadas a abordar los procesos de CDR, reducción del riesgo (RRD) y manejo de desastres (MDD), sin embargo, dentro de los procesos de planificación del desarrollo son muy pocas las estrategias y políticas que diseñan e implementan relacionadas al CDR.

Teniendo en cuenta lo anterior y de acuerdo a los procesos de planificación del desarrollo y del territorio, el municipio de Villamaría, Caldas se categoriza como un municipio de quinta categoría según lo dispuesto en la Ley 617 del 2000 y cuenta con una población de 69.285 habitantes (DNP, 2023), de acuerdo a información contenida en la ficha de la entidad territorial que se encuentra en la plataforma Terridata, el municipio cuenta con una inversión anual en GRD donde se evidencia que para el año 2020 los recursos se destinaron para los procesos de RRD al cual se le asignaron \$395.709.093, MDD \$232.562.304 y Fortalecimiento institucional \$276.537.500, mientras que para el proceso del CRD no hubo asignación de recursos, lo anterior evidencia la necesidad de realizar investigaciones que fortalezcan el proceso del CRD en los territorios (UNGRD, 2022).

Si bien dentro del plan nacional de GRD se tiene como objetivo estratégico mejorar el CRD en el territorio nacional, los rubros que se destinan para cumplir con las metas de este objetivo son bajos. Por ejemplo, los recursos que se destinan para la GRD en los municipios, se distribuyen principalmente para la RRD principalmente en programas de conservación de cuencas abastecedoras de agua potable y de reforestación. En cuanto a los indicadores de gestión del riesgo, en (UNGRD, 2022) se menciona que los recursos con los que se apoyan a los territorios se destinan principalmente para la respuesta, pero la inversión en conocimiento y reducción es poca.

La problemática anterior es una de las razones por la cual en este proyecto de investigación se pretende abordar el subproceso del CRD, articulándose con el objetivo estratégico de mejorar el CRD en el territorio nacional que plantea el Plan Nacional de GRD. Para esta investigación, se

tienen en cuenta casos relacionados con amenazas desencadenadas por lluvias en algunos países andinos, y que puedan aportar información que sirva para mejorar el CRD del EDC, los cuales al estar ubicados en la región andina y bajo la influencia del cinturón de fuego del Pacífico, están expuestos a diferentes amenazas por fenómenos naturales como sismos y amenaza volcánica. Adicionalmente, en el trópico las condiciones climáticas, tales como lluvias, cambios frecuentes de TEMP y vientos hacen que estos países estén expuestos a fenómenos como INU, AVT, DESL y sequías.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, se plantea la siguiente pregunta de conocimiento, ante la cual el presente estudio de investigación pretende dar respuesta:

¿De qué manera la experiencia de algunos países andinos en el conocimiento de las amenazas de origen natural y socio-natural como INU, AVT y MM desencadenadas por lluvias, pueden aportar al CRD del municipio de Villamaría, Caldas?

1.2. Justificación

El CC y la VC, colocan en riesgo a las poblaciones desde su bienestar logrando afectar no solo la calidad de vida sino también el desarrollo de las ciudades, por lo tanto, la adquisición del conocimiento científico del clima (CCDC) es relevante para la humanidad, debido a partir de este conocimiento es posible la integración del riesgo climático en las estrategias de los países para la definición de áreas acondicionadas a diferentes actividades productivas, que promuevan en un país su desarrollo y crecimiento socioeconómico (IDEAM - UNAL, 2018).

Se debe tener en cuenta que, si bien se ha avanzado en el CCDC, los efectos del aumento de la TEMP global y los cambios relacionados en el clima sobre los peligros geohidrológicos (p., INU, DESL, sequías) siguen siendo difíciles de determinar y predecir. Es necesario comprender y medir cómo las variables climáticas y su variabilidad afectan los peligros geohidrológicos, incluidos los DESL (Gariano & Guzzetti, 2016). Además, evaluar los efectos del CC en el entorno natural es un desafío para la comunidad científica y plantea problemas que invitan a la reflexión a los tomadores de decisiones. Los eventos hidrológicos extremos se ven afectados por este CC, siendo frecuentes los eventos de lluvias torrenciales y las sequías severas. Comprender estas tendencias permitiría mejorar la adaptación a las condiciones futuras y una mejor preparación para afrontar los desafíos que trae un clima cambiante, por lo tanto, una de las principales estrategias que permite enfrentar a los cambios inesperados del entorno corresponde la adaptación, a partir de la atención de las vulnerabilidades y oportunidades que cada territorio tenga con relación a los distintos eventos.

En Colombia, normativamente, la Ley 1931 de 2018 en su artículo 11 (Congreso de la República de Colombia, 27 de julio de 2018), establece que la articulación y complementariedad entre los procesos de adaptación al CC y GRD, deben basarse principalmente en los procesos de CRD y RRD relacionados a los fenómenos hidrometeorológicos e hidroclimáticos y a las probables modificaciones que se presenten en el comportamiento de estos fenómenos y que sean asociadas al CC.

Por otro lado, la Política Nacional de Cambio Climático que tiene por objeto *“la incorporación de la gestión del cambio climático en las decisiones públicas y privadas para avanzar en una senda de desarrollo resiliente al clima y baja en carbono, que reduzca los riesgos del CC y permita aprovechar las oportunidades que este genera en concordancia con los objetivos mundiales y compromisos nacionales (MADS, 2017)”*, menciona que la Organización Meteorológica Mundial catalogó el año 2015 como el más caluroso del que se tenga registro, sin embargo, recientemente la misma organización confirmó que la TEMP media anual del planeta en el año 2023 superó en $1,45 \pm 0,12$ °C los niveles preindustriales (1850-1900), por lo cual este fue el más cálido desde que hay registro (OMM, 2024). De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático - IPCC (por sus siglas en inglés), desde la era industrial la TEMP promedio del planeta ha aumentado 1°C. Para Centroamérica y Suramérica, el IPCC destaca que se presentan riesgos relacionados con la disminución en la disponibilidad de agua en regiones semiáridas y aquellas que dependen del aporte de glaciares; INU y DESL en áreas urbanas y rurales por el aumento de la PPT.

Considerando los impactos negativos sobre la sociedad que son generados por la modificación de patrones climáticos resultado del CC, fueron desarrolladas guías metodológicas para la integración de estos en los instrumentos de planificación del desarrollo brindando información que debe ser considerada, por ejemplo, en una de dichas guías la UNGRD mencionado que el CC propiciara el incremento de escenarios de riesgo de desastres por aumento de amenazas de origen hidrológico, exposición de población a mayores vulnerabilidades y amenazas socionaturales y bionasitarias, incremento en frecuencia e intensidad de fenómenos extremos meteorológicos e hidrológicos (UNGRD, 2018).

De acuerdo con el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (MADS, 2017), la justificación para promover la adaptación en Colombia corresponden a la conexión que existe entre el clima, los ecosistemas y el desarrollo, y menciona que en Colombia la mayoría de desastres se producen debido a las variaciones del clima, esto basado en la información contenida en el informe elaborado por la Organización Meteorológica Mundial en cooperación con la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas y otros socios internacionales (ISRD, 2009) citado por (DNP, 2012), donde se menciona que en los últimos 50 años, el 90% de los desastres fueron relacionados con fenómenos hidrometeorológicos, han sido influenciados por los fenómenos “El Niño” y “La Niña” y los Ciclones Tropicales debido a su ubicación geográfica, por lo tanto, la mayor cantidad de las emergencias reportadas por la UNGRD para el periodo 1998 - 2011 (13.624 en total), se relaciona con fenómenos hidrológicos y otros asociados. Por otro lado, existe una relación entre las emergencias y los fenómenos hidrometeorológicos en Colombia, lo que se puede confirmar por la relación entre frecuencia de emergencias, el régimen de lluvias y la intensidad con la que se presenta los desastres durante los fenómenos de la Niña y el Niño (DNP, 2012).

Adicional a lo anterior, en la Tercera Comunicación Nacional de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (CMNUCC) se presentan los resultados nacionales del análisis multidimensional de vulnerabilidad y riesgo por CC, donde se menciona que la totalidad de los municipios de Colombia tiene algún tipo de riesgo asociado por CC. Siendo las regiones de la baja Amazonía, sur Orinoquía, y las capitales de la zona Andina y el Caribe, las que presentan un alto riesgo. Por otro lado, las zonas en alto y muy alto riesgo para el año 2050 se incrementarán, teniendo que un 25% del territorio nacional se encontrará en dichos niveles y un 59% se encontrará en niveles medio y muy alto (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2017) citado por (DNP, 2022).

De acuerdo a lo anterior, mejorar el CCDC permitirá el establecimiento de áreas que se acondicionan a diferentes actividades productivas, también queda claro que el incremento de las lluvias aumenta el riesgo de INU, DESL y avalanchas, y además, se debe tener en cuenta que en general para Colombia todos los municipios presentan algún tipo de riesgo por CC, para el municipio de Villamaría dentro de su Plan de Desarrollo Municipal del periodo 2020-2023, en lo que corresponde al componente de GRD se plantea que durante ese periodo, la GRD se enfocará en actuar adecuadamente sobre el riesgo con el fin de evitarlo o mitigarlo. Las acciones implementadas comprenderán, actividades de prevención, mitigación, preparación, y transferencia; así como el fortalecimiento de los organismos de socorro, con el propósito de

aumentar las capacidades de respuesta en caso de riesgo y desastre (Alcaldía municipal de Villamaría, 2020), queda claro que dentro de este componente no se proyectan acciones que permitan desarrollar el CRD en el territorio.

Lo anterior justifica la necesidad de realizar una investigación que permita mejorar el conocimiento de las amenazas por fenómenos de origen natural y socio-natural desencadenadas por lluvias y así contribuir a mejorar el proceso del CRD en el territorio nacional. Los resultados obtenidos proporcionarán información para complementar la caracterización de escenarios de riesgo, aportara información para el análisis y evaluación del riesgo, lo que ayudara a fortalecer el proceso de monitoreo y seguimiento del riesgo, así mismo, brindarán información para la toma de decisiones y la formulación de medidas correctivas y prospectivas de RRD y fortalecer el proceso de MDD. Finalmente, se espera que los resultados contribuyan a la generación de insumos técnicos para la GRD, asegurando un flujo de información y conocimiento adecuado hacia los municipios, lo que traerá consigo territorios resilientes al CC que cuenten con capacidad de autogestión y que puedan mejorar en su desempeño y autonomía.

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

Analizar la experiencia de algunos países andinos en el proceso del conocimiento del riesgo de desastres (CRD) relacionado con movimientos en masa (MM), inundación (INU) y avenida torrencial (AVT), exacerbados por las lluvias, y su aporte al conocimiento del riesgo de desastres (CRD) del municipio de Villamaría, Caldas.

2.2 Objetivos Específicos

Establecer los parámetros y variables que permitan caracterizar la zona de estudio (ZDE) y la identificación de información relacionada.

Elaborar a partir de los resultados de un proceso de caracterización, el perfil del estudio de caso (EDC).

Identificar casos relacionados con amenazas desencadenadas por lluvias que sean aplicables al estudio de caso (EDC).

3 Antecedentes

En este capítulo se presentan algunos antecedentes relacionados con investigaciones y proyectos realizados en torno a la identificación de escenarios de riesgo, el análisis y evaluación del riesgo, el monitoreo y seguimiento del riesgo y sus componentes, y experiencias que permiten fortalecer el proceso del CRD.

Sidle y Ochiai (2006), en una evaluación de las variables y procesos que afectan los fenómenos de DESL, discutieron las influencias del CC en los DESL y concluyeron que el aumento de la TEMP media del aire y las variaciones en la PPT regional anual y estacional fueron los factores climáticos más relevantes (Gariano & Guzzetti, 2016).

Crozier (2010) fue el primero en enumerar y examinar sistemáticamente los mecanismos por los cuales el CC puede incidir directamente en los DESL y, de manera más general, en las condiciones de estabilidad de las laderas, evaluando el impacto de los CC previstos en los DESL y las laderas diseñadas. Una conclusión importante del trabajo fue que, independientemente del enfoque utilizado, la incompletitud inherente de los antiguos registros climáticos y de DESL limita la posibilidad de evaluar el impacto de los cambios ambientales y climáticos esperados en la frecuencia de los DESL, y de estimar las variaciones en los cambios asociados (Gariano & Guzzetti, 2016).

A nivel nacional, el IDEAM ha realizado estudios sobre tendencias de diferentes variables climatológicas. En uno de estos, por ejemplo, se utilizó las series de datos del período 1970-2010 junto con la herramienta RCLimindex, y como resultado obtuvo que las temperaturas nocturnas tienden a ser más cálidas, específicamente en la zona costera de la región Caribe, en los piedemontes Llanero y Amazónico, y en los departamentos de Santander y Antioquia. Además, identificaron un aumento generalizado de la PPT en zonas como Antioquia, Chocó, Vichada, el Piedemonte de Putumayo y la isla de Providencia, los cuales presentan el incremento más significativo; mientras que, en la isla de San Andrés, en zonas como Arauca y Casanare, en amplias áreas del Alto Cauca, ocurre lo contrario, observándose una disminución de la PPT; la mayor disminución ocurre en el suroccidente del territorio colombiano. Además, se estableció que las lluvias intensas están aumentando en amplios sectores de zonas correspondientes a la región Caribe, norte de la región Andina, Orinoquía y la región Pacífico norte y centro (Mayorga M, Hurtado M, & Benavides, 2011).

Según el IDEAM (2015), *“el futuro del clima sobre el territorio colombiano, paulatinamente se irá haciendo más cálido hacia finales del siglo XXI con el mayor calentamiento en las zonas bajas orientales, en zonas del Caribe y Pacífico y de la cuenca del río Magdalena; la PPT se reduciría en más del 30% hacia el 2011-2040 en sectores de la región Caribe y en el trapezio amazónico, y tendría aumentos superiores al 30% en las regiones del Eje Cafetero, Huila, Tolima, Cundinamarca, Boyacá, Cauca y Valle del Cauca; para los períodos 2041-2070 y 2071-2100 se mantiene la misma configuración de los cambios en la PPT (IDEAM - UNAL, 2018)”*.

Quinwen, Yafeng, Yukuan y Pei (2019), realizaron la evaluación del riesgo por flujo de escombros basados en un modelo de proceso agua-suelo para una cuenca bajo un escenario de CC en un área del suroeste de China, a partir de un examen de los datos históricos y la literatura

previa, determinaron que la susceptibilidad al flujo de escombros parece depender de las condiciones de formación del flujo de escombros, como el área de la cuenca, la pendiente del canal, el material suelto en la superficie y el carácter de las precipitaciones. Se simuló el resultado de la susceptibilidad de los flujos de escombros bajo el CC mediante la combinación de precipitaciones futuras reducidas y un modelo de dinámica de flujos de escombros provocados por las lluvias y, sobre esta base, se evaluó el riesgo futuro relacionado mediante una evaluación integral de la vulnerabilidad de una zona propensa a flujos de escombros del suroeste de China. Los resultados del modelo de proceso agua-suelo sugirieron que la ocurrencia de flujos de escombros fue de más de 10 veces en el tiempo (10 t), lo que indica una mayor susceptibilidad a los flujos de escombros bajo el CC en el área de estudio (Qinwen, Yafeng, Yukuan, & Pei, 2019).

La Organización Meteorológica Mundial (2021), en el informe del estado del clima para el año 2020 en América Latina y el Caribe, calcularon las anomalías y los porcentajes relativos a los datos de TEMP del aire y precipitaciones con respecto al período de referencia de 1981-2010 evaluando las condiciones meteorológicas, climáticas e hidrológicas de la región. Con lo anterior se identificaron los fenómenos extremos que se presentaron durante este periodo, menciona que se generaron fenómenos de PPT intensa e inundaciones relacionadas. En Brasil, durante los meses de enero y febrero, se presentaron lluvias intensas que generaron INU, crecidas repentinas y DESL. El mes de febrero de 2020 ha sido uno de los meses más lluviosos en los últimos años, registrándose 483.6 mm de precipitaciones en Brasil, valor que duplica la media normal histórica. Durante dicho mes se presentaron grandes pérdidas de viviendas.

En marzo del mismo año, se registraron INU, que afectaron países como Colombia, Ecuador, Perú, Brasil y al Estado Plurinacional de Bolivia. En Uruguay, en el mes de junio de 2020 se presentaron restricciones en carreteras y evacuaciones por causa de las crecientes provocadas por lluvias intensas que se presentaron, registrándose precipitaciones de hasta 105 mm en 24 horas en el departamento de Lavalleja, de acuerdo con el Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET). El sur del Brasil fue afectado por un intenso ciclón extratropical, entre el 30 de junio y el 1 de julio de 2020, con tornados, granizo y ráfagas de VIE que superaron los 130 km/h, en Río Grande y Santa Catarina se presentaron pérdidas humanas por la caída de árboles y estructuras. Como consecuencia del ciclón se afectaron 229 municipios, 2.600 personas perdieron sus viviendas y 1,5 millones de personas quedaron sin servicio de electricidad. En Venezuela en septiembre de 2020, varios estados fueron afectados por las INU del río El Limón, durante este mismo mes, en Rancho Grade, Ecuador se presentaron DESL de tierra por causa de una PPT de 90,5 mm en 4 horas, afectando a 1.409 personas (OMM, 2021).

Las precipitaciones extremas en la región, los DESL y las crecidas durante el año 2021 provocaron pérdidas de centenares de vidas, decenas de miles de viviendas destruidas o dañadas y cientos de miles de personas desplazadas. Los DESL y las crecidas en los estados brasileños de Bahía y Minas Gerais provocaron unas pérdidas que se estiman en 3.100 millones de dólares (OMM, 2022).

En el 2022 el SENAMHI realizó un estudio a nivel nacional en Perú para modelar la susceptibilidad a MM detonados por lluvias intensas, donde a partir de la identificación de 26 variables, la revisión de datos de ocurrencia de los eventos de MM detonados por lluvias intensas,

la aplicación del algoritmo “Random Forest” y el mapa de susceptibilidad, obtuvieron que los MM detonados por lluvias intensas son fenómenos catastróficos que se producen en áreas montañosas, en especial en Perú, y que se dan de manera particular en los años del fenómeno del niño. Igualmente identificaron que un total del 19.54% de estas zonas (cordillera andina) por las lluvias intensas se encuentran expuestas a MM (Risco, Lavado-Casimiro, & Felipe, 2022).

4 Marco teórico

En este capítulo, se describen y definen los conceptos relacionados con la investigación desarrollada los cuales dan sustento a la problemática planteada

Los **factores condicionantes** corresponden a una colección de datos geospaciales los cuales generan un efecto en la generación de MM, INU y AVT, los cuales son empleados para explicar los procesos existentes y los procesos que se espera puedan ocurrir en la ZDE (SGC, 2017).

La **geomorfología**, corresponde a la descripción de la totalidad del relieve de una zona desde sus diferentes formas, las cuales se encuentran definidas por la expresiones del terreno morfométrica y morfológica, por la relación de los cambios litológicos de las formaciones superficiales (rocas y suelos) incluida su disposición estructural, y se relaciona también con los procesos morfodinámicos (MM y procesos erosivos) de carácter activo e inactivo que han esculpido la superficie de un territorio. Por lo tanto, los mapas de geomorfología brindan información útil al momento de analizar la amenaza por MM, así como para la caracterización morfométrica de las cuencas hidrográficas, igualmente, brindan información para identificar las geoformas indicativas de depósito que pueden ser de origen fluviotorrenciales o fluvial principalmente.

La **pendiente del terreno**, es el ángulo formado por la superficie del terreno con respecto a la horizontal, expresada en términos de porcentaje (%) o grados (°). Es una variable considerada de gran importancia en el análisis de susceptibilidad por MM dado que se establece que el grado de inestabilidad de una ladera aumenta con la pendiente. Otros autores afirman que la inclinación de las laderas es el principal factor geométrico que debe ser considerado en los análisis de estabilidad, y uno de los principales condicionantes para que ocurra este evento amenazante. Adicionalmente autores como (Jones et al., 1961; Moser et al., 1983; Oyagi, 1984; Mulder, 1991) relacionan esta variable con la distribución de agua en la ladera.

La **cobertura de la tierra** es considerada un factor condicionante importante de MM y otros eventos amenazantes, debido a que la acción antrópica desfavorece la acción fijadora del terreno, cuando este contribuye en el cambio en los ecosistemas, en el ciclo hidrológico y en las formas del relieve (IDEAM, 2010).

La **cobertura de la tierra y uso del suelo** corresponde a un factor determinante al momento de determinar las condiciones de estabilidad de una ladera, específicamente en lo relacionado al control de la erosión, así como a la infiltración de aguas de escorrentía. Esta variable hace relación a la densidad de la vegetación y el uso que se destina para el suelo. Teniendo presente que los cambios de uso del suelo pueden afectar la estabilidad de laderas (Reichenbach, Busca, Mondini, & Rossi, 2014).

Los tipos de coberturas permite determinar el grado de protección que la vegetación brinda al suelo contra la erosión hídrica, donde por ejemplo la vegetación de tipo arbórea densa constituye la protección más eficaz en comparación con suelos desnudos o sin ningún tipo de vegetación.

La **geología** brinda información de las propiedades y características de los diferentes tipos de rocas y depósitos presentes en la ZDE, donde se tienen características relacionadas, entre otros,

con características hidrológicas e hidrogeológicas, origen, características físicas y mecánicas, disposición estructural y su composición litológica, así como la influencia generada a nivel de fracturamiento, incidencia de fallas, y condiciones de favorabilidad para que se generen MM.

La **geología estructural**, esta variable es importante para conocer el entorno tectónico de la ZDE y es fundamental para identificar la condición y estado de fracturamiento de las rocas, que se asocia particularmente, a las zonas de mayor deformación tectónica, que corresponde a las fallas geológicas, lineamientos y plegamientos de las rocas.

Los **factores detonantes**, corresponde a un estímulo externo por ejemplo una lluvia intensa, erupciones volcánicas, un sismo, tormentas, etc., que genera un desequilibrio y cuya respuesta casi inmediata es una INU, un MM o una AVT, en el caso del MM, este es generado por el cambio rápido en el estado de esfuerzos o se disminuye, en el material que constituye la ladera, su resistencia, en cuanto a las INU, se generan por un incremento en el nivel del cauce normal de los ríos o quebradas debido al aporte de la escorrentía.

Por lo general, un MM se encuentra asociado a las lluvias, ya que la PPT media anual y la TEMP media anual son factores que influyen directamente en el contenido de HUMD que presenta el suelo. Por tal razón, en lugares donde la PPT media anual es alta y la TEMP media anual es baja, la HUMD del suelo será mayor, contribuyendo en gran parte al desencadenamiento de este tipo de fenómenos. Numerosos estudios se han realizado a nivel mundial para establecer una relación entre los DESL y diferentes clasificaciones de lluvia. Sin embargo, no se ha logrado unificar una metodología que evalúe las distribuciones de lluvia como factores detonantes y tampoco se ha usado un conjunto de datos único, lo cual dificulta la comparabilidad de los resultados incluso en una misma región geográfica (Guzzetti, Peruccacci, Rossi, & Stark, 2007).

De acuerdo con el mecanismo de falla de una ladera se puede determinar si la respuesta de esta ante una lluvia es la generación de un MM. *“Cuando se tienen altas intensidades de lluvia es común que se detonen movimientos superficiales y flujos de detritos ya que la disipación de las presiones de poros positivas es muy rápida, especialmente en materiales permeables. En cambio, cuando se presentan lluvias de baja a moderada intensidad, por días o semanas, se pueden detonar flujos de detritos y DESL profundos, por lo que viene siendo entonces importante la lluvia antecedente al reducir la succión del suelo e incrementar las presiones de poros positivas, especialmente en suelos de baja permeabilidad (Corominas, y otros, 2013)”*. La definición de lluvias intensas se presenta cuando es superada la PPT promedio de una región geográfica, generándose niveles atípicos de escorrentía y flujos de agua, lo cual impacta el nivel de retención de agua de los suelos.

La PPT y la intensidad son factores de gran importancia para determinar la potencialidad torrencial que presentan los cursos de agua, ya que constituyen un agente activador de fenómenos torrenciales. En el contexto histórico de fenómenos torrenciales, la PPT fue por mucho el detonante más recurrente, ya sea PPT de carácter acumulado (p. ej., PPT antecedente al evento) o instantáneo (p. ej., intensidad de la PPT muy alta al momento del evento) (SGC, 2021).

Amenaza, de acuerdo con la Ley 1523 de 2012 (Congreso de la República de Colombia., 24 de abril de 2012b), es un peligro latente de que se presente un evento físico de origen natural, o causado por la acción humana de manera accidental, con una severidad tal que pueda ocasionar

pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, o también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.

Amenazas globales, según Cuevas y Preciado (2018), corresponden a aquellos fenómenos que generan externalidades negativas y sobrepasan la capacidad de respuesta de los Estados considerados como “Males Públicos” (Cuevas & Preciado, 2018). Dichos fenómenos están relacionados con los riesgos globales asociados a cambios geopolíticos, institucionales y socio-culturales, a partir del Foro Económico Mundial (2023), algunos riesgos globales identificados corresponden a Mitigación del CC, Adaptación al CC, Desastres “Naturales” y eventos climáticos extremos, Pérdida de biodiversidad y colapso de ecosistemas, Migración involuntaria a gran escala, Colapso estatal, Erosión de instituciones, Debilitamiento del estado de derecho, Crisis del costo de vida, Crisis de empleo, entre otros (World Economic Forum, 2023).

Avenidas torrenciales, Hunger, et. al. (2001), definen las AVT como un flujo de detritos saturados, no plásticos (índice de plasticidad menor que 5%), que se desplazan a velocidades muy rápidas a extremadamente rápidas principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce que presenta una pendiente pronunciada (Hunger, Evans, Bovis, & Hutchinson, 2001). Este es uno de los MM más peligrosos ya que por sus características de ocurrencia súbita y altas velocidades, cubre grandes distancias de viaje (UNGRD, 2017).

En Colombia, principalmente en las cuencas de montaña, las PPT intensas y de corta duración provocan concentraciones rápidas de flujo dentro de la red de drenajes dando paso a que se genere un flujo torrencial conocido como inundaciones súbitas. Por lo general, este tipo de eventos ocurren en cuencas de tamaños pequeños con pendientes pronunciadas y tienen como característica que presentan bajas cantidades de sedimentos que afecten el comportamiento del agua. Según Pierson (2005) se puede encontrar material hasta tamaño grava como carga de fondo. Aunque las inundaciones súbitas son conocidas como fenómenos que pueden generar daños potenciales, en Colombia, se presentan con una importante recurrencia durante precipitaciones intensas fenómenos torrenciales con baja capacidad de destrucción. Igualmente, es común que ocurran flujos torrenciales de tipo INU que se generan a partir de inundaciones súbitas lo que ocasiona el desplazamiento de grandes volúmenes de agua a lo largo del cauce, aumentando su poder erosivo, su capacidad de transporte y de removilización de los sedimentos del lecho, concatenado con DESL o colapsos de la banca a pequeña escala, que al adicionarse al flujo aumentan su volumen y carga de sedimentos (Jakob & Hungr, 2005).

Conocimiento del riesgo, según lo estipulado en la Ley 1523 de 2012 (Congreso de la República de Colombia., 24 de abril de 2012b), el CRD se relaciona al proceso de la GRD caracterizado por la identificación y caracterización de escenarios de riesgo, el análisis y evaluación del riesgo, el monitoreo y seguimiento del riesgo y sus componentes, el cual alimenta los procesos de RRD y de MDD.

Cambio climático, de acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático - IPCC (2019), se refiere a una alteración del estado del clima identificada estadísticamente, la cual se presenta largos periodos de tiempo, décadas o hasta más. Estas alteraciones pueden ser debidas a procesos internos naturales o a forzamientos externos, tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas y cambios antropógenos

persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra. La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el CC como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. Lo anterior discrimina entre el CC asociado a actividad antropogénicas y la VC debida a causas naturales (IPCC, 2018).

Inundaciones, de acuerdo con el “*Atlas de Riesgo de Colombia: revelando los desastres latentes (2019)*”, las INU corresponden a fenómenos hidrológicos potencialmente destructivos. Estas se generan por lluvias persistentes que ocasionan aumentos en el nivel del agua de los cauces, llegando incluso a superar la orilla del cauce presentándose así desbordamiento y dispersión del agua en zonas vecinas. La magnitud de una INU depende del tamaño de las cuencas hidrológicas afectadas, de la intensidad de las lluvias, de su distribución espaciotemporal, de las características del suelo y del drenaje natural o artificial de las cuencas (UNGRD, 2019).

Lluvias intensas, la Organización Meteorológica Mundial define lluvia como la PPT de partículas líquidas de agua, de diámetro mayor a 0,5 milímetros. Cuando se habla de lluvias intensas o torrenciales, se refiere a un fenómeno meteorológico donde la cantidad de agua caída supera los 60 mm en el transcurso de una hora, generalmente la lluvia depende de tres factores: la TEMP, la presión atmosférica y la HUMD atmosférica.

Movimientos en masa, corresponde a todo movimiento de una masa de roca, de detritos o de tierras que se produzca ladera abajo por efectos de la gravedad (Cruden, 1991). Con relación a la velocidad estos pueden ser lentos (hasta imperceptibles y difusos), rápidos con altas velocidades. Dentro de los principales tipos de MM se encuentran las caídas, reptación, flujos, DESL y propagación lateral. Otros términos con los que se les conoce es derrumbe, fenómenos de remoción en masa (REMA), volcamientos, desprendimientos de tierra, corrimientos de tierra, avalanchas, caídas de tierra, movimiento de tierras, alud de tierra, hundimientos de la tierra, rompimiento de montañas, escurrimiento de la tierra, resbalamiento de la tierra. Estos movimientos también se pueden generar por procesos de erosión (UNGRD, 2017).

Normal climática o climatológica, corresponde a una medida utilizada con el propósito de definir y comparar el clima a partir de la utilización de valores promedios. La normal climática representa el valor promedio de una serie continua de observaciones durante un periodo de por lo menos 30 años de una variable climatológica (IDEAM, 2005).

Precipitación, hidrometeorológicamente corresponde a la caída de un conjunto de partículas. La lluvia, llovizna, nieve, nieve granulada, polvo diamante, gránulos de hielo, granizo y cinarra, son formas de PPT. También se puede definir como la caída de partículas de agua líquida o sólida que se originan en una nube, atraviesan la atmósfera y llegan al suelo. La cantidad de PPT se relaciona con el volumen de agua lluvia que pasa a través de una superficie en un tiempo determinado (IDEAM, 2005).

Variabilidad climática, en la Ley 1931 de 2018 (Congreso de la República de Colombia, 27 de julio de 2018), este concepto se relaciona con variaciones que presenta el estado medio y otros datos del clima en todas las escalas temporales y espaciales, como por ejemplo la ocurrencia de

fenómenos extremos como El Niño y La Niña. Se puede catalogar en variabilidad interna asociada a procesos naturales internos del sistema climático y en variabilidad externa generada por procesos antropogénicos.

5 Metodología

En esta sección del documento son presentados los aspectos metodológicos del estudio, se describen los procesos adoptados para el cumplimiento de los objetivos planteados, así como los criterios definidos para analizar los resultados obtenidos.

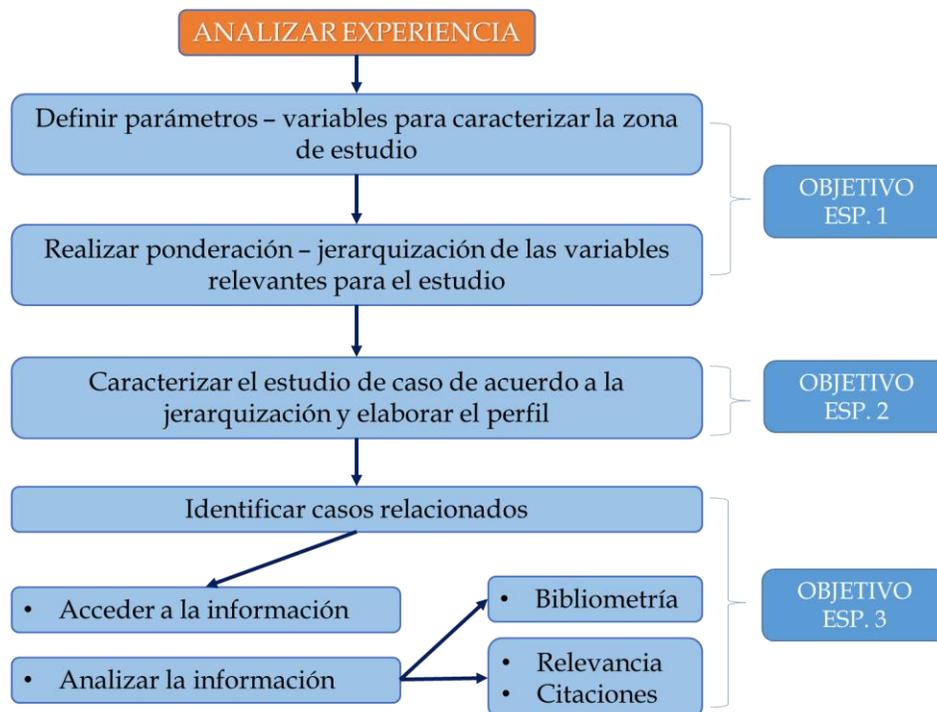
Para analizar la experiencia de algunos países andinos en el proceso del CRD relacionado con MM, INU y AVT, exacerbados por las lluvias, y su aporte al CRD del municipio de Villamaría - Caldas, se realizaron las siguientes actividades:

De acuerdo con el objetivo específico 1, se definieron los parámetros y variables para caracterizar la ZDE. Igualmente, se realizó la ponderación - jerarquización de las variables relevantes para el estudio.

A partir de la jerarquización de las variables relevantes se llevó a cabo un proceso de caracterización y construcción del perfil del EDC, lo anterior para dar cumplimiento al objetivo específico 2.

Una vez realizado el proceso de caracterización se identificaron casos relacionados que se incluyeron en el estudio y que fueron determinantes para hacer la comparación con el EDC. Por último, al tener definidos los casos relacionados se realizó un proceso de acceso a la información, la cual fue analizada y se definió su aplicabilidad al EDC, cumpliendo con lo propuesto en el objetivo específico 3.

Figura 1. Esquema metodológico.



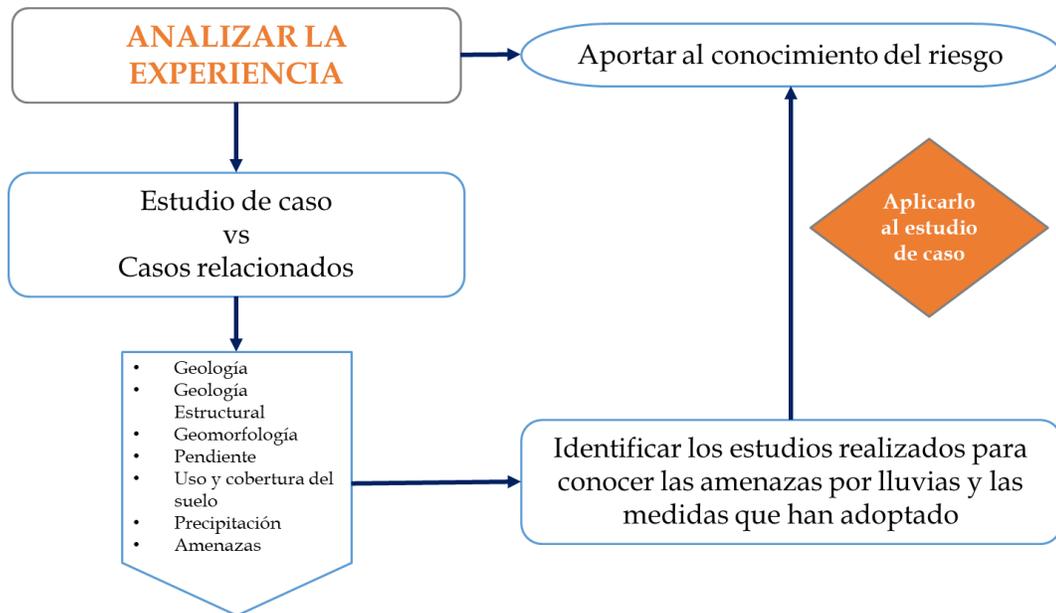
Fuente: Elaboración propia.

5.1 Definición de casos relacionados

Para la definición de los casos relacionados se analizaron las características físicas teniendo en cuenta los factores ambientales que inciden en sus territorios, y se tuvieron en cuenta parámetros y variables homogéneas para hacer la comparación con el EDC.

Las variables y parámetros definidos corresponden a geología, geología estructural, geomorfología, pendiente, uso y cobertura del suelo, régimen de lluvia y los históricos de eventos amenazantes, los cuales nos permitieron conocer las características del EDC y posteriormente identificar estudios realizados o casos relacionados para conocer las amenazas desencadenadas por lluvias y las medidas que se han adoptado.

Figura 2. Esquema metodológico para la definición de las unidades de análisis.



Fuente: Elaboración propia.

5.2 Análisis y clasificación de la información

Se realizó la revisión de la literatura disponible relacionada con la temática de la investigación, trabajos de grado, artículos científicos, investigaciones periodísticas y la información cartográfica desarrollados en la región andina.

Una vez recolectada la información documental y la información cartográfica, se realizó el análisis y clasificación de acuerdo a la calidad, teniendo en cuenta criterios como la pertinencia, que hace referencia a si esta es relevante o no para la realización del trabajo de investigación, aquí se consideran la fuente de la información y georreferenciación. La fiabilidad, este criterio determina si la información que aporta el documento es confiable o no, para lo cual se tuvo en cuenta dos aspectos, método y relevancia. La actualidad, se utilizó para establecer qué tan reciente es la información o el documento a evaluar, se considera el criterio de actualidad el cual permite

determinar su validez al momento del análisis. La calidad, se establece como una calificación de cada documento, obtenida de los criterios de pertinencia, fiabilidad y actualidad. Finalmente se realizó la evaluación de la información, que sirvió para establecer la relevancia de la información aplicable al trabajo de investigación.

Figura 3. Esquema metodológico para el análisis y clasificación de la información.



Fuente: Elaboración a partir de CONSORCIO POMCA CAUCA (2021).

Posteriormente, se estructura el documento a partir de la información revisada, mediante un análisis cualitativo y se realiza una crítica propositiva, se resaltan los aspectos positivos y se brindan las opiniones y recomendaciones sobre las mejoras que se puedan realizar, así como destacar los aspectos más importantes para su apropiación en el CRD.

6 Resultados y análisis

A continuación, se presentan los resultados relacionados con el cumplimiento del objetivo específico 1 “Establecer los parámetros y variables que permitan caracterizar la zona de estudio y la identificación de información relacionada”.

Para realizar la caracterización del EDC municipio de Villamaría, Caldas y construir el perfil del municipio se identificaron y describieron variables y los parámetros que por sus características contribuyen a la generación de fenómenos amenazantes de origen natural y socio-natural como INU, AVT y MM, y se realizó la descripción de la variable PPT que por sus características es considerada como uno de los factores detonantes que puede originar una respuesta casi inmediata de poner en movimiento los materiales que conforman una ladera (Wang & Sassa, 2003) o que puede aumentar el nivel de ríos y quebradas generando el desbordamiento de las mismas.

Se realizó la descripción de variables contribuyentes como la geología, geología estructural, geomorfología, pendiente y uso y cobertura del suelo, igualmente se realizó la caracterización climática del municipio enfocada a conocer las condiciones de PPT de la zona.

Tabla 1. Ponderación – jerarquización de las variables definidas.

Variable	Ponderación - Jerarquización	Comentario
Pendiente	5	Es un factor que afecta la estabilidad, y un condicionante para que ocurran eventos amenazantes.
Cobertura vegetal y uso del suelo	4	Es una variable determinante en la estabilidad de una ladera, específicamente en lo que tiene que ver principalmente con la infiltración de aguas de escorrentía y con el control de la erosión. La alteración del uso del suelo infliere directamente sobre la estabilidad de las laderas, así como en la capacidad que tiene el suelo para retener la escorrentía por lo que esta llega a los cauces aumentando el nivel de los mismos lo que repercute en la ocurrencia de eventos de INU.
Geomorfología	3	Los mapas de geomorfología brindan información útil en el análisis de la amenaza MM, así como para la caracterización morfométrica de las cuencas hidrográficas, brindan información para identificar las geoformas indicativas de depósito que pueden ser de origen fluviotorrenciales o fluvial principalmente.
Geología	2	La geología brinda información de las características y propiedades físicas de las rocas y depósitos presentes en una ZDE, con la cual se puede determinar las condiciones que favorecen la ocurrencia de MM o de un proceso erosivo.
Geología estructural	1	Esta variable es importante para conocer el entorno tectónico de la ZDE y es fundamental para identificar el estado de fracturamiento de las rocas.

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 1 se puede afirmar que, aunque la pendiente sea considerada la más relevante para la caracterización de una ZDE y que dentro de la ponderación y jerarquización tenga el valor más alto, no quiere decir que las demás variables dejen de ser importantes.

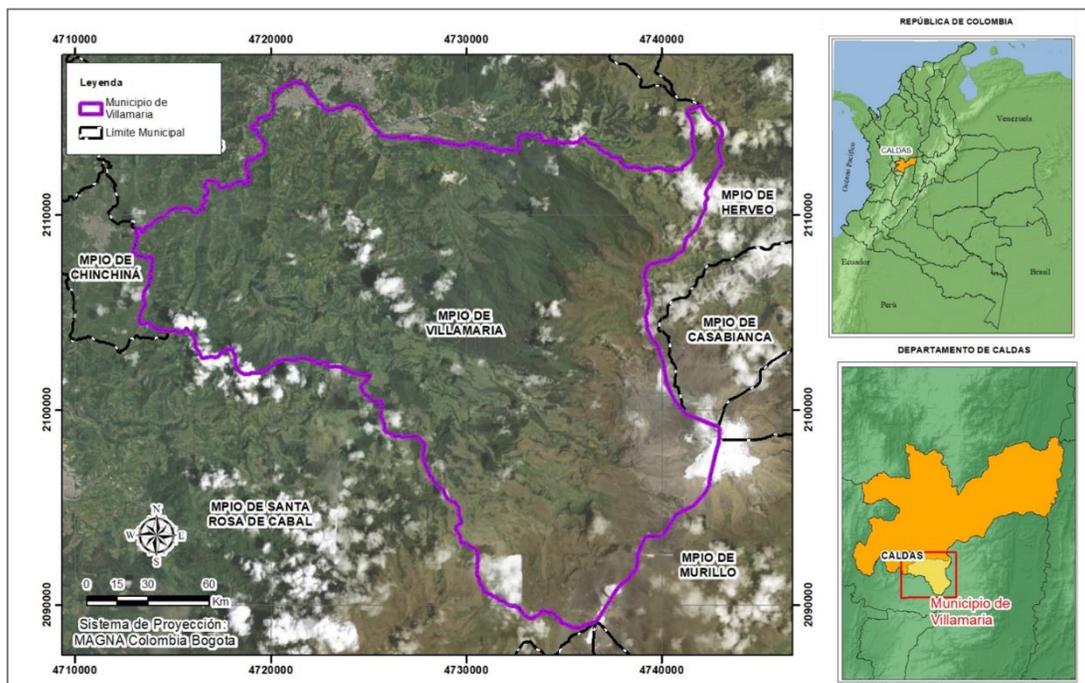
6.1 Perfil municipio de Villamaría, Caldas

Para cumplir con el objetivo específico 2 “Elaborar a partir de los resultados de un proceso de caracterización, el perfil del estudio de caso”, a continuación, se presentan los resultados relacionados a este.

El municipio de Villamaría, se encuentra localizado en el departamento de Caldas, en la región eje cafetero, el municipio pertenece a la Subregión Centro Sur del departamento, su territorio se encuentra dentro de una conurbación no configurada denominada Área metropolitana Centro Sur de Caldas, conformada por su municipio principal Manizales, y los municipios periféricos a este Neira, Villamaría y Palestina, los cuales pertenecen al departamento de Caldas. Su territorio posee un área de 480 km², dividido en área urbana y rural con 35 veredas.

Su cabecera municipal se ubica a una altura de 1.920 msnm, presenta una TEMP promedio de 18°C. Su territorio reúne una gran variedad de climas, comprende un rango de alturas que van desde los 1.000 msnm en límites con el municipio de Chinchiná, hasta los 5.320 msnm en las nieves perpetuas del volcán Nevado del Ruiz (VNR), ubicado en el Parque Nacional Natural Los Nevados (PNNN). El municipio cuenta con numerosas fuentes de agua y recursos naturales, el río Chinchiná que bordea el área urbana, se encuentra el nevado del Ruiz y parte del PNNN. (Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres Villamaría, 2020).

Figura 4. Mapa de localización municipio de Villamaría - Caldas

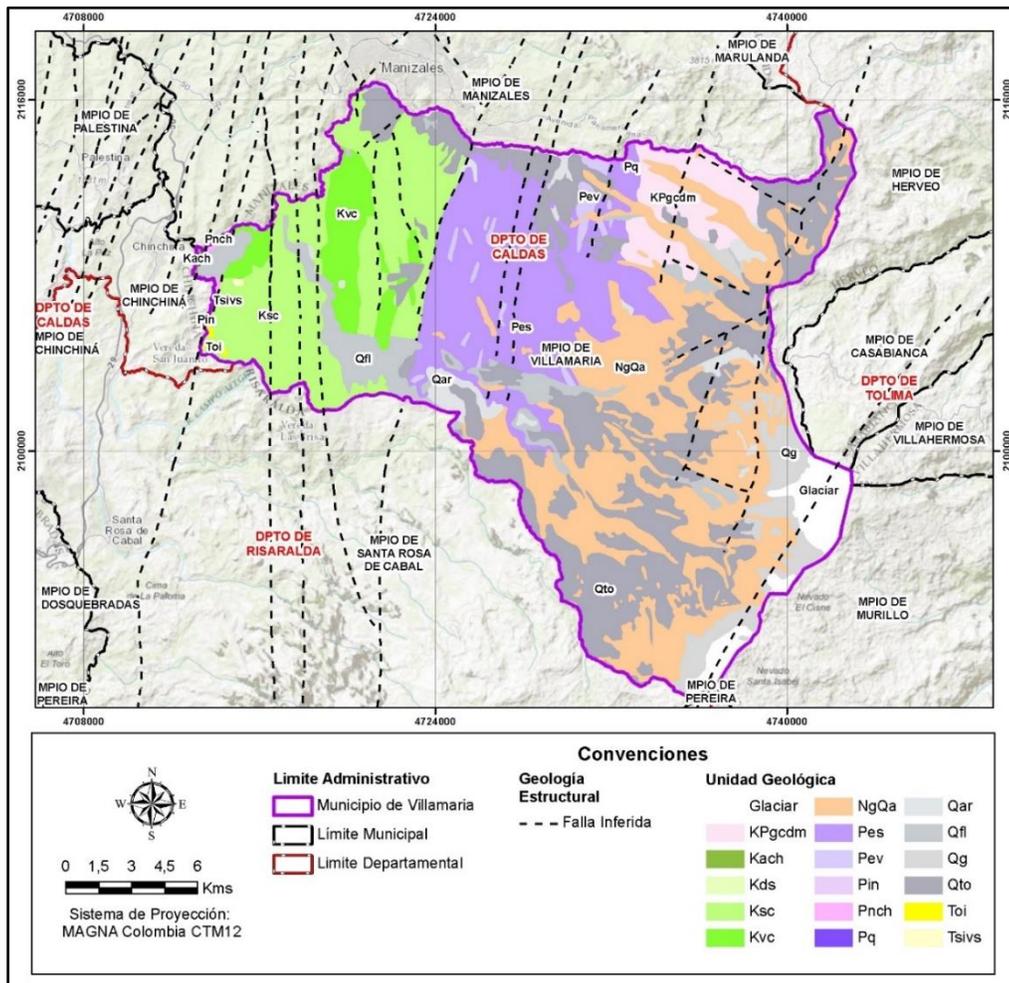


Fuente: Elaboración propia.

6.1.1 Geología

En el municipio de Villamaría, se pueden encontrar rocas metasedimentarias del Complejo Quebradagrande y rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, las cuales se encuentran en contacto fallado debido a la falla San Jerónimo; sobre estas rocas, se depositaron discordantemente Flujos de Escombros, depósitos de Caída Piroclástica relacionados con eventos eruptivos del Complejo Volcánico Ruiz - Tolima (CVRT) y depósitos aluviales del río Chinchiná. Además, en el municipio de Villamaría afloran rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, con edades que van desde el Paleozoico hasta el Cuaternario.

Figura 5. Unidades geológicas del municipio de Villamaría - Caldas



Fuente: Elaboración propia a partir de (Gonzalez, 2001).

El Complejo Cajamarca (Pes - Pev - Pq - Pnch) se caracteriza por ser un complejo polimetamórfico constituido por tres grupos composicionales, un Grupo Cuarzoso (Pq) compuesto principalmente por cuarcitas, un Grupo Pelítico (Pes) compuesto por filitas, esquistos sericíticos y micáceos, y el Grupo Básico (Pev) compuesto por esquistos verdes y anfibolitas, y a este complejo también corresponde la unidad Neis de Chinchiná (Pnch) compuesto principalmente por variaciones de neis cuarzo feldespático y aluminico a cuarcita y esquistos biotítico, que afloran en la ZDE.

El Complejo Quebradagrande, se diferencia litológicamente por presentar intercalaciones de rocas sedimentarias y volcánicas, donde se pueden observar extensas variaciones litológicas tanto en la secuencia sedimentaria como en la relación entre flujos volcánicos y capas piroclásticas, por lo que las litologías se han agrupado informalmente como miembro volcánico (Kvc) y miembro sedimentario (Ksc).

En el municipio aflora la unidad Anfibolita Saussurítica de Chinchiná (Kach) que hacen parte del Complejo Arquía (Kes - Kea - Kach) y corresponden a rocas metamorfitas las cuales se

encuentran separadas de las rocas del Complejo Quebradagrande (Ksc - Ksv) por la Falla Silvia-Pijao.

El Stock de Manizales (KPgcdm) corresponde a un cuerpo ígneo, caracterizado por rocas granitoides las cuales aflora al Norte del VNR, generalmente se encuentra bajo una cobertura de depósitos piroclásticos generados durante la acción pliocuaternaria del CVRT.

Flujos andesíticos (NgQa), corresponden a capas de rocas ígneas extrusivas las cuales presentan gran espesor y se encuentran cubriendo las rocas ígneas y metamórficas del basamento de la Cordillera Central.

La Formación Irra-Tres Puertas, corresponde litológicamente a un conjunto de conglomerados ricos en cuarzo lechoso y chert negro, a conglomerados ricos en rocas verdes, arenas, limos, arcillas y delgadas capas de carbón y al conjunto de estratos compuestos por arenas cuarzosas ricas en pómez y conglomerados ricos en pórfidos andesíticos.

Miembro volcánico - sedimentario (Tsivs), litológicamente se describe como una serie de sedimentos de origen volcánico, que se presentan como láminas de color crema a blanco, de composición rica en cuarzo, feldespato y fragmentos de pómez, las cuales se intercalan con niveles de conglomerados ricos en fragmentos de pórfidos andesíticos y, menor proporción, de rocas verdes; además, incluye tobas de cristales con o sin fragmentos pumíticos y láminas delgadas de sedimentos con abundante materia orgánica (turba).

La unidad Flujo Piroclásticos - Flujo de lodo volcánico (Qfl), corresponden a productos piroclásticos emitidos por la actividad volcánica reciente del CVRT. Parte de estos materiales se depositaron en medio acuoso, el cual sirvió de medio de transporte tanto hacia el oriente como al occidente del eje de la cadena volcánica depositándolos a lo largo de la cuenca y zonas de INU.

Rocas piroclásticas (Qto), corresponden a depósitos de caída piroclástica, relacionadas a la actividad cuaternaria de los volcanes del CVRT, están distribuidos a lo largo del municipio de Villamaría, enmascarando las unidades litológicas más antiguas y suavizando la topografía de la ZDE.

Aluviones recientes (Qar), se encuentran relacionados a los depósitos de material aluvial y coluvial no consolidados que presentan poco espesor y que fueron depositados en los cañones de algunos ríos y quebradas. Y los depósitos Glaciares (Qg), que se relacionan con depósitos que se encuentran conformados por bloques de lavas andesíticas y andesitas basálticas dentro de una matriz areno-arcillosa de color amarillo a blanco amarillento.

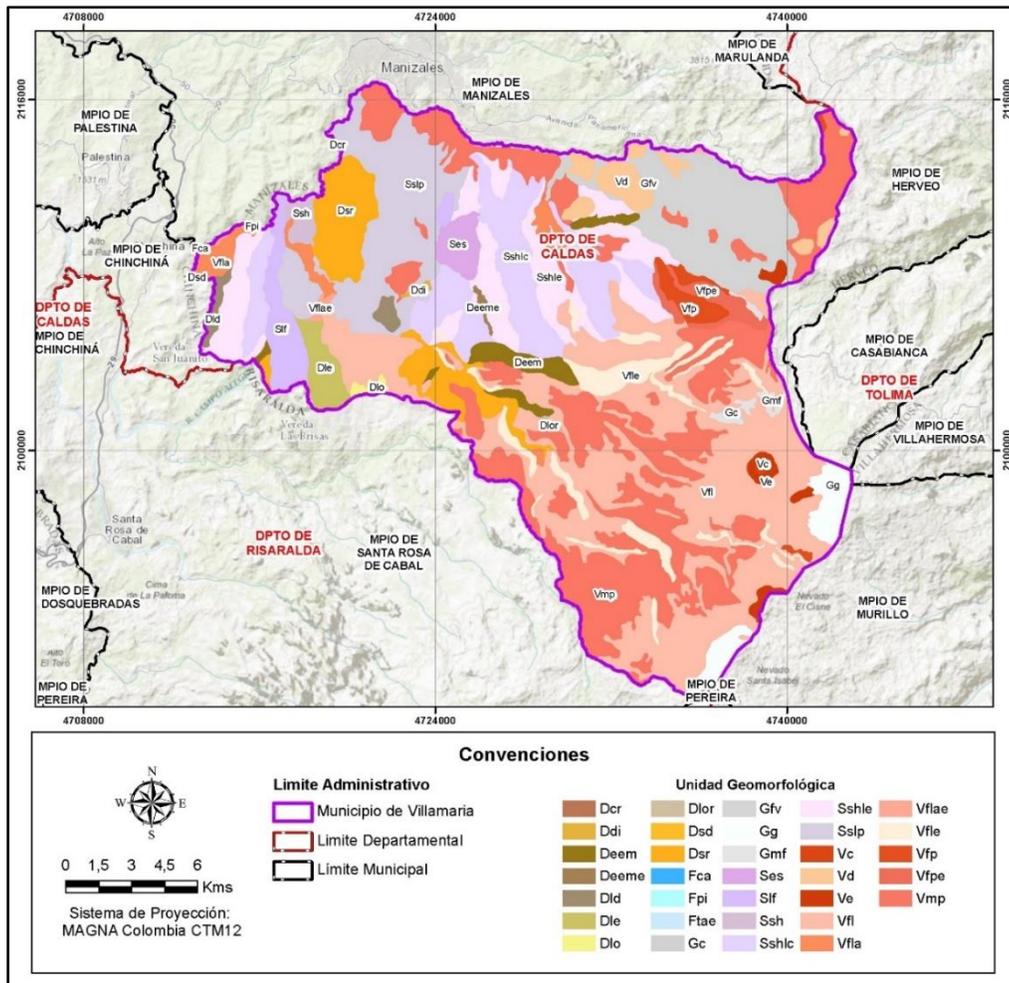
6.1.2 Geología Estructural

La geología estructural en el municipio se relaciona a los sistemas de fallas de distintas edad y naturaleza, los cuales afectan las diversas unidades geológicas, desde el Paleozoico hasta el Reciente (Figura 5). El rasgo estructural mayor y mejor definido corresponde a los sistemas de fallas Palestina y Romeral.

6.1.3 Geomorfología

En cuanto a la **geomorfología**, corresponden a las formas del terreno que representan la configuración actual del paisaje, son el resultado de la interacción de sistemas montañosos con pendientes moderadas a altas, que han sido sujetos a procesos tectónicos, erosivos, de glaciación y procesos de acumulación de MM, que a su vez han sido modelados por procesos volcánicos; y transformados por los usos antrópicos, de acuerdo a esto, en el municipio se identifican subunidades geomorfológicas de ambientes morfogenéticos Estructural, Denudacional, Glacial, Fluvial y Volcánico, y de acuerdo a las memorias explicativas de los mapas geomorfológicos aplicados a MM de las planchas 225 Nevado del Ruiz, 206 Manizales y 205 Chinchiná del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2014) en el municipio se identifican 32 subunidades geomorfológicas, las cuales clasificándolas por el ambiente morfogenético corresponden 53.96% al ambiente volcánico, seguido por el ambiente estructural con un 26.37%, ambiente glacial con 11%, ambiente denudacional con 8.65% y en menor proporción el ambiente fluvial con un 0.02%.

Figura 6. Subunidades geomorfológicas del municipio de Villamaría - Caldas



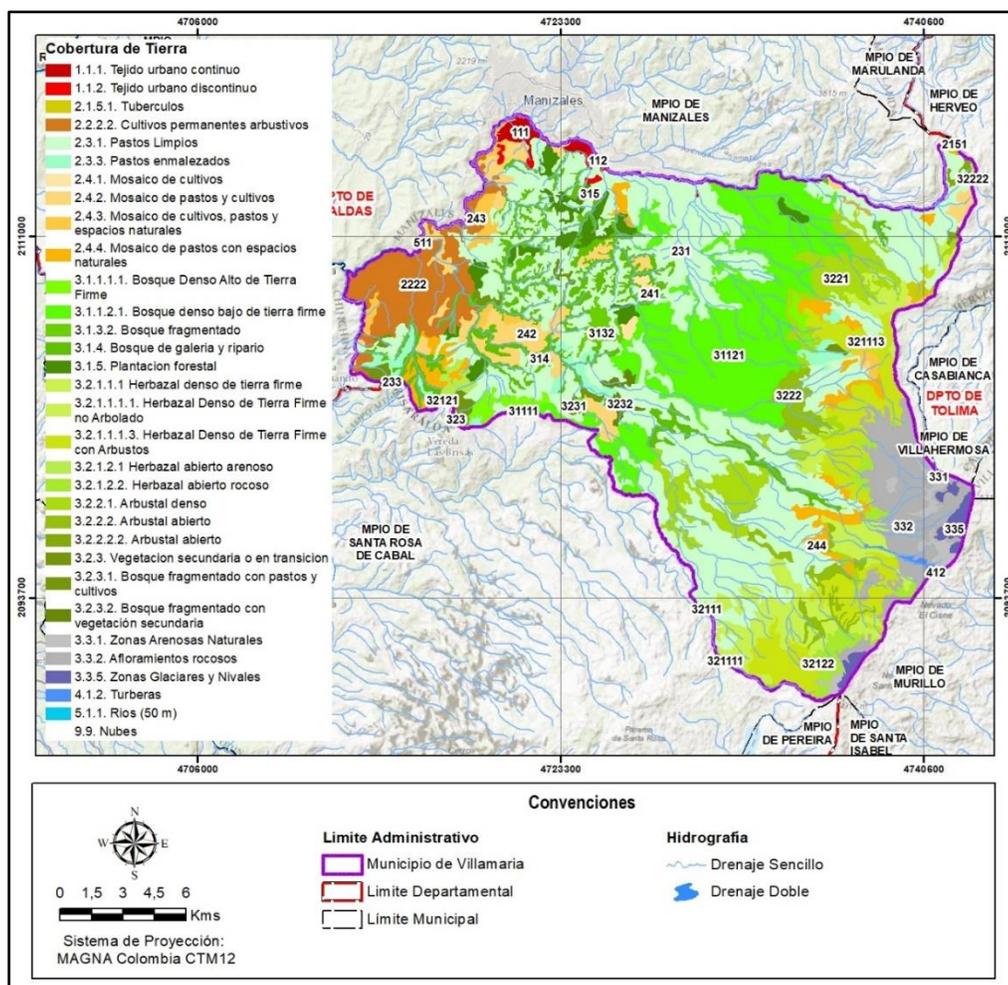
Fuente: Elaboración propia a partir de (SGC, 2014).

Esta zona está caracterizada por un relieve abrupto conformado por montañas de laderas muy largas y fuertes pendientes compuestas por unidades metamórficas recubiertas por depósitos de tipo volcánico, con una superficie de erosión profunda.

6.1.4 Cobertura de la tierra

Para el municipio, la cobertura con mayor presencia corresponde a pastos con el 34,40%, sobresaliendo aquí los pastos limpios; seguido por los bosques con el 24,00%, siendo el bosque denso el más representativo; y áreas con vegetación herbácea y arbustiva con el 21,26 %, siendo herbazal el de mayor presencia. El 20,34% restante se encuentra distribuido entre territorios artificializados, territorios agrícolas, áreas húmedas y superficies de agua.

Figura 7. Unidades de cobertura de la tierra del municipio de Villamaría - Caldas



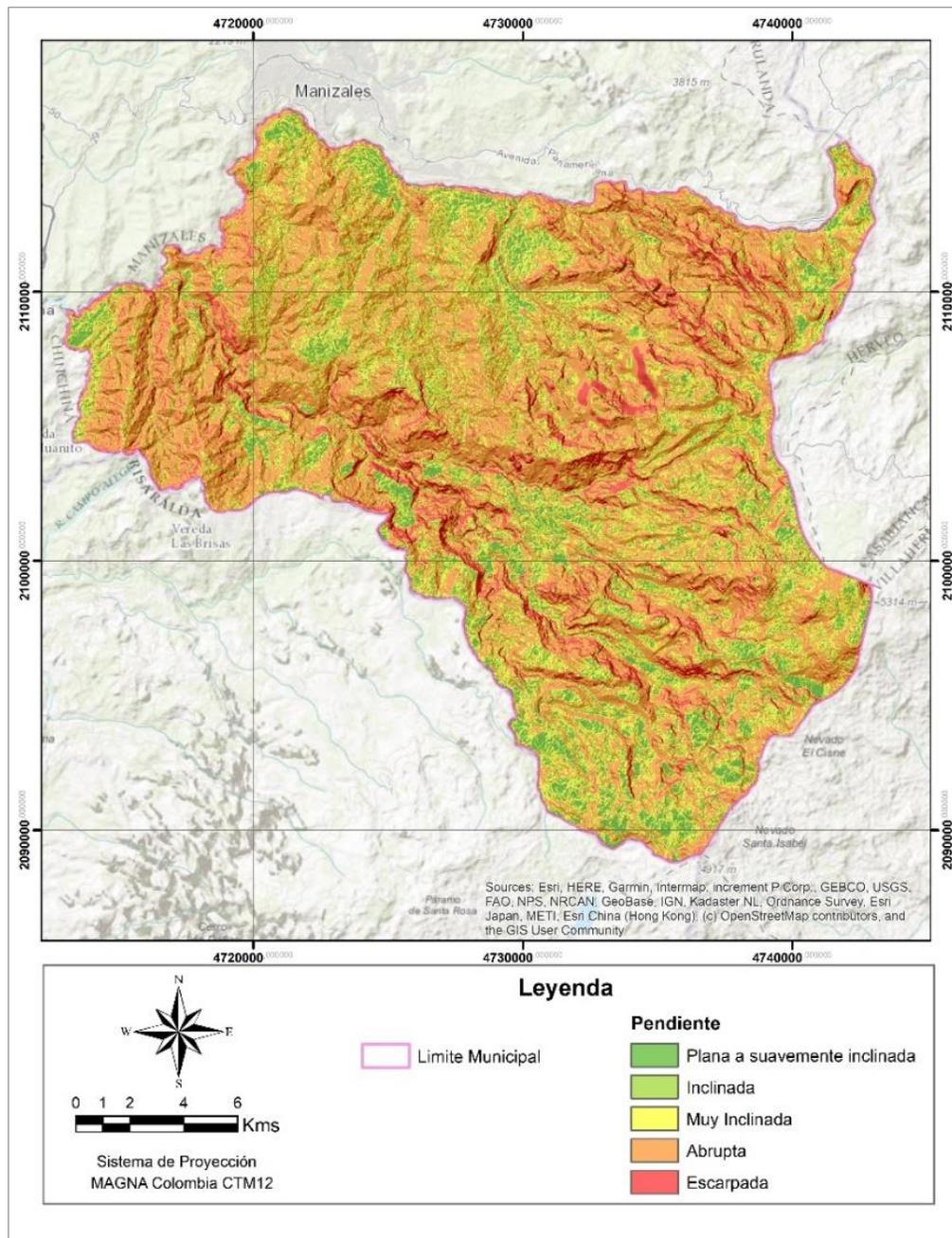
Fuente: Elaboración propia a partir de (IDEAM, IGAC y Cormagdalena, 2008)

6.1.5 Pendiente

Las **pendientes** en el municipio se clasifican en laderas planas a suavemente inclinadas (entre 0 a 7 grados), inclinadas (entre 7 a 11 grados), muy inclinadas (entre 11 y 19 grados), abruptas (de

19 a 40 grados) y pendientes escarpadas (mayores a 45 grados). Un poco más de la mitad del área del municipio presenta una pendiente abrupta con el 50,2%; seguido por una pendiente muy inclinada con el 25,0%; pendiente inclinada con un 9,1% y escarpada con el 8,4 %. El 7,3% restante corresponde al área con una pendiente plana a suavemente inclinada.

Figura 8. Mapa de pendientes del municipio de Villamaría - Caldas



Fuente: Elaboración propia a partir de DEM ALOS PALSAR obtenido de <https://search.earthdata.nasa.gov/>.

Por lo anterior, la configuración del relieve actual del municipio, se debe gracias al contraste de pendientes suaves con las más fuertes, las cuales originaron fenómenos erosivos y deposicionales que se combinaron con los procesos tectónicos, volcánicos y antrópicos.

6.1.6 Clima

Para caracterizar la PPT del municipio se debe conocer la caracterización climática, para ello se tiene en cuenta la información obtenida del análisis climático que se realiza para el POMCA de río Chinchiná, debido a que la mayor parte del área del municipio de EDC se encuentra inmersa dentro del área de esta cuenca. Para la caracterización climática se incluyen variables climatológicas como la TEMP del aire, la humedad relativa, la presión atmosférica, el VIE y la PPT, entre otras. Las fluctuaciones de estas variables, por encima o por debajo de la normal climatológica, se conoce como VC.

Las variables más importantes corresponden a temperaturas medias mensuales y regímenes de PPT, debido a que las demás variables están relacionadas entre sí. Para el caso de este trabajo de investigación se pone especial énfasis en conocer la variable de régimen de PPT o régimen de lluvia.

El clima en la ZDE es (ínter) tropical, con pequeñas variaciones de la TEMP interanual, y variaciones diarias grandes y distribución bimodal de lluvia. El municipio se encuentra en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) donde convergen los vientos alisios del hemisferio norte con los del hemisferio sur, así como por el carácter montañoso de la región. La altitud determina la TEMP, por ello existen disimetrías de orden espaciotemporales; así, la TEMP mínima en la zona alta de la cuenca del río Chinchiná está por debajo de -3°C y en Santágueda se registra una TEMP máxima de $29,2^{\circ}\text{C}$ a 1.000 m. Por otro lado, los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, registran las TEMP más bajas, mientras que febrero, marzo, abril y mayo se presentan las más altas (Convenio Corpocaldas - ASOCARS - U.N. IDEA, 2014).

En cuanto a climas, hacia la parte media de la cuenca del río Chinchiná (2.000 a 3.000 msnm) se presenta clima frío húmedo y muy húmedo, el rango de TEMP varía desde los 12°C a los 18°C y la PPT entre los 1.000 y 4.000 mm/año. Los valores medios de PPT en la cuenca oscilan de 1.800 a 2.000 mm/año. En las partes altas se encuentran las zonas menos lluviosas, llegándose a un mínimo en las cercanías del nevado Santa Isabel de 600 a 800 mm.

La humedad relativa media tiene una tendencia similar a la PPT, con valores altos durante los meses húmedos y bajos en los meses secos. El perfil diario de la humedad relativa presenta un comportamiento opuesto a la TEMP, con fluctuaciones importantes. La mejor manera de observar el comportamiento de las variables climatológicas principales es mediante los climogramas, los cuales permiten observar la variación mensual, a lo largo de un año promedio, de la PPT y la TEMP (Convenio Corpocaldas - ASOCARS - U.N. IDEA, 2014).

6.1.6.1 Precipitación

Para entender el clima de una región es necesario analizar la PPT en cuanto a su comportamiento, así como el de sus patrones descritos en términos de intensidad, duración, frecuencia, profundidad, distribución temporal y espacial. La PPT total anual la intensidad de las lluvias permiten establecer para una región sus características climáticas, en la Tabla 2 se presentan los valores de referencia.

Tabla 2. Rangos de PPT total anual y de intensidad de lluvia para definir las características climáticas de una región.

PPT total anual		Intensidad de lluvia	
Poca	< 200 mm/año	Débiles	< 2 mm/h
Escasa	200 - 500 mm/año	Moderadas	>2 y < 15 mm/h
Normal	500 - 1000 mm/año	Fuertes	>15 y < 30 mm/h
Abundante	1000 - 2000 mm/año	Muy fuertes	>30 y < 60 mm/h
Muy abundante	> 2000 mm/año	Torrenciales	>60 mm/h

Fuente: Elaboración propia a partir de (Upegui V, Alzáte O, Duque M, & Zuluaga A, 2015)

Colombia tiene una PPT media anual de 3.000 mm. En la zona andina, la cantidad de PPT es influenciada por los sistemas de nubosidad, que se encuentran vinculados a la altitud, la disposición de las montañas y la actividad convectiva (Jaramillo, 2005). *“La diversidad pluviométrica en la zona es alta, con valores que van hasta los 2.000 mm en la cordillera Oriental y en los valles del alto Magdalena y alto Cauca y núcleos máximos que varían desde los 3.000 a los 5.000 mm en las cuencas del Magdalena Medio y Medio Cauca (IDEAM, 2005)”*. La PPT presenta un comportamiento intra anual bimodal, con dos temporadas secas y dos con exceso hídrico, correspondientes a los periodos enero-febrero y julio-agosto, y los periodos abril-mayo y octubre-noviembre, respectivamente (Jaramillo, 2005). El anterior comportamiento es presentado en la cuenca del río Chinchiná, con valores promedio entre 2.000 y 2.200 mm/año; la PPT fluctúa entre 900 a 2.500 mm/año. En la cuenta alta, extremo sur, se presentan zonas de menor pluviosidad, en las partes más cercanas a los glaciares, donde se registran valores de entre 600 y 800 mm/año. En la zona media, las PPT varían entre 1.000 a 4.000 mm/año, principalmente en valores superiores a los 2.000 mm/año (Convenio Corpocaldas - ASOCARS - U.N. IDEA, 2014).

Para definir la PPT del municipio fueron analizados los datos de las estaciones que registran información pluviométrica que se encuentran dentro del mismo y también las estaciones de los municipios cercanos. Para definir el comportamiento de las lluvias en Villamaría se pudo tener acceso a las series de hasta 30 años, se obtuvo información de las normales climatológicas 1971-2000, 1981-2010 y 1991-2020, igualmente se pudo acceder a los datos climatológicos, para lo cual se cuenta que el último año registrado es el 2022 y la temporalidad registrada por cada estación es de 30 años. En la Tabla 3 se puede observar el resumen de las estaciones examinadas para el municipio.

Tabla 3. Estaciones tenidas en cuenta para el análisis de PPT en el municipio de Villamaría, Caldas.

Estación	Código	Norte (m)	Este (m)	Altitud (m.s.n.m)	Temporalidad
Las Brisas	26155150	2103718.25	4739455.25	4.133	30 años
La Esperanza	26150160	2112933.17	4738804.17	3.341	30 años
Papayal	26150150	2105669.96	4724007.63	2.304	30 años
Aeropuerto La Nubia	26155110	2114300.53	4726236.90	2.104	30 años

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del IDEAM (2023).

Tabla 4. Rangos de PPT total anual y de intensidad de lluvia para definir las características climáticas de Villamaría-Caldas, normal climatológica 1971-2000.

Estación	Precipitación promedio 1971 - 2000 (mm)													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual	Mensual
Las Brisas	90.9	91.2	107.7	182.1	187.8	108.8	75.3	71.9	127.5	190.4	140.1	81.2	1454.92	121.24
La Esperanza	72.9	87.0	125.7	185.2	199.0	146.8	111.8	109.4	159.4	195.5	176.1	105.8	1674.60	139.55
Papayal	111.7	118.7	164.5	203.5	226.9	151.3	93.4	104.6	166.8	237.8	220.3	132.1	1931.56	160.96
Aeropuerto La Nubia	98.5	91.5	133.9	166.6	153.5	91.8	64.0	74.5	139.8	188.2	164.2	124.6	1490.98	124.25

Fuente: Elaboración propia a partir de IDEAM (2023).

Tabla 5. Rangos de PPT total anual y de intensidad de lluvia para definir las características climáticas de Villamaría-Caldas, normal climatológica 1981-2010.

Estación	Precipitación promedio 1981 - 2010 (mm)													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual	Mensual
Las Brisas	85,8	80,8	121,4	183,9	196,6	110,0	83,8	76,9	134,1	198,6	174,1	99,8	1545,80	128,82
La Esperanza	68,4	70,3	112,2	175,7	194,7	131,0	108,9	90,8	139,3	189,1	169,6	101,7	1551,70	129,31
Papayal	116,5	118,5	158,8	215,9	224,3	152,0	100,9	95,7	158,2	244,1	230,9	140,7	1956,50	163,04
Aeropuerto La Nubia	105,1	96,6	133,9	178,9	161,9	110,8	69,2	72,5	135,2	204,0	173,9	123,3	1565,30	130,44

Fuente: Elaboración propia a partir de (Convenio Corpocaldas - ASOCARS - U.N. IDEA, 2014).

Tabla 6. Rangos de PPT total anual y de intensidad de lluvia para definir las características climáticas de Villamaría-Caldas, normal climatológica 1991-2020.

Estación	Precipitación promedio 1991 - 2020 (mm)													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual	Mensual
La Esperanza	70.8	69.0	118.7	164.7	182.9	119.9	104.6	90.4	118.6	175.4	173.0	99.1	1487.15	123.93
Papayal	104.8	129.7	183.5	220.2	209.9	133.7	96.8	84.3	131.2	220.9	251.7	143.4	1910.20	159.18
Aeropuerto La Nubia	98.6	100.4	155.3	191.8	166.8	103.9	69.9	71.0	130.6	204.3	196.6	122.2	1611.30	134.28

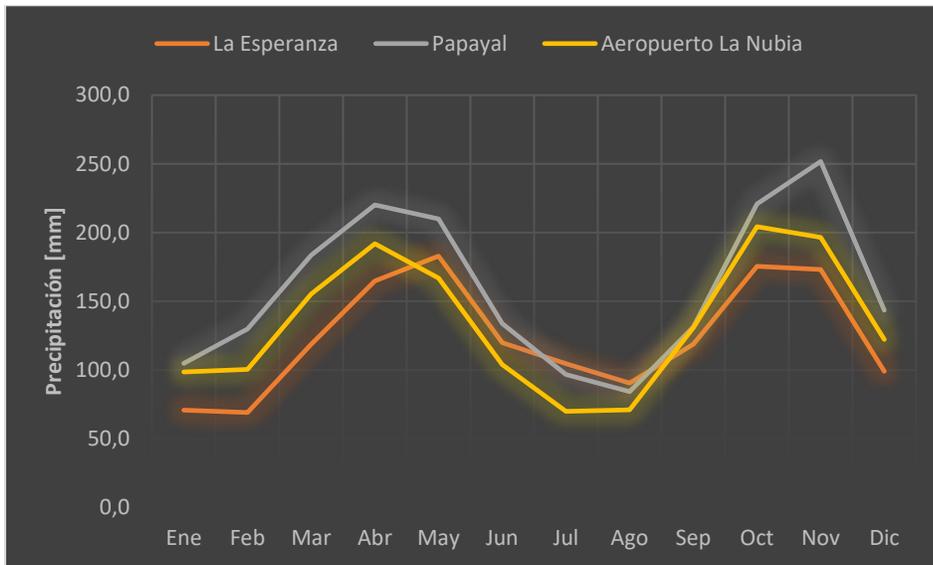
Fuente: Elaboración propia a partir de IDEAM (2023).

Del análisis de las precipitaciones anuales, comparando los datos de las normales climatológicas 1971-2000, 1981-2010 y 1991-2020 de las estaciones utilizadas, de acuerdo a la normal 1991-2020 se pudo corroborar que, en las zonas más bajas en relación con el nivel del mar (estación Aeropuerto La Nubia), la PPT aumentó, mientras que en las zonas altas la PPT

disminuyó (estación La Esperanza), demostrando de esta forma la influencia que tiene el CC en la PPT del municipio.

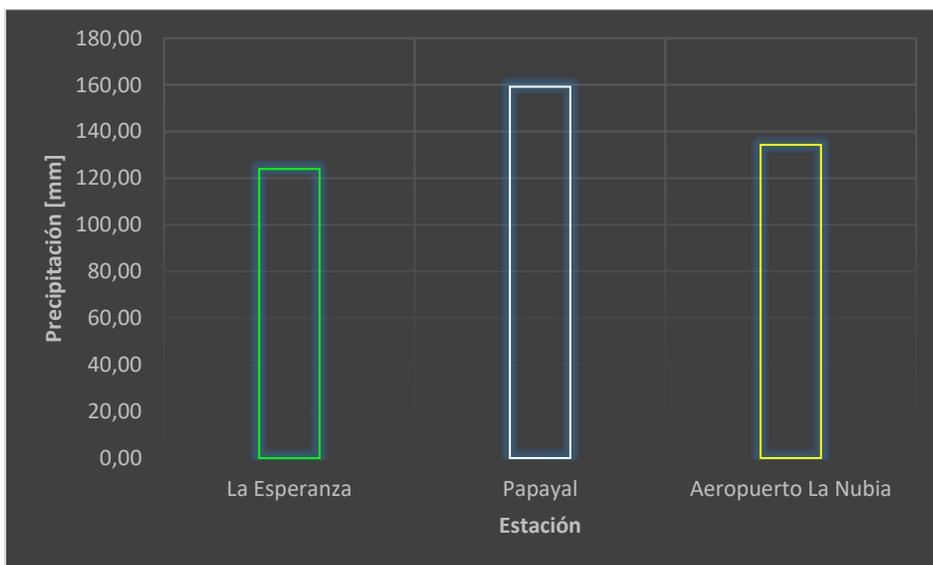
Igualmente, a partir de las series de PPT se definió el comportamiento promedio de la PPT mensual y anual en las diferentes estaciones, la lluvia sigue un comportamiento estacional bimodal típico, presentando en los meses de abril-mayo y octubre-noviembre altos valores (Figura 9).

Figura 9. Comportamiento estacional de la lluvia mensual 1991-2020.



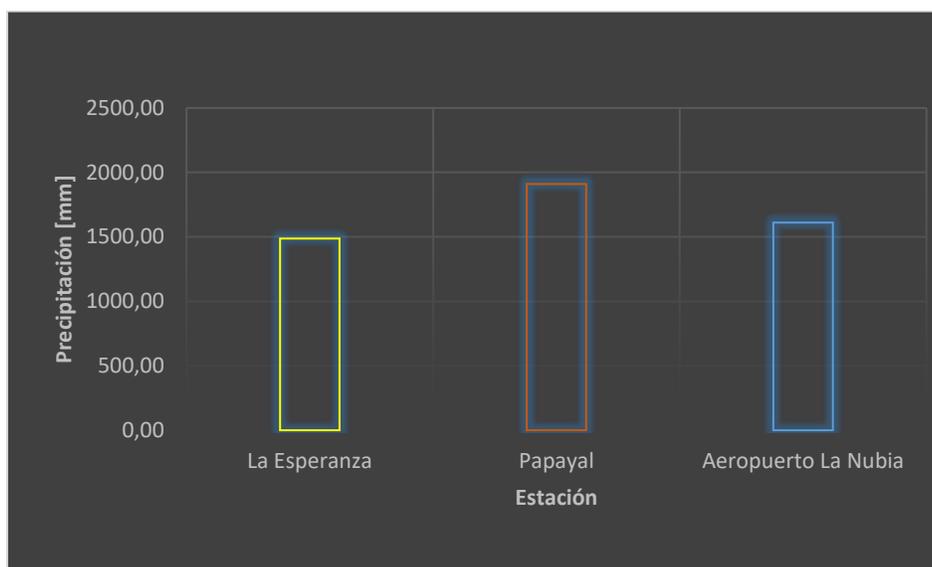
Fuente: Elaboración propia a partir de IDEAM (2023).

Figura 10. PPT media mensual 1991-2020.



Fuente: Elaboración propia a partir de IDEAM (2023).

Figura 11. PPT media anual 1991-2020.



Fuente: Elaboración propia a partir de IDEAM (2023).

Tomando como base las estaciones con información de más 30 años, el comportamiento promedio de la PPT mensual y anual en las diferentes estaciones se resumen en la Figura 10 y Figura 11, donde se puede observar que la estación Papayal ubicada a una altura de 2.304 msnm es la estación que tiene un registro mayor de PPT media mensual y anual con valores de 163,04 y 1.956,5 mm respectivamente, que corresponde a la zona media de la cuenca caracterizada por tener un clima frío húmedo y muy húmedo.

6.1.6.1.1 *Lluvia acumulada antecedente*

Esta es una variable que se relaciona directamente con las condiciones meteorológicas y es uno de los factores que inciden en la HUMD en el suelo, su valor se obtiene a partir de la cantidad de lluvia en los días precedentes a un evento. Al inicio de los eventos de lluvia las condiciones no saturadas del suelo son las que dominan, y con valores de lluvia antecedente bajo también están presentes dichas condiciones, y es allí cuando pueden ocurrir DESL por reducción de la succión. Las condiciones saturadas se presentan después de cortos periodos de lluvia y controlan la ocurrencia de DESL superficiales (Aristizábal Giraldo, Vélez Upegui, & Martínez Carvajal, 2016). Un evento de lluvia fuerte propicia un incremento del nivel freático colgado, aumentando las presiones de poros positivas reduciendo las condiciones de estabilidad de las laderas. Igualmente se puede presentar una saturación del suelo lo que conlleva a un incremento del agua de precipitación que discurre por la superficie del terreno y por consecuente esas aguas, llamadas de escorrentía superficial, llegan a los cauces aumentando el nivel de los mismos llevando a que se presenten eventos de INU.

Para la ZDE lluvias diarias que superen los 70 mm detonan movimientos superficiales, y valores de lluvia antecedente de superior a 200 mm en 25 días generan movimientos profundos, Van Westen et al. (1994) y Terlien (1997) en (Aristizábal, Martínez, & Vélez, 2010). En el

departamento de Antioquia, los umbrales para lluvia antecedente de 15 y precedente de 3 días son 150 mm y 75 mm respectivamente Moreno et al. (2006) en (Aristizábal, Martínez, & Vélez, 2010). Para la ciudad de Bucaramanga los umbrales críticos de lluvia acumulada son de 150 mm para 15 días, y 55 mm para lluvias antecedentes de las 24 horas y magnitudes de 120 mm para un solo evento (Aristizábal, Martínez, & Vélez, 2010). Los anteriores datos se presentan en la

Tabla 7, la diferencia de los umbrales propuestos en Antioquia y Bucaramanga respecto a los de Manizales, se debe a la localización geográfica la cual se puede relacionar directamente con características climáticas predominantes de las zonas y con los factores y procesos físicos que se presentan espacial y temporalmente (Arango, 2000).

Tabla 7. Comparación de los umbrales propuestos.

Ubicación	Umbrales propuestos			
	Lluvia diaria (mm)	Lluvia acumulada antecedente 3 días (mm)	Lluvia acumulada antecedente 15 días (mm)	Lluvia acumulada antecedente 25 días (mm)
Manizales	70	--	--	200
Antioquia		75	150	--
Bucaramanga	120	--	150	--

Fuente: Elaboración propia, 2024.

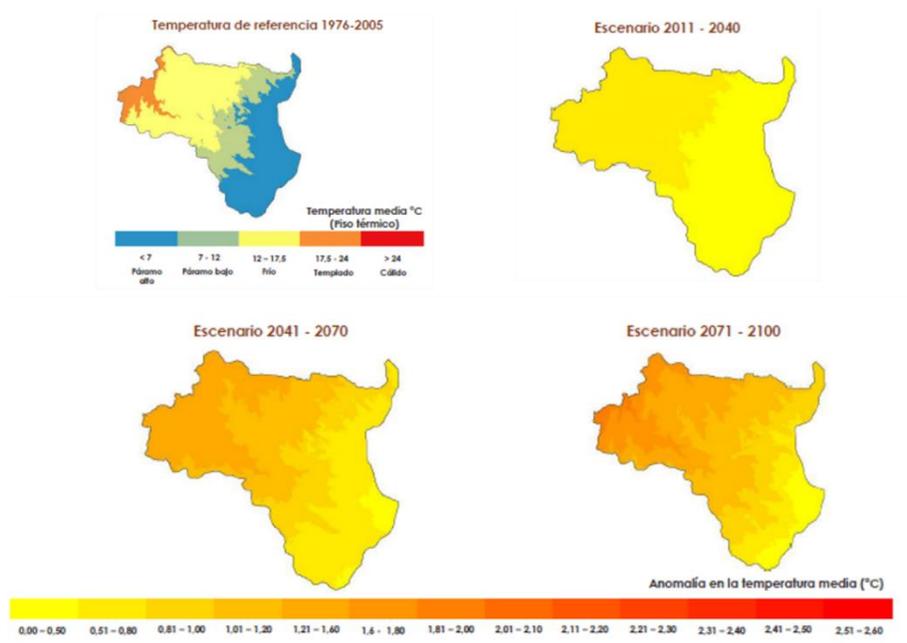
6.1.6.1 Proyecciones de cambio climático

Teniendo en cuenta las proyecciones de CC contemplados en la Agenda Climática Municipal, para el período 2011–2040, se presentará incremento de la TEMP hasta 0,8 °C significando un cambio bajo medio, como puede ser evidenciado en la

Figura 12, donde igualmente se presentan los horizontes de CC para los periodos 2041-2070 y 2071-2100, los cuales presentaran incrementos de TEMP hasta 1,6 °C que representan un cambio medio alto al 2070 y aumentos hasta 2,1 °C que sugieren un cambio alto para el horizonte 2100. Con relación a las lluvias, en la Figura 13, se puede evidenciar que el porcentaje de aumento máximo de PPT varía en rangos entre el 9-40%, en el municipio de Villamaría, se prevé un incremento de la PPT superior al 40%. Finalmente, el incremento en la duración de meses de sequía para el escenario 2017–2050 oscila entre 4 y 5 meses y su magnitud será extremadamente fuerte (Corpocaldas, Universidad Autónoma de Manizales, 2019). Para el municipio de Villamaría, de acuerdo con lo anterior, se estiman altos incrementos de TEMP en el occidente, con

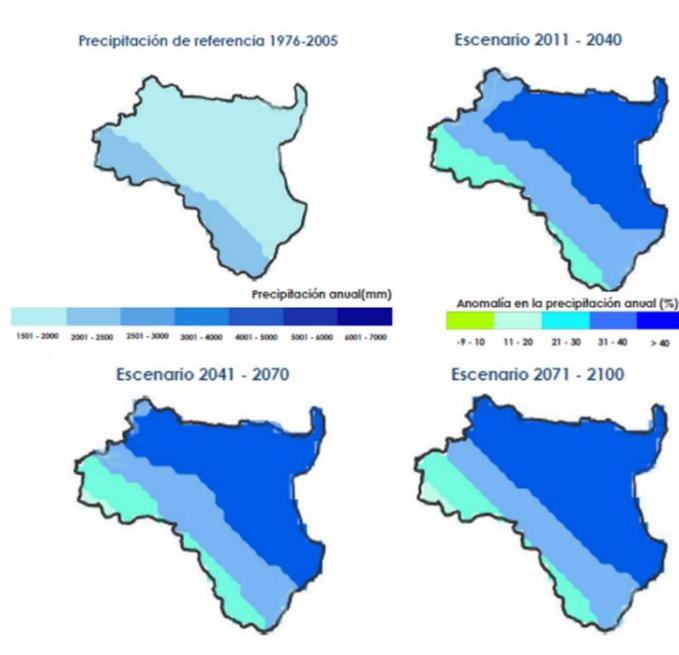
variaciones de 0,5 a 0,8 °C, por otro lado, la PPT se podrá incrementar en el nororiente en valores que superen el 40%.

Figura 12. Escenario de cambio en la TEMP, municipio de Villamaría (Caldas).



Fuente: Tomado de Agendas de Cambio Climático, Villamaría – Caldas (Corpocaldas, Universidad Autónoma de Manizales, 2019).

Figura 13. Escenario de cambio en la PPT, municipio de Villamaría (Caldas).



Fuente: Tomado de Agendas de Cambio Climático, Villamaría - Caldas (Corpocaldas, Universidad Autónoma de Manizales, 2019).

Es importante tener en cuenta la necesidad de incorporar las proyecciones realizadas en torno al CC y los diferentes escenarios esperados, dado que dichas proyecciones dan cuenta de un probable aumento en la ocurrencia de fenómenos amenazantes como MM y AVT producto del aumento en las precipitaciones, detonante principal de estos escenarios, es por esto que dichas proyecciones se deben constituir en un insumo base dentro del proceso de incorporación de la GRD y el CC como determinantes en un modelo de ocupación territorial sostenible.

6.1.7 Histórico de eventos

Para recopilar la información histórica de eventos por fenómenos amenazantes de origen natural y socio-natural que se han presentado en el municipio de Villamaría, se obtuvo información de la plataforma DesInventar³, de la plataforma SIMMA del Servicio Geológico Colombiano⁴ y del consolidado de emergencias de la UNGRD⁵. Allí se identificaron los eventos relacionados con MM, INU y AVT que se han presentado en el territorio, se obtuvo información del tipo de evento, fecha y algunos reportaban la causa del mismo, fuente y comentarios los cuales se consolidaron en la Tabla 8. Igualmente, se hizo una correlación de la fecha en la que se registró el evento con el registro de la PPT de las estaciones del IDEAM que se encuentran en el territorio, se tuvo en cuenta los datos de PPT diaria, un acumulado de 15 días (A15) y 25 días (A25) antecedentes y el promedio de PPT del mes en que se reportó el evento, para de esta forma tratar

³ Página web, <https://www.desinventar.org/>

⁴ Página web, <https://simma.sgc.gov.co/#/>

⁵ Obtenido de <https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Consolidado-Atencion-de-Emergencias.aspx>

de identificar si los eventos fueron desencadenados por lluvias y determinar de forma empírica que cantidad de PPT detonan estos eventos y si pueden ser asociados con lluvias atípicas.

Tabla 8. Consolidado de eventos presentados en el municipio de Villamaría, Caldas. Registro desde 1927 al 2022.

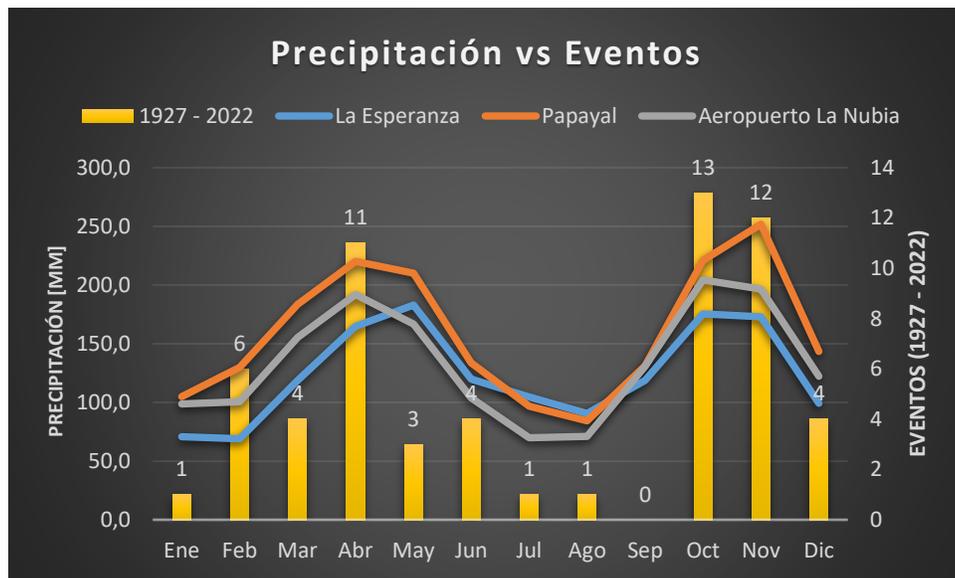
Id	Evento	Fecha	Causa	Fuente	Comentario
1	Movimiento en masa	23/10/2022	Lluvia	UNGRD	Por fuertes lluvias y sobresaturación del suelo con deslizamientos de material,
2	Movimiento en masa	25/04/2022		UNGRD	
3	Movimiento en masa	19/04/2019		UNGRD	Afectada vereda gallinazo, parque natural de los nevados con 4 deslizamientos por creciente súbita
4	Deslizamiento	17/04/2018		SIMMA-SGC	Catálogo. Base del deslizamiento vía panamericana
5	Deslizamiento	1/04/2018	Lluvia	UNGRD	Municipio: Villamaría, zona urbana y rural, evento: deslizamientos, acompañado de fuertes lluvias
6	Inundación	18/08/2017	Desconocida	UNGRD	
7	Deslizamiento	23/04/2017	Desconocida	UNGRD	"CDGRD de Caldas y PONALSAR informan: verificación de viviendas afectadas por deslizamiento en compañía del señor gobernador y la UDEGER Caldas en el municipio de Villamaría - Caldas; sector El Palmar. Se evacuaron las dos viviendas que se vieron afectadas (DesInventar, 2023)".
8	Deslizamiento	19/04/2017	Lluvia	UNGRD	"El día martes 18 de abril de 2017 y hasta la madrugada del día 19 de abril; se presentaron fuertes lluvias en el municipio de Villamaría y la vecina ciudad de Manizales; las cuales ocasionaron afectaciones por movimiento en masa en diferentes taludes en zonas críticas y de riesgo; inundaciones; aumento en el cauce de los ríos y quebrada; taponamiento de la quebrada La María en el sector denominado Los Molinos; amenazas en la infraestructura vial; las estructura de las viviendas y sobre la población en general; en el área urbana y rural del municipio de Villamaría. Afectación en la zona urbana; barrios; El Palmar; Molinos; Santa Ana; Nuevos Horizontes; Gaitán 2; Turín; y en las veredas; vías terciarias de las veredas Gallinazo-Molinos; Marina; Bajo Arroyo - Llanitos; quebrada San Julián - Primavera y Soledad. Afectación en los barrios; El Palmar; Molinos; Tejares; Gallinazo; Santa Ana; Polideportivo y finca La Coca; 17 viviendas averiadas y una destruida (DesInventar, 2023)".
9	Deslizamiento	12/03/2017	Lluvia	SIMMA-SGC	Catálogo. Turín, Alto del Portón
10	Deslizamiento	18/04/2015	Desconocida	UNGRD	"Socorro Nacional y Ministerio de Salud y Protección Social; informan; se presentó deslizamiento en el municipio de Villamaría; sector. La Coca; barrio: Jorge Eliecer Gaitán; 1 vivienda destruida; 4 lesionados; remitidos al hospital (DesInventar, 2023)".
11	Avenida torrencial	7/04/2015	Desbordamiento	UNGRD	"La quebrada Cimitarra presentó creciente súbita; sector: gallinazo; se reportó un desaparecido de 20 años de edad; cuyo cuerpo fue hallado 4 km más abajo del lugar donde se reportó la desaparición; se está realizando la inspección del cuerpo para determinar la identidad de la víctima. Los organismos de socorro continúan el monitoreo en las fuentes de agua y diferentes zonas de la ciudad debido a que algunos derrumbes amenazan con nuevos represamientos de algunas quebradas (DesInventar, 2023)".
12	Deslizamiento	11/12/2014	Desconocida	UNGRD	
13	Deslizamiento	3/02/2013	Desconocida	UNGRD	Consejo Departamental de Caldas; reporte emergencia presentada en la vereda de Villamaría - Caldas donde hay un deslizamiento en la Bocatoma lo cual dejó a toda esta vereda sin agua potable.
14	Deslizamiento	1/10/2012	Desconocida	SIMMA-SGC	Inventario. Vereda El Pindo

15	Deslizamiento	7/07/2012	Desconocida	SIMMA-SGC	Catálogo
16	Deslizamiento	3/05/2012	Desconocida	SIMMA-SGC	Catálogo
17	Deslizamiento	18/04/2012	Desconocida	SIMMA-SGC	Catálogo
18	Deslizamiento	12/04/2012	Desconocida	SIMMA-SGC	Catálogo
19	Deslizamiento	10/02/2012	Desconocida	SIMMA-SGC	Catálogo
20	Deslizamiento	6/02/2012	Desconocida	SIMMA-SGC	Catálogo
21	Deslizamiento	11/11/2011	Desconocida	SIMMA-SGC	Catálogo
22	Deslizamiento	16/10/2011	Desconocida	DGR	"Se presentó deslizamiento en la vereda San Julián; no hay personas heridas ni desaparecidas reporte CREPAD Caldas (DesInventar, 2023)".
23	Inundación	12/01/2011	Desconocida	DGR	
24	Deslizamiento	2/12/2010	Lluvia	El Tiempo 2010-12-08 P. 5	
25	Deslizamiento	8/11/2010	Desconocida	SIMMA-SGC	Catálogo
26	Deslizamiento	28/10/2010	Desconocida	SIMMA-SGC	Catálogo
27	Inundación	28/10/2010	Desbordamiento	DGR	Creciente de la quebrada El Fraile (Molinos)
28	Deslizamiento	8/10/2010	Desconocida	SIMMA-SGC	Catálogo
29	Caída	1/06/2010	Desconocida	SIMMA-SGC	Inventario. Villamaría
30	Deslizamiento	4/11/2009	Desconocida	DGR	Reporte de Cruz Roja
31	Caída	1/10/2009	Desconocida	SIMMA-SGC	Inventario. Vereda Gallinazo
32	Deslizamiento	1/10/2009	Desconocida	SIMMA-SGC	Inventario. Villamaría
33	Inundación	1/12/2008	Otra	DGR	
34	Deslizamiento	1/11/2007	Desconocida	UNGRD	
35	Deslizamiento	16/10/2006	Desconocida	DPAD	Reporte de La Defensa Civil
36	Deslizamiento	23/10/2005	Desconocida	SIMMA-SGC	Catálogo
37	Deslizamiento	10/06/2005	Lluvia	DPAD-EL TIEMPO	Vereda La Floresta, sitio El Descache. Afecta vía Villamaría - Llanitos. 10 familias afectadas. EL TIEMPO: Deslizamiento en Villamaría (Caldas) destruye vivienda y mueren sus dos habitantes.
38	Deslizamiento	26/04/2004	Desconocida	DPAD	Deslizamiento sobre la quebrada Los Cuervos
39	Deslizamiento	28/10/2003	Lluvia	DPAD-EL TIEMPO 2003/10/30	Evacuadas 20 familias
40	Inundación	19/03/2003	Lluvia	DPAD-EL TIEMPO 2003- 03-20	Afectados sectores de Tejares, San Diego, La Pradera, Jorge Eliecer Gaitán, Santa Ana, Altos de Monserrate, Polideportivo y La Floresta.
41	Deslizamiento	14/12/1988	Lluvia	ING.	
42	Deslizamiento	21/11/1988	Lluvia	BDOD-60606	
43	Deslizamiento	20/11/1988	Lluvia	EL TIEMPO 1988-11-22 P.9A	Un enorme deslizamiento sacó de la vía a un campero y sepultó a un ciclista y dos motocicletas uno de las cuales transportaba a dos menores en la parrilla; taponó la carretera panamericana que comunica a Manizales con Villamaría.
44	Deslizamiento	14/11/1988	Lluvia	EL TIEMPO 1988-11-15 P.14A	Los daños en el sistema vía departamental ascienden a unos \$700 millones sin incluir las carreteras de penetración que son muchas.
45	Deslizamiento	15/10/1986	Lluvia	ING.	
46	Deslizamiento	31/10/1985	Desconocida	ING.	
47	Avenida torrencial	8/11/1984	Lluvia	ING.	

48	Deslizamiento	1/11/1984	Lluvia	EL TIEMPO 1984-11-03	Interrumpido por derrumbes el puente La Libertad-Termaleles en los Km 224 y 226.
49	Deslizamiento	5/06/1984	Lluvia	EL TIEMPO 1984-06-06	Dos personas murieron al ser atrapadas por un derrumbe en la carretera.
50	Deslizamiento	8/06/1981	Lluvia	EL TIEMPO 1981-06-10(mie)	Las fuertes lluvias causaron 10 deslizamientos en la carretera La Libertad(Risaralda) y Termaleles(Caldas)
51	Deslizamiento	15/02/1975	Desconocida	ING.	
52	Deslizamiento	15/03/1974	Desconocida	ING.	
53	Deslizamiento	20/11/1971	Desconocida	ING.	
54	Deslizamiento	3/02/1971	Lluvia	ING.	
55	Deslizamiento	12/11/1965	Otra	ING.	
56	Deslizamiento	15/03/1955	Otra	ING.	
57	Deslizamiento	17/11/1953	Otra	ING.	
58	Deslizamiento	15/05/1927	Otra	ING.	
59	Deslizamiento	5/05/1927	Otra	ING.	
60	Deslizamiento	4/02/1927	Otra	ING.	

Fuente: Elaboración propia a partir de información de DesInventar, SIMMA y SGC (2023).

Figura 14. Relación entre la PPT media mensual y los eventos ocurridos en el periodo 1927-2022 en el municipio de Villamaría, Caldas.



Fuente: Elaboración propia a partir de IDEAM, DesInventar, SIMMA y SGC (2023).

En la

Figura 14, se presenta el comportamiento estacional bimodal típico, donde los dos periodos lluviosos anuales de la zona corresponden a los trimestres de marzo-abril-mayo (MAM) y septiembre-octubre-noviembre (SON), los cuales influyen de manera directa en el promedio de eventos ocurridos cada mes. De esta figura se destaca que, para el periodo lluvioso comprendido entre octubre y noviembre, se presenta una mayor cantidad de eventos en comparación con los presentados en el primer periodo lluvioso del año, en el cual el mes de abril es el que reporta mayor número de eventos, así mismo estos periodos son críticos por saturación de los suelos, lo que provoca encharcamientos e inundaciones en las áreas que son geomorfológicamente más susceptibles a los excesos de agua.

Tabla 9. Eventos presentados en el municipio de Villamaría, Caldas, relacionados con el registro de las precipitaciones de las estaciones IDEAM que se encuentran en el territorio.

Id	Evento	Fecha	Causa	Precipitación (mm)															
				E. Las Brisas				E. La Esperanza				E. Papayal				E. Aeropuerto La Nubia			
				Día	A15	A25	Mensual	Día	A15	A25	Mensual	Día	A15	A25	Mensual	Día	A15	A25	Mensual
1	Movimiento en masa	23/10/2022	Lluvia	-	-	-	-	4	89	154	210	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Movimiento en masa	25/04/2022		4.8	228.4	325.7	349	7	146	232	239	0	165.9	223.5	239.8	4.2	128.5	185.3	208
3	Movimiento en masa	19/04/2019		6.5	64.3	116.9	156.3	13	105	141	164	6.9	85.3	158.4	240.6	17.8	173	284.5	306.3
4	Deslizamiento	17/04/2018		1.1	88	227.9	178.4	0	94	235	154	2.5	118.7	334.8	183.1	1.3	168	266	223
5	Deslizamiento	1/04/2018	Lluvia	8.5	141.9	143.2		11	155	156		0	218.6	283.9		11.5	168.3	179.7	
6	Inundación	18/08/2017	Desconocida	-	-	-	-	24	35	35	114	32.5	14.5	23.8	60.7	19	26.1	29.7	71.4
7	Deslizamiento	23/04/2017	Desconocida	0.4	98.9	141.1	157.4	0	59	108	109	0	61.4	73.7	168.9	12	156	170.9	236.7
8	Deslizamiento	19/04/2017	Lluvia	7.8	69.8	135.1		5	38	109		2	55.4	87		6.2	149.1	174.6	
9	Deslizamiento	12/03/2017	Lluvia	28.2	96.8	123.3	293	4	83	107	235	2	144.9	144.9	259.8	0.2	148.5	171.1	230.2
10	Deslizamiento	18/04/2015	Desconocida	7.4	86.8	115	123	1	24	33	29	7	110	195	200	0.2	129.3	178.9	146.7
11	Avenida torrencial	7/04/2015	Desbordamiento	1.6	52.8	100.1		0	17	43		9	133	151		7.6	86.3	189.7	
12	Deslizamiento	11/12/2014	Desconocida	12.6	95.4	123	115.1	2	51	59	57	5	159	236	161	0.2	141.5	182.3	158.7
13	Deslizamiento	3/02/2013	Desconocida	1.5	21.1	39.1	111.9	2	29	60	54	0	93	123	336	7	71	96.1	186.8
14	Deslizamiento	1/10/2012	Desconocida	0.4	68.6	71.5	322.8	1	39	39	156	11	30	45	324	1	37.5	41.5	312.1
15	Deslizamiento	7/07/2012	Desconocida	0.5	29.3	88.5	90.9	1	8	48	46	0	0	0	35	1.7	24.6	68.3	49.2
16	Deslizamiento	3/05/2012	Desconocida	3.6	118.5	232.6	167.7	0	71	161	146	10	164	342	146	1.9	140.3	255.3	141.9
17	Deslizamiento	18/04/2012	Desconocida	7	155.7	182.7	227.1	2	141	155	192	22	232	272	366	34.6	174.5	211.6	284.8
18	Deslizamiento	12/04/2012	Desconocida	12.5	110.1	174.6		9	106	137		20	149	253		2.5	165.7	255.1	
19	Deslizamiento	10/02/2012	Desconocida	0.6	50.6	114	59.4	0	64	139	75	0	61	126	28	5.5	18.8	67.2	61.6
20	Deslizamiento	6/02/2012	Desconocida	21.7	35.2	89.6		21	53	114		4	47	112		1.5	22.9	65	
21	Deslizamiento	11/11/2011	Desconocida	9.5	86.1	132.1	280.3	1	118	168	328	30	163	257	409	23	93	158.7	319.9
22	Deslizamiento	16/10/2011	Desconocida	8.4	201.4	222.3	291.7	8	169	179	256	50	166	202	380	20	205.2	250.1	334.9
23	Inundación	12/01/2011	Desconocida	0	42.6	89.3	92	0	44	68	51	45	50	119	130	0	48.1	72.5	62.9
24	Deslizamiento	2/12/2010	Lluvia	-	-	-	-	20	128	285	148	20	193	432	192	21.3	132.6	232.3	144.9
25	Deslizamiento	8/11/2010	Desconocida	-	-	-	-	12	154	217	309	20	235	359	500	0	168	220.9	281
26	Deslizamiento	28/10/2010	Desconocida	-	-	-	-	6	79	156	230	10	189	236	328	37	94.9	150.5	250.3
27	Inundación	28/10/2010	Desbordamiento	-	-	-	-												
28	Deslizamiento	8/10/2010	Desconocida	-	-	-	-	11	116	166		0	144	225		8.2	128.6	202.2	
29	Caída	1/06/2010	Desconocida	-	-	-	-	6	187	223	215	15	128	233	273	4.3	79.4	90.9	208.1

30	Deslizamiento	4/11/2009	Desconocida	7.1	91	157.1	151.5	12	97	166	149	22	137	241	240	14	197.8	303.7	192.9
31	<i>Cáida</i>	1/10/2009	Desconocida	0.1	15.2	36.5	176	0	12	37	126	0	30	46	204	0	26.4	81.9	269.6
32	<i>Deslizamiento</i>	1/10/2009	Desconocida																
33	Inundación	1/12/2008	Otra	1.5	128.3	194.9	108.6	1	122	231	115	0	145	279	201	17	109	306.2	201.7
34	Deslizamiento	1/11/2007	Desconocida	17.6	178.7	241.7	114.4	22	156	219	111	13	221	376	228	10.7	181.6	276.2	160.1
35	<i>Deslizamiento</i>	16/10/2006	Desconocida	4.4	57.1	87.4	140.4	5	79	92	192	2	79	100	173	0.7	81.8	101.3	186.3
36	Deslizamiento	23/10/2005	Desconocida	25.5	118.5	186.3	263.2	40	144	176	278	7	225	286	367	28.3	200.7	255.7	343.5
37	Deslizamiento	10/06/2005	Lluvia	0	85.3	163.1	140.4	8	86	170	117	-	-	-	-	31.4	98.9	202.3	167.1
38	Deslizamiento	26/04/2004	Desconocida	-	-	-	-	3	80	156	171	-	-	-	-	0.2	151	203.2	212
39	Deslizamiento	28/10/2003	Lluvia	22	103.7	185.1	228.6	31	110	203	296	58	115	204	314	71.3	111.9	176.8	293.4
40	Inundación	19/03/2003	Lluvia	1.2	73.5	92.9	148.5	2	78	106	169	6	146	186	250	11.2	163.9	213	232.4
41	<i>Deslizamiento</i>	14/12/1988	Lluvia	0	70	115.8	154.8	4	88	178	125	0	85	156	124	0.9	93	143.7	132.7
42	Deslizamiento	21/11/1988	Lluvia	4	145.5	210	201.1	5	174	210	260	21	198	269	296	0	79.8	135.8	122.1
43	Deslizamiento	20/11/1988	Lluvia	19	131.3	191		20	154	190		22	206	247		10	74.7	137.3	
44	Deslizamiento	14/11/1988	Lluvia	18.5	104	149.1		26	50	102		23	102	139		0	61	89.9	
45	Deslizamiento	15/10/1986	Lluvia	6	91.7	148.6		170.9	5	126		183	195	25		143	213	262	
46	Deslizamiento	31/10/1985	Desconocida	0	100.7	144.5	169.6	6	61	71	88	0	366	418	440	0	226.5	266.7	292.8
47	Avenida torrencial	8/11/1984	Lluvia	1	152.9	223.4	142.4	0	134	159	127	0	254	351	295	0.1	221.1	280.4	176.1
48	Deslizamiento	1/11/1984	Lluvia	8.1	151.7	190.8		16	95	136		13	202	296		17.5	187.2	215.1	
49	Deslizamiento	5/06/1984	Lluvia	0	133.8	224.4	136.4	6	82	169	116	7	184	241	295	0.7	112.9	197.3	122
50	Deslizamiento	8/06/1981	Lluvia	-	-	-	-	31	127	188	187	17	163	322	315	20.9	133.9	198.6	150.7
51	<i>Deslizamiento</i>	15/02/1975	Desconocida	-	-	-	-	0	55	79	228	2	137	169	244	2.2	85.5	106.4	194.2
52	Deslizamiento	15/03/1974	Desconocida	-	-	-	-	11	145	184	227	0	250	287	375	7.6	219.3	247.8	347.2
53	Deslizamiento	20/11/1971	Desconocida	-	-	-	-	14	179	317	346	19	96	206	223	42	171	233.8	268.8
54	<i>Deslizamiento</i>	3/02/1971	Lluvia	-	-	-	-	3	107	148	134	18	25	98	174	18.2	76.2	167.7	201.3
55	Deslizamiento	12/11/1965	Otra	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
56	Deslizamiento	15/03/1955	Otra	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57	Deslizamiento	17/11/1953	Otra	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	Deslizamiento	15/05/1927	Otra	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	Deslizamiento	5/05/1927	Otra	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	Deslizamiento	4/02/1927	Otra	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia a partir de información de DesInventar, SIMMA, SGC e IDEAM (2023).

En la Tabla 9 se presenta la correlación del dato cronológico del evento con el registro de la PPT de las estaciones del IDEAM que se encuentran en el territorio, aquí se tuvieron en cuenta los datos de PPT diaria, la lluvia acumulada antecedente para 15 días (A15) y para 25 días (A25), así como el promedio de PPT del mes en que se reportó el evento, las convenciones utilizadas se explican en la Tabla 10.

Tabla 10. Convenciones utilizadas

CONVENCIONES	
A15	Indicador lluvia antecedente de 15 días
A25	Indicador lluvia antecedente de 25 días
	Resalta la lluvia máxima diaria por encima de 20 mm
NIVELES DE ALERTA	
	RANGO
	200 mm \leq A25 < 300 mm
	300 mm \leq A25 < 400 mm
	A25 \geq 400 mm

Fuente: Elaboración propia a partir de Sistema de Monitoreo Ambiental de Caldas - SIMAC (2023).

Teniendo en cuenta los parámetros del indicador de lluvia antecedente de 25 días (A25) que maneja el Sistema de Monitoreo Ambiental de Caldas - SIMAC para los cuales clasifican los niveles de alerta por DESL en Manizales en tres categorías donde el nivel de alerta amarilla o baja se da para valores de A25 mayores e igual a 200 mm y menores a 300 mm, el nivel naranja o media para valores de A25 mayores e igual a 300 mm y menores a 400 mm, y el nivel rojo o alta para valores mayores o igual a 400 mm; al igual que la información obtenidas en los estudios que realizaron Van Westen et al. (1994) y Terlien (1997) en la ciudad de Manizales y en la cuenca del río Chinchiná, en donde determinaron que lluvias acumuladas antecedentes en 25 días sobre 200 mm detonan MM profundos. También se tuvo en cuenta la información aportada por Moreno et al. (2006) quienes estudiaron la relación entre la lluvia y los MM para el departamento de Antioquia, donde propusieron que las lluvias antecedentes de 15 días con valores de 150 mm serian detonantes de MM, y Suarez (2008) a partir de un árbol de decisiones propone que en la ciudad de Bucaramanga lluvias acumuladas para 15 días de 150 mm serian consideradas como el umbral crítico que detona MM.

De acuerdo a lo anterior, para el municipio de Villamaría se pueden adoptar como umbrales críticos de lluvia, las lluvias acumuladas antecedentes de 25 días (A25) con valores sobre 200 mm y para las lluvias acumuladas de 15 días (A15) con valores de 150 mm. Estos umbrales pueden ser corroborados en la Tabla 9 en donde se correlacionan los eventos ocurridos en el municipio de Villamaría para el periodo 1971-2022 con el registro de la PPT de las estaciones del IDEAM que se encuentran en el territorio, allí se puede observar que la mayoría de los eventos se presentan cuando las lluvias acumuladas antecedentes superan los valores de referencia adoptados, los eventos se presentan para valores de A25 superiores a 200 mm y para valores de A15 superiores a 150 mm.

Del análisis anterior cabe destacar que los eventos considerados se presumen que fueron detonados por lluvia, sin embargo, otros elementos, principalmente el antrópico que puede estar relacionado con prácticas agrícolas, la deforestación, sobrecargas del terreno, construcción de reservorios, modificación de cauces y concentración de aguas (Salazar Gutiérrez, 2018), también

están asociados a su ocurrencia, como puede ser posible en algunos eventos en donde no se pudo establecer la correlación con los datos de PPT. Igualmente, la lluvia acumulada evaluada para cada evento corresponde a una aproximación que no constituye de manera precisa la acumulación real de lluvia antecedente que detono el evento, dado que esta lluvia acumulada es un valor de la PPT en la localización de la estación hidrometeorológica más no es el valor de PPT en el punto del evento.

Tabla 11. Caracterización del municipio de Villamaría (Caldas).

Ítem	Descripción
Ubicación	Región andina, a los 5°3'0,0" de Latitud Norte, y a los 75°31'1,0" de Longitud Oeste.
Rango de alturas	De 1.000 msnm a 5.320 msnm
Geología	Rocas metasedimentarias, metamórficas, ígneas y flujos andesíticos, depósitos de flujos de escombros, caída piroclástica, aluviales y glaciales.
Geología Estructural	Sistema de fallas Palestina y Romeral, orientación general Norte-Sur.
Geomorfología	Ambientes morfogénicos Estructural, Denudacional, Glacial, Fluvial y Volcánico.
Cobertura de la tierra	Pastos 34,4% (pastos limpios), bosques 24% (bosque denso), áreas con vegetación herbácea y arbustiva 21,26 % (herbazal). El 20,34% territorios artificializados, territorios agrícolas, áreas húmedas y superficies de agua.
Pendientes	Abrupta 50,2% (19-40°); muy inclinada 25% (11-19°); inclinada 9,1% (7-11°); escarpada 8,4 % (>45°), y plana a suavemente inclinada 7,3% (0-7°).
Clima	Típicamente (ínter) tropical. Distribución bimodal de la lluvia. Mayores valores en abril, mayo, octubre, noviembre.
Precipitación	Promedio entre 2.000 y 2.200 mm/año. En la cuenca alta 600-800 mm/año. En la zona media 1.000 a 4.000 mm/año. Papayal ubicada a una altura de 2.304 msnm es la estación que tiene un registro mayor de PPT media mensual y anual con valores de 163,04 y 1.956,5 mm respectivamente.
Umbral	Lluvias diarias >70 mm. Lluvias antecedentes 15 días (A15) >150 mm. Lluvias antecedentes 25 días (A25) >200 mm.

Fuente: Elaboración propia, 2024.

En la Tabla 11 se muestra un consolidado de la caracterización del municipio de Villamaría, Caldas. Allí se presenta en resumen los parámetros y variables identificadas y que son de gran importancia en este documento para hacer una comparación con los estudios de caso seleccionados.

6.2 Casos relacionados

Con el fin de dar cumplimiento al objetivo específico 3 “Identificar casos relacionados con amenazas desencadenadas por lluvias que sean aplicables al estudio de caso”, en este apartado se presentan los resultados relacionados a dicho objetivo. Inicialmente se realiza la caracterización de los casos relacionados con el propósito de poder hacer la comparación con el EDC y posteriormente se analiza la información a partir de una matriz de comparación.

6.2.1 Cuenca del Río Mantaro - Perú

Perú, se encuentra localizado en la zona central de Sudamérica, limita al Noroeste con Ecuador, con Colombia por el noreste, al Sur con Chile, al Este con Brasil y limita con Bolivia al Sureste. El relieve topográfico del territorio peruano se destaca por poseer una gran cantidad de características físicas, debido a que se localiza entre una zona tropical y en la zona montañosa de

los andes, lo cual divide al país en tres regiones hidrográficas características, la región Pacífico que presenta en gran parte de su territorio un paisaje árido, la región Atlántico que se encuentra conformada por la amazonia y la región Titicaca. Lo anterior permite que en *“el territorio peruano se encuentren 28 de los 32 climas de mundo y 84 de las 103 zonas de vida presentes en el planeta (Ordoñez, 2020)”*.

Geográficamente en el territorio peruano se presentan las regiones de la Costa, Sierra y Amazónica. La Costa es una región que se caracteriza por ser una faja alargada de 3.080 km de longitud, con un ancho que variable entre los 15 km y los 180 km; presenta un relieve moderado, caracterizado por formas relacionadas con abanicos fluviales, dunas, terrazas marinas y depósitos de arenas eólicas, los cuales se encuentran alternados con pequeños cerros que forman parte de la región baja de la Cordillera de los Andes (CAND), el paisaje es muy árido el cual se encuentra atravesado por 53 ríos que provienen de la zona andina los cuales recorren la región costera de forma transversal desde el Este hacia el Oeste y que contribuyen a la formación de los fértiles valles costeros. La Sierra corresponde a la zona de la CAND, conformada por un conjunto de montañas escarpadas que atraviesa longitudinalmente el país de Sur a Norte, y que se encuentran espacialmente ubicadas entre la costa y la selva, esta región se caracteriza por presentar una geografía montañosa de cumbres prominentes y profundas gargantas, combinada con altiplanicies y valles interandinos estrechos.

En cuanto a la región Amazónica o Selva, la cual forma parte de la Hoya Amazónica, es de topografía predominantemente plana y se encuentra ubicada al Este de los Andes. La región se puede dividir en Selva Baja o Llano Amazónico y en Selva Alta o Ceja de Montaña. La Selva Baja o Llano Amazónico está cubierta de exuberante vegetación tropical y presenta escaso relieve, lo que la hace que las partes más bajas sean susceptibles a inundaciones periódicas. Por otro lado, las zonas boscosas ubicadas en la ladera oriental de los Andes hacen parte de la Selva Alta, esta presenta una topografía bastante accidentada donde es común encontrar cerros escarpados y boscosos, así como quebradas de lechos profundos.

De manera general, la geología de Perú se caracteriza por presentar rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, las cuales presentan edades que van desde el Precámbrico hasta el Terciario. Los depósitos más recientes corresponden a sedimentos blandos, de origen glaciar, aluvial, lacustre, eólico y marino, los cuales en su mayoría son incoherentes, se encuentran ampliamente distribuidos a lo largo de los Andes, en la llanura Amazónica y rellenando y cubriendo las planicies de las Costa, así como en la llanura.

Las rocas sedimentarias se encuentran fuertemente plegadas y falladas, y afloran a lo largo de los Andes, allí la dirección predominante de las estructuras es NW-SE. Las formaciones de la faja costanera y del llano amazónico son tectónicamente más estables, caso contrario ocurre con la cuenca terciaria la cual presenta un intenso fallamiento en bloques. Grandes masas intrusivas granitoides se alojan en las rocas sedimentarias deformadas de las cordilleras Occidental y Oriental (Bellido B, 1969).

Por otro lado, en Perú, la CAND ha sido modelada por la acción erosiva de grandes ríos generando cadenas montañosas que se encuentran separadas por valles longitudinales. Desde el punto de vista morfoestructural, se pueden distinguir varias unidades como la Llanura

Amazónica, Faja Subandina, Cordillera Oriental, Valles Interandino, Cuenca del Titicaca, Cordillera Occidental, Llanura Preandina, Cordillera de la Costa y la Franja de Conos Volcánicos. “La **Cordillera de la Costa** es una cadena de cerros de menos de 500 m de altitud que alcanzan los 1.200 msnm, litológicamente se constituyen por rocas del basamento cristalino del Proterozoico y paleozoicas, y además rocas volcano-sedimentarias jurásicas. La **Llanura Preandina** es una faja desértica angosta localizada a una altitud entre los 500 – 700 msnm con un ancho que varía entre los 20 km y 100 km, atravesada por ríos de carácter temporal, litológicamente está conformada por una cobertura de terrazas marinas, depósitos aluviales y acumulaciones eólicas, que se encuentran sobre rocas volcano-sedimentarias marinas de edad cretácea, intrusivos del Batolito de la Costa y secuencias marinas y continentales del Paleógeno-Neógeno. Los **Valles Interandinos**, se encuentran relacionados a valles longitudinales profundos controlados por fallas longitudinales que involucran al basamento cristalino Proterozoico, entre estos valles discurren varios ríos entre ellos el Mantaro, con curso de SE a NO entre las cordilleras Occidental y Oriental. La **Cordillera Oriental** representada por una topografía abrupta con valles que presentan flancos escarpados y estrechos, allí los cauces descienden por fuertes pendientes lo que genera caídas bruscas hacia los grandes ríos de la Llanura Amazónica. Litológicamente, se encuentra conformada por rocas pelitas paleozoicas que evidencian un epi-metamorfismo regional, al haber sido intruida por plutones cuya edad llega hasta el Permo-Triásico, los cuales han originado una aureola de metamorfismo termal. La **Cuenca del Titicaca** corresponde a una depresión tectónica ubicada al sudeste del Perú y oeste de Bolivia, corresponde a una gran cuenca que ha sido rellenada en la periferia con depósitos aluviales y lacustres, los cuales forman extensas llanuras. La parte interna la ocupa el lago Titicaca, cuyas aguas tienen una salida por el río Desaguadero hacia la cuenca Atlántica. La **Faja Subandina**, ubicada entre la Cordillera Oriental y la Llanura Amazónica, corresponde a una estrecha cadena de cerros y colinas que presentan alturas que van desde los 400 hasta los 1.000 msnm conformando las estribaciones orientales de los Andes. Litológicamente se encuentra en su mayoría constituida por rocas sedimentarias inconsolidadas de edad cretácica y capas rojas cenozoicas, las cuales han sido afectadas por sobre escurrimientos entre el Mioceno y el Pleistoceno. La **Llanura Amazónica**, corresponde a una extensa planicie de amplio desarrollo que se encuentra cubierta por una exuberante y densa vegetación selvática, la cual se encuentra surcada por grandes ríos meandriiformes. Litológicamente se encuentra conformada por sedimentos aluviales cuaternarios, que se encuentran extendidos a manera de una extensa sabana, cubriendo las capas rojas las cuales se encuentran suavemente plegadas y falladas debido al estilo estructural de bloques compresivos. La **Faja de Conos Volcánicos**, se refiere a una cadena de aparatos volcánicos que se encuentran sobre una superficie llana denominada Altiplano y que se extiende hasta Chile y Bolivia siguiendo el alineamiento de los Andes. Algunos aparatos volcánicos conservan su forma, entre los cuales se encuentran los volcanes activos que registran una etapa piroclástica como el Ampato, Sabancaya y otros en estado fumarólico como el Misti, Ubinas y Tutupaca. Otros han perdido su forma debido a la erosión glacial cuaternaria. Las lavas andesíticas y material piroclástico, de composición ácida representan el vulcanismo de la región el cual, según dataciones geocronométricas, habría iniciado en el Mioceno superior (7.2 Ma) y continúa intermitentemente hasta el presente (León Lecaros, Palacios Moncayo, Vargas Vilchez, & Sánchez Fernández, 2000)”.

Por su ubicación geográfica este país presenta diversos climas subtropicales y tropicales, gracias a dos factores que son: la CAND y las corrientes marinas del Humboldt y del Niño (MIDAGRI, 2024). De acuerdo a lo anterior las regiones climáticas en Perú corresponden a Costa norte (CON), Costa central (COC), Costa sur (COS), Sierra norte occidental (SNC), Sierra central occidental (SCC), Sierra sur occidental (SSC), Sierra norte oriental (SNR), Sierra central oriental

(SCR), Sierra sur oriental (SSR), Selva norte (SEN), Selva central alta (SCA), Selva central baja (SCB), Selva sur (SES) y Altiplano (ALT).

La CAND genera una barrera orográfica natural propiciando VC a lo largo de las tres regiones hidrográficas de Perú. Producto de esta barrera la HUMD de la atmosfera del Atlántico queda atrapada, generando en las tierras bajas amazónicas y en la región andino-amazónica suficiente PPT y en la costa poca PPT (Lavado Casimiro, Labat, Guyot, & Ardoin-Bardin, 2011). Las lluvias intensas en Perú se constituyen como el segundo fenómeno natural que afecta gran cantidad de personas, como fue mencionado previamente uno de los peligros asociados a este fenómeno son los MM (Millán, 2020). *“El periodo lluvioso ocurre entre septiembre y abril, las mayores PPT ocurren en los meses de verano, la intensidad de las lluvias dependerá exclusivamente del comportamiento del océano y la atmósfera en sus diferentes escalas. Los cauces de los ríos incrementan sus caudales provocando INU debido a la ocurrencia periódica de lluvias extraordinarias generadas por presencia del “Niño” u otras perturbaciones climáticas (CENEPRED, 2015)”*. Entre los años 2015 y 2017 debido a las precipitaciones intensas que se concentran en lapsos cortos de tiempo, se incrementaron significativamente los MM e INU (Cuya, 2017).

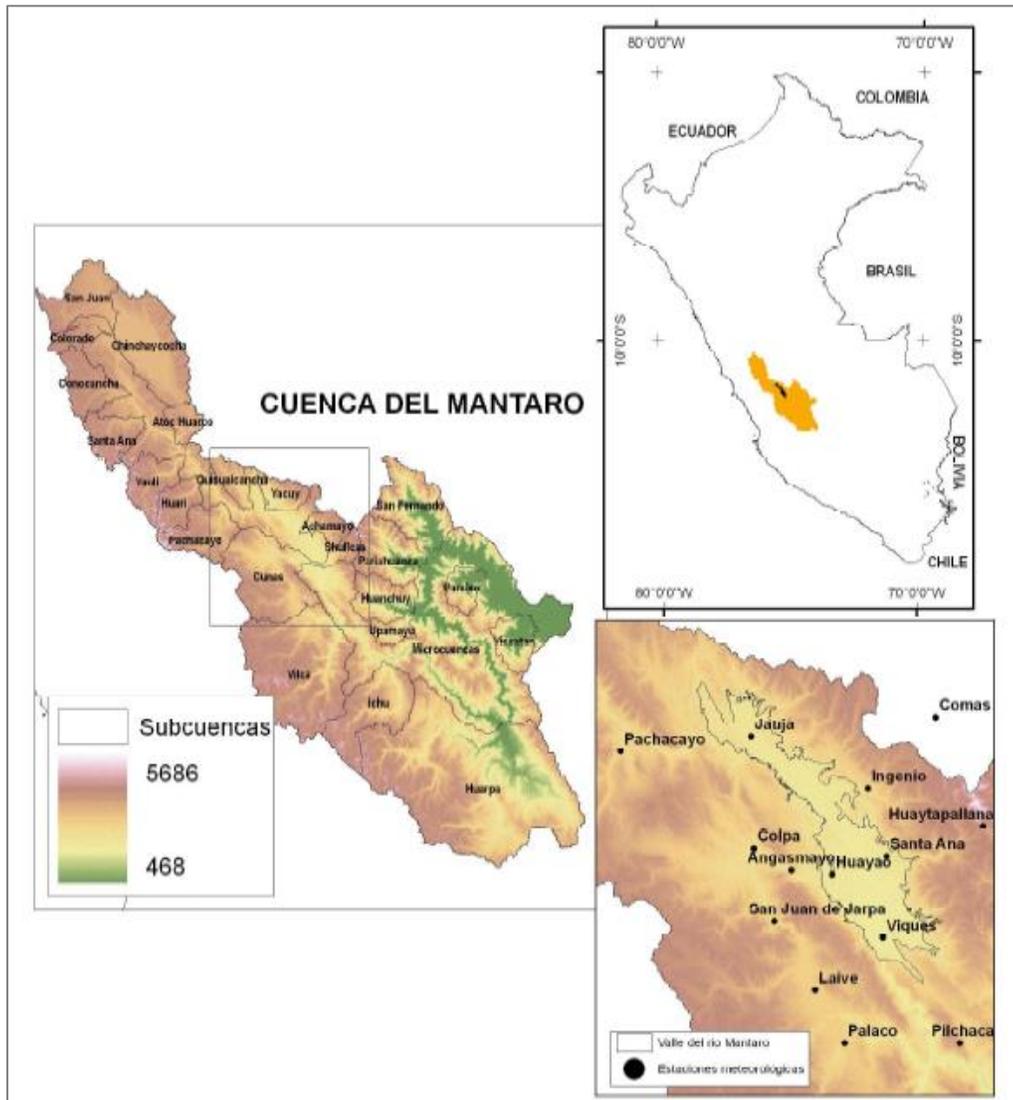
“La variabilidad de la PPT en Perú esta principalmente influenciada por los sistemas de gran escala como la Alta de Bolivia (AB), la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS), el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) y el Anticiclón del Atlántico Sur (AAS). La interacción de los tres primeros asegura gran actividad convectiva en la región durante la estación de verano, mientras que el APS al configurarse e intensificarse puede bloquear o facilitar el ingreso de sistemas frontales durante el invierno y generar lluvias a su paso; por otro lado, la ubicación y fortalecimiento del AAS beneficia la advección de aire caliente y húmedo procedentes de la Hoya Amazónica y que al chocar con los Andes orientales ascienden por efecto orográfico, se produce un enfriamiento rápido de la masa de aire reduciéndose de esta manera la capacidad para sostener la humedad inicial y posteriormente se producen fuertes precipitaciones que se extienden longitudinalmente por regiones adyacentes al este de los Andes. La ZCIT, APS y AAS son sistemas cuasi estacionarios con desplazamientos meridionales estacionales y la AB y ZCAS corresponden a sistemas típicos de verano (Avalos, 2005)”.

6.2.1.1 Cuenca del río Mantaro - CMAN

Esta cuenca posee una extensión aproximada de 34.550,15 km² y se encuentra ubicada en los andes centrales del Perú. El río Mantaro es uno de los ríos más importantes de los Andes Centrales Peruanos, y es el principal de la cuenca la cual posee aproximadamente 340.000 hectáreas de tierras agrícolas que proveen alimentos para satisfacer la demanda de Lima. Esta cuenca es de suma importancia puesto que abastece gran parte de la demanda eléctrica del país (IGP, 2005b). Se divide en 23 subcuencas, hacia la margen derecha se encuentran ubicadas 12 subcuencas, mientras que hacia la margen izquierda se ubican 11 subcuencas. Huarpa es la subcuenca que tiene la mayor extensión, que se ubica al extremo sur de la CMAN. La cuenca está respaldada por cadenas de cerros lo que ocasiona que en algunos tramos el río a fluya encañonado. La cuenca presenta una importante variabilidad espacial de TEMP esto debido a su ubicación geográfica en la cual la variación de altitudes va desde los 500 hasta los 5.000 msnm. Su valle con un área de 700 km² presenta una longitud de 70 km y su ancho varía valores menores a 1 km hasta 20 km

aproximadamente, y las altitudes tienen un rango que oscila entre 3.100 y 3.300 msnm (Mamani Gonzales, 2013).

Figura 15. Mapa de ubicación de la CMAN, Perú.



Fuente: Tomado de (Zubieta & Saavedra, Distribución espacial del índice de concentración de precipitación diaria en los Andes Centrales Peruanos: Valle del Río Mantaro., 2009).

Desde el punto de vista geomorfológico, en la CMAN se presentan las unidades morfoestructurales Cordillera Occidental y Cordillera Oriental, así como depresiones relacionadas al lago Chinchaycocha, conos volcánicos y valles interandinos. En cuanto a la hidrografía, la CMAN y la cuenca hidrográfica del río Perené, están limitadas por la Cordillera Huaytapallana la cual se ubica en la cordillera oriental de los Andes centrales del Perú, y la conforman los Nevados Huaytapallana, Pacaco, Anchigrande, Putcacocha, Chuspi, Talves, Puihuan, Tello, Ventanilla y Cochás, el deshielo de estos nevados son los encargados de aportar al régimen hídrico de la

subcuenca del río Shullcas, subcuenca del río Pariahuanca, Subcuenca del río Achamayo y de la subcuenca del río Tulumayo, sólo el río Tulumayo aporta al sistema hidrográfico del río Perené, los demás ríos aportan sus aguas al sistema hidrográfico del Mantaro (Zubieta & Lagos, 2010).

6.2.1.1.1 Geología

Estratigráficamente la CMAN presenta numerosas unidades litoestratigráficas, las rocas metamórficas y sedimentarias presentan gran propagación en el área de la cuenca, donde la edad más antigua corresponde al Paleozoico Inferior. Aunque las intrusiones ígneas son menos significativas, el batolito de “Villa Azul” tiene un importante emplazamiento, en cuanto a los depósitos glaciáricos, fluviales, fluvio-glaciares y depósitos coluviales (escombros, DESL), se encuentra recubriendo áreas significativas de la cuenca. “Hacia el extremo NE de la cuenca afloran rocas del Grupo Ambo del Carbonífero el cual se encuentra constituido litológicamente por areniscas y lutitas carbonosas, y rocas de la Fm. Condorsinga (Grupo Pucará) del Jurásico Inferior las cuales están conformadas por calizas, al norte de lago Junín afloran depósitos cuaternarios que se relacionan con humedales. Al noreste predominan rocas areniscas de la Fm. Casapalca del Terciario Inferior (Paleoceno) que infrayacen las rocas del Plioceno de la Fm. Huayllay conformadas por tufos volcánicos. Al extremo SW, en cercanías de Ondores, aflora una secuencia de rocas calcáreas pertenecientes al Grupo Pucará (Fm. Chambara y Aramachay) de edad Triásico Superior – Jurásico Inferior. En la margen derecha, con dirección paralela al río Mantaro, afloran las areniscas de la Fm. Casapalca que sobreyacen las Formaciones Goyllarrisquiza, Chulec y Jumasha del Cretácico. En las zonas altas de las subcuencas de Huari, Yauli y Pachacayo, entre La Oroya y el estrecho de entrada al Valle del Mantaro se presentan depósitos fluvio-glaciáricos, depósitos glaciares y terrazas. Entre Jauja y Orcotuna, hacia la margen derecha del río Mantaro, predominan series de rocas sedimentarias lutíticas y calcáreas de las Formaciones Aramachay y Condorsinga de edad Triásico-Jurásico, a estas las sobreyacen conglomerados y areniscas de la Formación Casapalca del Terciario Inferior. Mientras que, hacia la margen izquierda predominan las series devonianas conformadas por conglomerados y cuarcitas de la Fm. Concepción del Grupo Excelsior, los cuales se encuentran intruidos por una secuencia de pórfidos del Pérmico Superior. A la altura de Huancayo, el Grupo Excelsior del Paleozoico Inferior aflora hacia la margen izquierda del río Mantaro, el cual se encuentra conformado por areniscas intercaladas con secuencias de lutitas gris oscuras, a su vez esta unidad se encuentra intercalada con secuencias conglomeráticas del Grupo Mitu y en la parte superior con las calizas del Grupo Pucará la cuales predominan en la margen derecha de la cuenca entre las ciudades de Huancayo e Izcuchaca. En la margen derecha del río Mantaro, al NE de Pampas, se presentan las series lutíticas del Grupo Excelsior, mientras que más hacia el norte, se observa un extenso afloramiento que corresponde a las rocas dioríticas y granodioríticas del Batolito de Villa Azul del Cretácico Inferior. Hacia el SW y SE de Pampas afloran rocas de edad Jurásico Inferior del Grupo Pucará constituidas litológicamente por secuencias calcáreas. El Grupo Tarma de edad Paleozoico Inferior, aflora en el área de Mayocc con predominancia de secuencias lutíticas las cuales se encuentran fuertemente plegadas debido al intrusivo Cobriza del Pérmico Superior-Triásico. En la margen izquierda del río Mantaro, en inmediaciones de Huanta, afloran rocas del Mioceno Inferior constituidas por limoarcillitas, areniscas y algunos niveles de afinidad volcánica que hacen parte de la Fm. Huanta. En cercanías de Ayacucho afloran las secuencias tufáceas de origen volcánico que pertenecen a la familia Huanta del Terciario Inferior cuyos conos de deyección se encuentran al norte y sur de Ayacucho. Hacia los extremos Este y Oeste de Huanta, predominan secuencias conglomeráticas pertenecientes al Grupo Mitu del Paleozoico Superior (IGP, 2005)”.

6.2.1.1.2 Geología Estructural

Los Andes Peruanos se conforman por varias Cordilleras que se encuentran situadas entre la Fosa Oceánica Perú-Chile y la llanura amazónica. La estratigrafía, el magmatismo, mineralización, estructuras y sismicidad de la CAND y del territorio peruano se encuentran directa e indirectamente relacionadas con la subducción de la Placa de Nazca por debajo de la Placa Sudamericana, la cual se conoce como “Subducción Andina” (IGP, 2005).

En la CMAN, los rasgos estructurales más importantes están determinados por numerosos sistemas de fallas, grandes anticlinales y sinclinales, estas estructuras tienden a orientarse en la dirección general del plegamiento Andino el cual se caracteriza por una dirección predominante Noroeste-Sureste. En cuanto a la depresión donde se localiza la laguna de Junín, estructuralmente esta corresponde a un sinclinal que se extiende de San Blas a Casaracra

6.2.1.1.3 Geomorfología

El relieve general de la CMAN se define como una hoya hidrográfica alargada de fondo profundo, esta presenta un terreno quebrado y con fuerte pendiente. Además, presenta una fisiografía escarpada que en algunos sectores se vuelve abrupta, se encuentra disectada por tributarios que presentan fuertes pendientes y estrechas gargantas, con excepción de la cuenca alta en donde la cuenca tiene una apariencia de meseta, igualmente, esta se encuentra limitada por varias secuencias de cerros los que en varios sectores obligan al río a fluir encañonado (INGEMMET, 1980).

La morfología del área depende de la acción que tienen agentes meteóricos como TEMP, PPT, escorrentía superficial y subterránea, sobre las unidades litológicas. Es posible distinguir unidades geomorfológicas relacionadas a la Cordillera Oriental, Cordillera Occidental, Depresiones, Superficie Puna y zona de valles interandinos. Estas unidades, las cuales se describen a continuación, reciben el nombre del área donde aparecen de manera local.

*“La Depresión laguna Junín o Chinchaycocha, se ubica entre las Cordilleras Oriental y Occidental, caracterizada por una superficie ondulada con fondo llano el cual debido al socavamiento del río Mantaro se ha ido disectando, igualmente la erosión glacial y la acción eólica la han moldeado, es de morfología suave y se encuentra emplazada en rocas del Grupo Pucará a una altitud de 4.200 msnm. La unidad de **depósitos morrénicos y llanuras de inundación** se extiende al NE de la localidad de Cerro de Pasco, corresponden a una superficie plana cubierta por depósitos glaciares que forman las grandes morrenas, esta unidad se localiza a una altura promedio de 4.300 msnm. En la parte más alta de la Cordillera Occidental se ubican las **Altas Cumbres Occidentales** las cuales se encuentran conformadas por geoformas agrestes producto del modelado glacial y que alcanzan altitudes que van desde los 4.800 a 5.400 msnm. Por otro lado, las cadenas de cerros que corresponden a los contrafuertes orientales de la Cordillera Occidental y que se encuentran en las inmediaciones de Ayacucho, presenta una morfología abrupta con picos que sobrepasan los 4.200 msnm, igualmente, se presentan geoformas glaciares relacionadas a valles en “U”, circos glaciares y depósitos fluvioglaciares. Al suroeste de Concepción se observa la unidad **Altas Mesetas Occidentales**, la cual se caracterizan por que prevalecen los restos de la Superficie Puna y se encuentran entre los 3.800 a 4.400 msnm. La unidad **Cordillera Oriental** se destaca por la presencia de relieves reactivados que corresponden a un sistema montañoso de cumbres nevadas que sobrepasan los 5.500 msnm, como es el caso*

de los Nevados Huaytapallana y Marairazo. Al SE de Huancayo, se puede observar esta unidad, la cual se caracteriza por presentar gran uniformidad de sus cumbres a pesar que parte de la superficie ha sido modelada por la acción erosiva de los glaciares y corrientes. En altitudes cercanas a los 4.800 msnm la zona de Pampas se encuentra glaciada, sin embargo, se puede observar que en la actualidad no es posible encontrar nieves perpetuas, pero se pueden encontrar geoformas asociadas a valles en U, lagunas glaciares, circos glaciares, crestas dentadas y restos de morrenas que demarcan la actividad glacial durante el Cuaternario. La Cordillera Oriental, hacia el E y NE de Huanta, se denomina como Razuhuilca, esta se encuentra caracterizada por un promontorio alargado de dirección NO-SE el cual presenta una morfología abrupta, con cadenas de cerros y picos de altas pendientes que alcanzan altitudes cercanas a los 5.000 msnm los cuales conforma la divisoria de aguas entre las cuencas de los ríos Apurímac y Mantaro. En las cercanías a Ayacucho, es posible observar las estribaciones occidentales de la Cordillera Oriental, la cual se encuentra conformando un paisaje que ha sido modelado por la acción glacial donde se pueden apreciar unidades de morrenas y depósitos glaciofluviales. Al extremo norte de la cuenca se presenta la unidad **Superficie Puna o Zona de Altas Mesetas Centrales**, la cual corresponde a una superficie que no ha logrado ser peneplanizada por completo, la cual descansa sobre rocas metamórficas correspondiente a los esquistos del Grupo Excelsior. A la altura de Huancayo, hacia la parte media de la cuenca, esta unidad se encuentra conformada por un conjunto de colinas de cimas truncadas debido a la erosión, se encuentran ubicadas a una altura entre los 4.000 y 4.400 msnm. Hacia el sector de Ayacucho, esta unidad se encuentra conformada por cerros y lomas suaves, conformando superficies aborregadas. Algunos de los cerros pequeños corresponden a relictos de antiguas formaciones volcánicas, por lo tanto, las llanuras se encuentran constituidas por flujos de lavas subhorizontales. En cuanto a la **Depresión de Huancayo**, esta corresponde a una unidad alargada de dirección NW-SE, presenta una longitud de alrededor de 70 km, con un ancho que varía entre 3 y 15 km. Es atravesado por el río Mantaro y su curso sigue el eje de la depresión. El fondo de la cuenca se encuentra conformado por formaciones cuaternarias de gran espesor que conforman un sistema de terrazas escalonadas las cuales localmente se encuentran disectadas por conos aluviales de los afluentes del río Mantaro. **Depresión de Jauja**, corresponde a la continuación de la depresión que proviene desde de Huancayo. La unidad **Depresión Ingahuasi** tiene una longitud de 35 km y un ancho que varía entre 1,5 a 8 km, corresponde a una planicie extensa que se encuentra rodeada de cerros que forman parte de las Altas Mesetas, el material que rellena esta depresión corresponde principalmente a depósitos fluvioglaciáricos los cuales se depositaron de forma muy pareja, lo cual explica la horizontalidad desarrollada en esta unidad entre los 3.800 y 3.900 m de altitud. La **Depresión de Huanta** se caracteriza por presentar una morfología muy suave, con colinas no muy pronunciadas, presenta altitudes que varían entre los 2.200 y 2.700 m, presenta un ancho promedio de 7 km y una longitud de más de 30 km, surca los ríos Mantaro, Cachimayo, Huarpa y sus tributarios. Durante el Neógeno y el Cuaternario, esta depresión presento un relleno paulatino de materiales sedimentarios y volcánicos. La unidad **Valles del sistema de drenaje del Mantaro** cruza en dirección NW-SE toda la zona de la cuenca, presentando cambios de dirección importantes a la altura de Mayoc hasta su desembocadura en el río Apurímac, esta unidad se presenta entre las altitudes de 900 a 2.800 msnm. Al norte de Ayacucho la unidad correspondiente a la **Zona de Conos Volcánicos** se encuentra bien definida, y corresponde a una serie de conos volcánicos que alcanzan altitudes de 600 a 800 m, sus flancos tienen pendientes que oscilan entre los 20 y 40°. La morfología se encuentra intacta y están cubiertos por suelos de regular espesor, con una orientación de NO a SE (IGP, 2005)".

6.2.1.1.4 Cobertura vegetal y uso del suelo

El 72,5 % del territorio de la cuenca presenta una cobertura relacionada con pajonales andinos, matorrales andinos y bofedales, en donde no se evidencia actividad agropecuaria. Respecto a las actividades económicas la agricultura y actividades mineras representan el 12.2% del total de la cobertura de la cuenca; y el restante 15.3% está conformado por coberturas relacionadas con área altoandina con escasa o sin vegetación, bosque relicto altoandino, bosque relicto mesoandino, glaciar, lagos, lagunas y cochas, bosque de montaña, bosque de montaña altimontano, bosque de montaña basimontano, bosque de montaña montano, bosque de colina alta, bosque de terraza baja, plantación forestal, áreas de no bosque amazónico, área urbana, río y vegetación de isla (CIIFEN, 2017).

De acuerdo a las características, climáticas, orográficas y florísticas propias de la CMAN se pueden distinguir tres secciones (Tovar, 1985):

- Alto Mantaro, esta sección se ubica a 4.100 msnm en el lago Junín y va hasta Ingahuasi a 3.100 msnm.
- Mantaro medio, esta sección parte desde Ingahuasi y va hasta Mayoc a una altura de 2.200 msnm.
- Bajo Mantaro, esta sección se distribuye de Mayoc hasta donde confluye el río Mantaro con el río Apurímac, a una altura de 500 msnm.

Las unidades que se distinguen en la sección Alto Mantaro corresponde a piso andino, piso altoandino y piso mesoandino superior. *“En cuanto que en la sección Mantaro Medio se pueden diferenciar el piso mesoandino inferior y piso termoandino superior; y para la sección Bajo Mantaro se pueden identificar las unidades piso termoandino inferior, piso termoandino inferior seco, piso termoandino inferior subhúmedo, y el piso termoamazónico (IGP, 2005)”*.

En cuanto al uso del suelo, se encuentra prácticamente orientado al uso mayor de la tierra, en donde la agricultura corresponde a la actividad económica que más influye en la cuenca representada por cultivos permanentes, cultivos limpios o transitorios, producción forestal, pastos naturales, así como actividades relacionadas con ganadería, minería y otros (SENAMHI, 2007). Como se mencionó, se destacan dos actividades económicas principales, minería y agricultura, las cuales no solo influyen en la transformación del paisaje, sino también en los modelos productivos

Según Tovar Serpa (1990), el sobrepastoreo y la presión del hábitat son los factores más significativos que influyen sobre la conservación de los recursos vegetales en el valle del Mantaro, igualmente en algunos sectores de la cuenca la transformación de la vegetación natural por cultivos de cereales y tuberosas influye directamente en la conservación de los recursos vegetales. En cuanto al sobrepastoreo, este se debe a la presión ocasionada por el mal manejo de los pastizales destinados para la ganadería ovina y caprina; y la presión del hábitat se encuentra relacionada con la densidad poblacional y con el uso que ésta da a los recursos vegetales, en donde se destaca el uso para construcción de viviendas y su utilización como leña o combustible (IGP, 2005).

6.2.1.1.5 Fisiografía

Hacia la parte norte de la CMAN, en cercanías al lago Junín, existen dos tipos de llanuras las cuales presentan variaciones de pendiente de 0 a 15% y llanuras que se encuentran disectadas que presentan pendientes de 15 a 25% con variaciones de altura entre 0 y 1.000 m. La unidad fisiográfica relacionada con la llanura de 0 a 4% de pendiente, es característica de la altiplanicie que encierra el lago Junín, y es el único tipo fisiográfico que no se reaparece en las otras zonas y en los mismos rangos de altitud, esta misma fisiografía se presenta hacia el sur del lago con excepción de las llanuras de 0 a 4% de pendiente. *“En la mayor parte del recorrido del río hasta antes de su desembocadura sobre el río Ene, se presentan variaciones de altura de 300 a 1.000 m, las cuales presentan intermitencias. Continuando la trayectoria del río, entre el poblado de Parco (Jauja) hasta donde el valle se cierra cerca del poblado de Viques, se observan superficies de erosión local con acumulación coluvial que varía a acumulaciones fluviales recientes. Después del valle del Mantaro, hacia el sur, la vertiente de la cuenca se angosta conservando el rango de alturas hasta llegar a Quichuas (Huancavelica), donde se incrementa la pendiente. Cerca del límite departamental entre Huancavelica y Ayacucho a la altura de Mayocc y del fundo Chaipara, la fisiografía se interrumpe debido a las acumulaciones fluviales y torrenciales recientes (IGP, 2005)”*.

6.2.1.1.5.1 Pendiente

Teniendo en cuenta la naturaleza compleja de la CMAN se pudo considerar que las características de pendientes de la cuenca se clasifican en zonas planas para pendientes de 0 a 10° y corresponden al 10% del área de la cuenca, zonas intermedias con pendientes de 10 a 30° que ocupan el 20% del área, zonas con pendientes de 30 a 70° clasificadas como abruptas y corresponden al 40% del área de la cuenca, y zonas montañosas con pendientes de 70° que ocupan el 30% del territorio de la cuenca (INGEMMET, 1980).

6.2.1.1.6 Clima

En estudios realizados en la CMAN y en otras dos cuencas, adelantados por el SENAMHI e IGP, han podido realizar algunos acercamientos sobre las tendencias presentes y futuras del clima (SENAMHI, 2007). Se ha podido identificar que en la zona alta y media de las cuencas se vienen experimentando lluvias con magnitudes iguales o superiores a las que ocurren durante el fenómeno de El Niño, en cuanto a lo relacionado con las temperaturas extremas, la tendencia muestra que en los últimos 35 años se ha presentado un aumento entre 0.1 – 0.4 °C por década, sin embargo, en la parte media de algunas de las cuencas la TEMP mínima viene mostrando una tendencia negativa entre 0.03 – 0.06 °C por década. El IGP (2005) identifica que las alteraciones en el clima de la CMAN, han derivado en múltiples efectos en el territorio, por ejemplo, los problemas en cultivos se exacerbaban durante los meses en los que se presentan lluvias de mayor intensidad, así como en los meses de sequía. Igualmente, según el INRENA, otro de los problemas en el Perú corresponde con la superficie glaciaria que ha perdido el 22% en los últimos 35 años, lo que se evidencia en el aumento del nivel de las lagunas que se encuentran por debajo de los glaciares. Para el año 2050, a causa de la deglaciación se prevé un incremento y posterior decrecimiento de caudales en los ríos que tienen aporte glaciario, lo cual dependerá de las

precipitaciones que se presentaran debido al CC que corresponde a un fenómeno de escala global, los cuales se vienen presentando paulatinamente en los últimos años (SENAMHI, 2007).

6.2.1.1.6.1 Clasificación climática de la Cuenca

Factores como latitud, altitud, la CAND, la Corriente Costera Peruana, el Anticiclón del Pacífico Sur y la continentalidad, condicionan preponderantemente el clima, estos han sido utilizados para elaborar el “*Mapa de Clasificación Climática del Perú (SENAMHI, 1988) en (SENAMHI, 2007)*”, sobre el cual se basa la clasificación climática de la CMAN, sustentada en registros meteorológicos de veinte años (1965-1984) a partir de los cuales generaron los índices climáticos teniendo en cuenta el Sistema de Clasificación de Climas de Werren Thorrrnthwaite.

Por lo anterior, hacia el sector Norte de la cuenca entre los 3.200 y 4.800 msnm, el clima lo clasifican como semifrío húmedo caracterizado por un régimen de abundantes lluvias en verano y seco en invierno. Hacia el sector central, el clima se caracteriza por ser cálido muy húmedo hacia el Este, el cual va evolucionando a un clima frío húmedo hasta llegar a un clima semifrío húmedo al Oeste, aquí las precipitaciones son principalmente de tipo orográficas y ocurren en verano. Sin embargo, hacia el Este de la zona media de la cuenca, se presenta menor piso altitudinal en donde predomina un clima semicálido muy húmedo y templado húmedo, se caracteriza por presentar una inclinación muy suave hacia el Atlántico y una densa vegetación, donde las precipitaciones se dan durante todas las estaciones del año y son de tipo convectivo. Por otro lado, en el sector Sur de la cuenca, hacia el Oeste el clima va desde semifrío húmedo variando a un clima templado húmedo y frío húmedo y pasando hasta un clima semifrío húmedo al Este (SENAMHI, 2007).

6.2.1.1.6.2 Precipitación

Se sabe que, en Perú, existen dos factores principales que establecen y alteran totalmente los medios ecológicos de su territorio, uno corresponde a la Corriente Costera Peruana o Corriente de Humboldt y el otro a la CAND, debido a estos dos factores el país tiene casi todas las variedades climatológicas que se presentan en el mundo, mostrando un régimen pluviométrico que presenta una amplia variación en espacio y tiempo. En la región andina se presenta uno de los mecanismos físicos de la PPT más relevante, el cual se da cuando concentraciones de aire caliente y húmedo que llegan a los Andes orientales originarios de la Hoya Amazónica, ascienden por efecto orográfico y se enfrían rápidamente lo cual influye directamente sobre la HUMD inicial disminuyendo la capacidad que tienen las masas de aire de retenerla y posteriormente se produce la PPT. Lo anterior tiene como resultado que en el país se presenten regiones con registros de altas cantidades de PPT, como es el caso de la estación Quincemil, la cual se ubica en la selva sur donde se registran valores de PPT anuales próximos a los 7.000 mm (SENAMHI, 2007).

En la región de la Sierra, las precipitaciones están directamente relacionadas con el componente zonal Este del VIE, al coincidir con el incremento de los vientos en todos los niveles de la atmosfera favoreciendo la advección de la HUMD proveniente de la cuenca amazónica, por lo tanto, para que se dé la PPT es necesario que estas masas de aire asciendan por los flancos de

la Cordillera canalizadas por los valles, este mismo mecanismo de PPT es el responsable de que se generen precipitaciones en la CMAN (SENAMHI, 2007).

6.2.1.1.6.3 *Distribución temporal de la precipitación*

En toda el área de la CMAN, las precipitaciones presentan un comportamiento estacional típico, el cual se caracteriza por presentar un periodo húmedo que tiene su máximo en la estación de verano y un periodo de precipitaciones son mínimas entre los meses de junio a agosto.

A partir de datos de PPT de 14 estaciones meteorológicas distribuidas en tres sectores de la cuenca, los cuales cuentan con registros para el periodo 1965 -2006, pudieron establecer que el trimestre más lluvioso de la cuenca corresponde al de diciembre a febrero DEF que corresponde a la época de verano, mientras que el menos lluvioso es de junio a agosto JJA que coincide con la época de invierno. En la mayoría de los registros de las estaciones meteorológicas pudieron identificar que el trimestre de marzo a mayo MAM que coincide con la época de otoño corresponde al segundo trimestre lluvioso, sin embargo en algunas estaciones ubicadas en la parte central de la cuenca, identificaron que el segundo trimestre lluvioso se da de septiembre a noviembre SON coincidiendo con la época de primavera, tal como se observa en la Tabla 12.

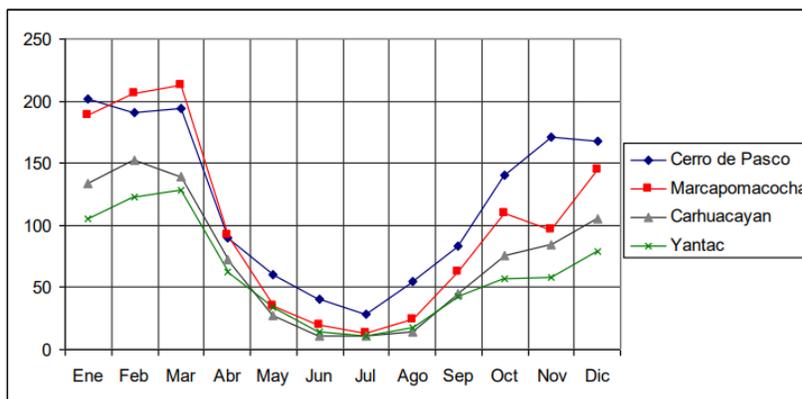
Tabla 12. Climatología del acumulado anual (mm/año) y estacional (mm/trimestre) de la PPT en la CMAN.

ESTACIONES	ANUAL	DEF	MAM	JJA	SON
Cerro de Pasco	1425,5	561	344,9	124,1	395,5
Carhuacayan	870,6	391,5	238,1	36,6	204,4
Yantac	734,4	308,1	224,7	43,3	158,3
Marcapomacocha	1205	538,8	339,8	57,7	268,7
Jauja	702,8	337,9	169,1	21,5	174,3
Huayao	763	345,8	195,7	37	184,5
San Juan de Jarma	1016,9	449,7	281,1	56,2	229,9
Pilchaca	741,8	348,7	173,3	46,9	172,9
Huancalpi	860,8	355,5	205,6	82	217,7
Huancavelica	835,2	376,7	224	43	191,5
Acobamba	718,7	322,3	165,9	44,2	186,3
Lircay	809,9	365,1	215,6	51,2	178
La Quinua	787,7	396,9	197,3	35,4	158,1

Fuente: Tomado de (SENAMHI, 2011).

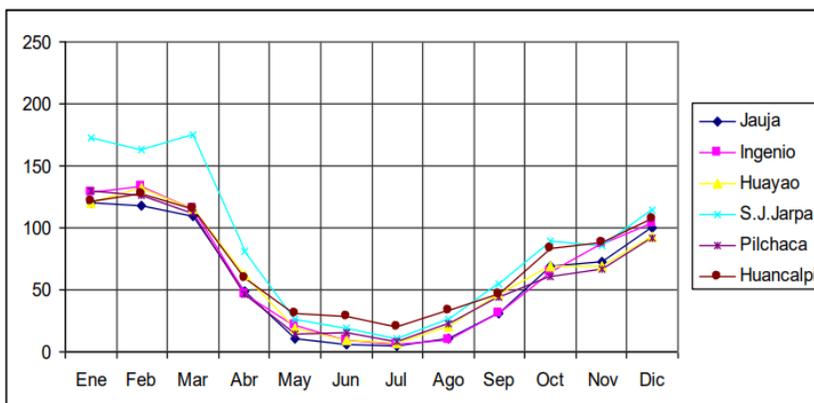
Como se puede observar, en la tabla, para los trimestres MAM y SON ambos presentan cantidades muy similares de PPT acumulada. “En cuanto a los valores acumulados de las precipitaciones en el trimestre DEF sobrepasan los 535 mm en la parte norte, mientras que en el trimestre JJA los totales de PPT acumulada no exceden los 50 mm a excepción de la estación Cerro de Pasco que acumula 124 mm (SENAMHI, 2007)”.

Figura 16. Ciclo anual de la PPT en el sector norte de la CMAN en mm/mes.



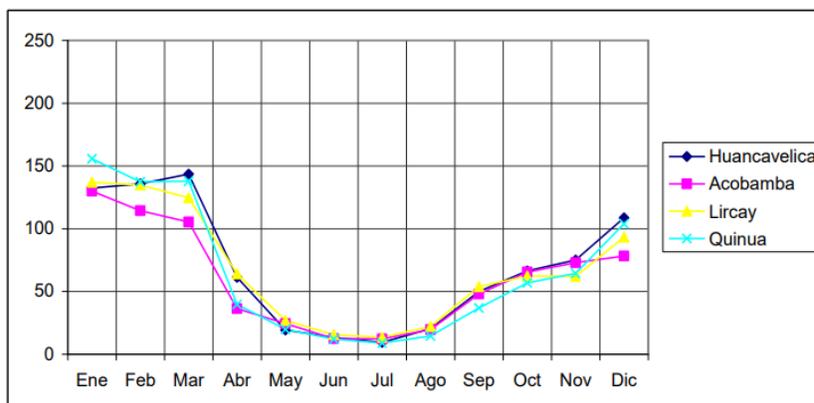
Fuente: Tomado de (SENAMHI, 2007).

Figura 17. Ciclo anual de la PPT en el sector centro de la CMAN en mm/mes.



Fuente: Tomado de (SENAMHI, 2007).

Figura 18. Ciclo anual de la PPT en el sector sur de la CMAN en mm/mes.



Fuente: Tomado de (SENAMHI, 2007).

En la Figura 16, Figura 17 y Figura 18 se presenta los gráficos del ciclo anual de PPT para cada uno de los sectores de la cuenca, identificándose una similitud en el comportamiento, sin embargo se pueden observar pequeños incrementos en las estaciones Cerro de Pasco y Marcapomacocha ubicadas en las partes altas del sector norte, lo que evidencia una relación directa entre la altitud y las precipitaciones en algunas zonas de la cuenca, igualmente se encuentran condicionadas por factores como la radiación solar y el VIE el cual es influenciado por las condiciones de brisa montaña-valle y la dirección de los flujos del este (IGP, 2005).

6.2.1.1.6.4 *Distribución espacial de la precipitación*

En la zona centro occidental el promedio multianual de las precipitaciones varía entre 700 y 800 mm/año, y hacia el sector occidental exceden los 1.000 mm/año. En el valle del río Mantaro la PPT anual es generalmente moderada y pueden ocultar eventos extremos. En zonas alejadas del valle, a altitudes mayores a 3.300 msnm, los valores pueden exceder los 900 mm de PPT. En cuanto a los patrones que dominan las precipitaciones suelen ser complejos, y se relacionan con flujos de aire cálido y húmedo que provienen de la Amazonia, patrones orográficos como la ubicación de la cuenca en el medio de las cordilleras occidental y oriental de los andes centrales peruanos y la considerable variación de altitud y orientación de las cuencas, lo anterior según el IGP (2005).

De acuerdo con la caracterización espacial del valle del río Mantaro se identifican dos núcleos de concentración de PPT que se caracterizan por presentar áreas con una alta diferencia de lluvia diaria y gran intensidad de la lluvia. En cuanto a los vientos, estos se encuentran condicionados principalmente por forzantes dinámicas como la corriente de chorro de Sudamérica (CCSA), que por su dirección hacia al norte logra llegar a los Andes, y a su vez ingresa a la cuenca por el Nor-oriental y el Suroriental. Esta dinámica posiblemente se pueda asociar a la formación de los dos núcleos de concentración. En cuanto a la distribución espacial de las precipitaciones en el valle del río Mantaro, hacia la parte central y norte se presentan mayores precipitaciones, mientras que hacia la zona sur se presentan 25% menos lluvias (Zubieta & Saavedra, 2009).

6.2.1.1.7 *Histórico de eventos*

En Perú, el Instituto Geofísico del Perú realizó en el año 2012 el proyecto “Manejo de riesgos de desastres ante eventos meteorológicos extremos en el valle del Mantaro”, donde identificaron “la alta vulnerabilidad que presenta la CMAN frente a eventos meteorológicos extremos relacionados con la VC, y determinaron de acuerdo con proyecciones recientes, que esta se incrementaría en los próximos años debido al CC (IGP, 2005c)”. Teniendo en cuenta que los eventos meteorológicos extremos ocasionan desastres que perturban a la población y sus actividades económicas, en este estudio plantearon determinar umbrales de lluvias intensas a partir de la identificación en medios de comunicación de la presencia de eventos, teniendo en cuenta que las noticias que publican información sobre donde y cuando han ocurrido eventos concretos que son importantes de acuerdo al criterio del informante (IGP, 2012).

Por lo tanto, recopilaron información de los registros de PPT de 9 estaciones meteorológicas, tuvieron acceso a la base de datos de la plataforma DESINVENTAR donde se encuentra el registro

de eventos a través de los cuales se puede acceder a información relacionada con la fecha de publicación del evento, ubicación geográfica, tipo de evento e impactos generados. La información obtenida fue utilizada para identificar la fecha en que ocurrió el evento y relacionarlo con los datos de PPT adquiridos de las estaciones meteorológicas. Así, por ejemplo, en las estaciones de Huayao, San Juan de Jarpa y Laive, ubicadas en la provincia de Chupaca se pudieron identificar 8 eventos que se relacionan con lluvias intensas, se realizó la correlación de la fecha en que se registró la noticia del evento con los registros de PPT de las estaciones, donde se obtuvo como resultado que la PPT registra mayores valores en los distritos de Chupaca y Huamancaca Chico con precipitaciones de 15 mm/día el 6 de febrero de 1997. También se pudo analizar que la estación de San Juan de Jarpa a pesar de tener el día del evento un registro de PPT con un valor de 16,2 mm/día, esta se encuentra lejana de los eventos identificados (IGP, 2012).

Tabla 13. Registros de lluvias intensas estación Huayao.

Tiempo	Noticia	Registros de lluvias: Estación Huayao			
Fecha	Distrito	Lluvia diaria	5 días Acumulados	10 días Acumulados	15 días Acumulados
10/02/1994	Chongos bajo	7.2	45.6	69.6	89.3
06/02/1997	Chupaca	15	21.4	28.9	44.2
06/02/1997	Huamancaca Chico	15	21.4	28.9	44.2
16/04/1997	Chongos Bajo	2.5	8.7	24.5	32.1
08/11/1997	Ahuac	0	22.3	42.9	42.9
08/11/1997	Huamancaca Chico	0	22.3	42.9	42.9
08/11/1997	Tres de Diciembre	0	22.3	42.9	42.9
17/01/2001	Chupaca	0	1.8	3.3	17.4

Fuente: Tomado de (IGP, 2012).

Tabla 14. Registros de lluvias intensas estación San Juan de Jarpa.

Tiempo	Noticia	Registros de lluvias: Estación San Juan de Jarpa			
Fecha	Distrito	Lluvia diaria	5 días Acumulados	10 días Acumulados	15 días Acumulados
10/02/1994	Chongos bajo	5.5	38.6	65.1	115.1
06/02/1997	Chupaca	16.2	20.4	26.8	62.2
06/02/1997	Huamancaca Chico	16.2	20.4	26.8	62.2
16/04/1997	Chongos Bajo	6.1	8.2	29.5	35.9
08/11/1997	Ahuac	1.1	1.5	3.2	6.6
08/11/1997	Huamancaca Chico	1.1	1.5	3.2	6.6
08/11/1997	Tres de Diciembre	1.1	1.5	3.2	6.6
17/01/2001	Chupaca	2.3	18.6	27.1	30.7

Fuente: Tomado de (IGP, 2012).

La estación meteorológica Ingenio se encuentra localizada en la provincia de Concepción, y de acuerdo a la base de datos de DESINVENTAR, se pudieron identificar 9 eventos relacionados con lluvias intensas, donde el día 16 de enero de 1970 en el distrito de Heroínas Toledo se registraron

los mayores valores de PPT, el día del evento la estación registró una alta PPT y su ubicación es muy próxima a los mismos.

Tabla 15. Registros de lluvias estación Ingenio.

Tempo	Noticia	Registros de Lluvias: Estación Ingenio			
Fecha	Distrito	Lluvia diaria	5 días Acumulados	10 días Acumulados	15 días Acumulados
16/01/1970	Heroínas Toledo	9.9	52.2	81.5	123.7
08/04/1973	-	0	33.9	41.6	73
02/03/1986	-	9.6	51.7	99.5	132.8
23/11/1992	Orcotuna	0.7	3.8	7	12.5
24/03/1993	Orcotuna				
12/09/1993	-	0.5	1.5	1.5	2.3
25/11/1993	-	2.6	23	42.4	70.9
30/01/1994	Comas	1.1	15.2	45.2	53.7
08/11/1997	-	6.9	33.5		

Fuente: Tomado de (IGP, 2012).

Las estaciones Viques, Santa Ana y Shullcas se encuentran localizadas en la provincia de Huancayo, donde se pudieron identificar 103 registros de noticias relacionadas con fuertes precipitaciones en el lugar, de esos registros se presentaron más en el distrito de Huancayo. Por otra parte, en la estación Santa Ana se registró el evento del 11 de diciembre de 1993 en los distritos de Chilca y El Tambo, el cual corresponde con el evento de menor intensidad con un valor de 9,4 mm/día. Mientras que en el distrito de Huancayo se tuvo registro de noticias de un evento ocurrido el día 22 de marzo del 2001 el cual presento una PPT de 16,7 mm/día; sin embargo, la PPT acumulada de 15 días para el día del evento fue de 111,2 mm; valor de PPT mayor al valor acumulado observado en los registros seleccionados.

Tabla 16. Registros de lluvias intensas estación Santa Ana.

Tempo	Noticia	Registros de Lluvias Estación Santa Ana			
Fecha	Distrito	Lluvia diaria	5 días Acumulados	10 días Acumulados	15 días Acumulados
11/12/1993	Chilca	9.4			
11/12/1993	El Tambo	9.4			
06/02/1997	Sicaya	17.5	28	32.5	58.9
11/11/1997	El Tambo	16.2	27.3	48.5	58.1
15/12/1997	Huancayo	17.2	20.3	48.8	49.4
16/02/2001	Huancayo	19.3	59.1	62.2	75.5
15/03/2001	-	15.5	31.1	52.8	78.3
22/03/2001	Huancayo	16.7	57.1	81.8	111.2
24/03/2009	El Tambo	10.3	28.7	35.6	52.9

Fuente: Tomado de (IGP, 2012).

Por otro lado, en los registros de lluvias de la estación Shullcas, solo se pueden observar registros de lluvia de 10 mm/día para el distrito Huancayo y de 11,6 mm/día para el distrito el

Tambo, en cuanto al distrito de Chilca de acuerdo a la información consultada solo hay un registro de lluvia diaria de 17,1 mm. En cuanto a los registros que presentan mayor intensidad se registraron en el distrito de Huancayo el 27 de diciembre de 2002, con intensidades de 28,7 mm/día y acumulados de 52,5 mm/5 días; 93 mm/10 días y 116,3/15 días. Las precipitaciones acumuladas y diarias tuvieron mayor intensidad en los casos evaluados (IGP, 2012).

Tabla 17. Registros de lluvias intensas estación Shullcas.

Tiempo	Noticia	Registros de Lluvias Estación Shullcas			
Fecha	Distrito	Lluvia diaria	5 días Acumulados	10 días Acumulados	15 días Acumulados
27/12/2002	Huancayo	28.7	52.5	93	116.3
24/03/2009	El Tambo	21.2			
13/01/2006	Chilca	17.1			
11/11/1997	El Tambo	11.6	23.8	58.6	78.5
22/03/2001	Huancayo	10.3			
22/12/2002	Huancayo	10	40.5	63.8	65.3

Fuente: Tomado de (IGP, 2012).

Las estaciones de San Lorenzo y Jauja se encuentran situadas en la provincia de Jauja, en la cual se pueden identificar cinco distritos que fueron afectados por lluvias intensas según la fuente de noticias. De acuerdo a los registros de PPT de la estación San Lorenzo el día 24 de febrero de 1998, en el distrito San Lorenzo se registró la mayor intensidad de PPT diaria con un valor de 10,8 mm/día. Sin embargo, en los distritos de Apata y Parco se presentaron cambios bruscos en el acumulado de PPT, en el caso del distrito Apata la PPT presento una variación de 1,2 mm/día a 40 mm/5 días y para el distrito de Parco la PPT presento un cambio de 2,4 mm/día a 36,6 mm/5 días. Lo anterior indica que la noticia fue alusiva más a la apreciación de la población, ya que el registro se asocia más a las lluvias de larga duración y baja intensidad y no exactamente a una lluvia intensa.

Tabla 18. Registros de lluvias intensas estación San Lorenzo.

Tiempo	Noticia	Registros de lluvias Estación San Lorenzo			
Fecha	Distrito	Lluvia diaria	5 días Acumulados	10 días Acumulados	15 días Acumulados
16/01/1970	Apata	1,2	40	68,8	74,7
02/03/1973	Parco	2,4	36,6	43,2	43,2
08/04/1973	-	0	24	24	24
17/10/1973	-	3,3	19,4	26,7	38,7
24/02/1974	-	12	28,5	46,4	66,1
24/02/1974	-	12	28,5	46,4	66,1
26/09/1996	Jauja	4,6	6,6	6,6	6,6
08/11/1997	-	0	15	17,5	17,5
24/02/1998	San Lorenzo	10,8	17	28,1	50,7
17/01/2001	Jauja	2	23	52	57
15/04/2001	Acolla	0	12	22	22

Fuente: Tomado de (IGP, 2012).

De acuerdo a los registros de noticias locales, el día 24 de diciembre de 2009 se presentaron tres eventos que afectaron los distritos de Acolla, Sausa y Yauyos. Se podría tratar, para los distritos de Sausa y Yauyos, del mismo fenómeno considerando su cercanía, y uno diferente para el distrito de Acolla. En cuanto a los otros registros de la estación Jauja, el distrito de Apata presenta en la fecha 16 de enero de 1970 un registro de 19,4 mm/día el cual podría asociarse con una lluvia intensa y no prolongada. Por otra parte, la noticia del 28 de febrero de 1981 en el distrito de Acolla, muestra que en la fecha de la noticia no hubo registro de PPT, por otro lado, la cantidad de PPT acumulada es alta registrando 49 mm/5 días, 94,9 mm/10 días y de 103,9 mm/15 días; lo que significa que durante estas fechas las lluvias fueron prolongadas

Tabla 19. Registros de lluvias intensas estación Jauja.

Tiempo	Noticia	Registros de lluvias Estación San Lorenzo			
Fecha	Distrito	Lluvia diaria	5 días Acumulados	10 días Acumulados	15 días Acumulados
16/01/1970	Apata	19,4			
02/03/1973	Parco	2,8	37,4	57,5	70,2
08/04/1973		0	24,9	27,4	34,4
17/10/1973		7,2	28,3	43,6	48,5
24/02/1974		9,8	30,9	61,4	85,8
24/02/1974		9,8	30,9	61,4	85,8
10/10/1980	Jauja	7,5	24	56,5	59
28/02/1981	Acolla	0	49	94,9	103,9
02/02/1982	Curicaca	0	24	58,5	79
12/02/1993	Sincos	7,1	25,8	78,6	97,8
26/09/1996	Jauja	0	12,7	15,8	15,8
08/11/1997		0	18,5	33,5	34,6
24/02/1998	San Lorenzo	0,6	11,4	15,2	32,2
17/01/2001	Jauja	0,2	13,6	41,5	64,7
15/04/2001	Acolla	0	3,5	30,8	31,3
24/12/2009	Acolla	36,9	45,7	65,1	91,7
24/12/2009	Sausa	36,9	45,7	65,1	91,7
24/12/2009	Yauyos	36,9	45,7	65,1	91,7

Fuente: Tomado de (IGP, 2012).

En la provincia de Huancayo la estación que dispone de una mejor trazabilidad de registros de noticias de lluvias intensas es la de Viques. De acuerdo a las noticias que reportan lluvias intensas, se identificó que el distrito de Huancayo en el evento del día 28 de enero de 1998 registró una intensidad de lluvia alta de 19,4 mm/día. Seguido por el evento en el distrito de El Tambo el día 2 de febrero de 1994 que registró un valor de 16,9 mm/día. En el distrito de Chilca para el evento del 18 de enero de 1991 se registró una intensidad de lluvia de 14,2 mm/día; sin embargo, cabe destacar que dentro del registro de noticias para la estación Vilques el día 1 de febrero de 1996 se presentó un evento relacionado con una intensidad de lluvia de 26,8 mm/día en el distrito de Pariahuanca, una de las más altas registrados por esta estación.

Tabla 20. Registros de lluvias intensas estación Viques.

Tiempo	Noticia	Registros de Lluvias Estación Viques			
Fecha	Distrito	Lluvia diaria	5 días Acumulados	10 días Acumulados	15 días Acumulados
01/01/1973		30	31,3	32,4	32,7
17/01/1973	Chicche	15	132	174	238
24/02/1982	Huancayo	10	40	59,5	104,7
12/03/1984	Huancayo	9,7	20	46,9	83,2
18/01/1991	Chilca	14,2	14,2	14,2	14,2
18/01/1991	El Tambo	14,2	14,2	14,2	14,2
18/01/1991	Huancayo	14,2	14,2	14,2	14,2
12/02/1993	Huancayo	8,3	69,2	138,6	189,3
12/11/1993		11,6	53,2	95,4	110,6
11/12/1993	Chilca	8,1	21,6	69,8	143,5
11/12/1993	El Tambo	8,1	21,6	69,8	143,5
02/02/1994	El Tambo	16,9	90,9	185,4	204,6
15/02/1995		9,4	29,7	48,2	56,4
21/02/1995		14,3	37,6	75,6	98
14/03/1995	El Tambo	14,6	46,3	106,2	111,6
21/12/1995		23,9	32,2	45,8	49,4
01/02/1996	Pariahuanca	26,8	69,5	143,3	181,9
28/01/1998	Huancayo	19,4	44,5	83,9	84,7
16/02/2001	Huancayo	9,8	51,2	51,2	79,3
15/03/2001		18,4	67,5	73,6	73,6
22/03/2001	Huancayo	16,2	40,2	79,7	125,8
07/02/2001		9,2	49,9	74,1	107
13/01/2006	Chilca	9,8	16,6	42,9	49,4

Fuente: Tomado de (IGP, 2012).

De las 9 estaciones analizadas, los datos de PPT de 6 de estas se utilizaron para establecer los umbrales de PPT, igualmente se ha considerado la proximidad de las estaciones meteorológicas con respecto a los distritos identificados, teniendo en cuenta la variabilidad alta de la lluvia, ya

que una estación no puede obtener el registro de lluvias que ocurran a distancias de 2 km o más. Sin embargo, en este análisis consideraron también a los distritos que se encontraban distantes de las estaciones meteorológicas ya que podrían aportar información importante, ya que cómo antecedente se consideró la PPT registrada y la no registrada. Dado lo anterior los siguientes umbrales de PPT fueron los sugeridos para cada estación, estación Huayao 15 mm/día, estación Ingenio 9,9 mm/día, estación Viques y Shullcas 10 mm/día, estación Santa Ana 9,4 mm/día, estación San Lorenzo 10,8 mm/día y estación Jauja con 7,1 y 7,5 mm/día.

Evento en la quebrada Ccochacay o Mayunmarca.

Por otro lado, históricamente en el Valle del Río Mantaro se han presentado fenómenos de REMA de importantes magnitudes. Los más famosos han sido en el año 1930 el de Quichicane frente a Quicchuas, en octubre de 1945 el del Cerro Cóndor Serija en la primera curva del Mantaro y en enero de 1972 el de Anco. Más recientemente y con repercusiones importantes se encuentra el fenómeno ocurrido en la quebrada Ccochacay o Mayunmarca.

En el documento *“Mecánica del Deslizamiento de Ccochacay en el río Mantaro”*, Taype Ramos (1976) describe lo siguiente:

En la quebrada Ccochacay o Mayunmarca se originó un DESL que represó el río Mantaro, a la altura del Km. 56 de la vía La Mejorada - Ayacucho, departamento de Huancavelica en los Andes Centrales del Perú. El evento se inició a las 20,45 horas del día 25 de abril 1976 y duró alrededor de 3 minutos, desarrollando una velocidad de 140 km/h; causó la pérdida de más de 450 vidas y daños materiales considerables. Este evento fue de gran importancia por su magnitud y es único en el histórico de los DESL que ha superado a los ocurridos en todo el territorio peruano.

“La zona de arranque del deslizamiento se originó en el Cerro Cussuro a 4.200 msnm y avanzó sobre una pendiente promedio de 30° por una longitud de 6 km. hasta llegar al lecho del río Mantaro a 2.600 msnm. El material de deslizamiento relleno por completo el cauce del río, estimándose un volumen de 1.600'000.000 m³, con las siguientes dimensiones: 4 km. de longitud, 2 km. de ancho y 170 m. de altura en el cuello de la menor depresión del terreno. Las causas que originaron el deslizamiento fueron las fuertes precipitaciones pluviales de la región, la presencia de manantiales en la cuenca de Ccochacay y las filtraciones de las lagunas de Minascocha, Aljacocha, Yanacocha y del río Pumaránra, el buzamiento de los estratos sedimentarios en favor de la pendiente y la existencia de una falla transversal al río Mantaro siguiendo el curso de la Quebrada Ccochacá, esta falla fracturó intensamente las rocas de los grupos Excelsior y Mitu, lo que ocasionó que al debilitarse la resistencia de los materiales aluviales incoherentes y el substratum sedimentario a causa del esfuerzo cortante, los materiales perdieron la coherencia y se desplazaron por gravedad pendiente abajo. El embalse aguas arriba del dique natural (Huaccoto) tuvo una longitud de 30 km. por un ancho promedio de 600 a 700 m. y un volumen aproximado de 670'000.000 m³. Los daños ocasionados por el deslizamiento de Ccochacay o Maytinmarca han sido cuantiosos, representados en bienes materiales y obra de Ingeniería Civil como carreteras, y en las tierras de cultivos de ambas márgenes del Mantaro por las aguas del embalse.

El estudio efectuado en el deslizamiento de Ccochacay y alrededores ha permitido llegar a las siguientes conclusiones, el deslizamiento de Ccochacay, que embalsó el río Mantaro en los Andes

Centrales fue de gran magnitud e importancia en el territorio y en el mundo de acuerdo a la estadística mundial. Duró 3 minutos y causo la pérdida de vidas de más de 450 personas y daños materiales cuantiosos. En la quebrada Cochacay se han identificado rocas cuyas edades van desde el Paleozoico inferior (Grupos: Excélsior y Mitu) hasta el Cuaternario Reciente. La mecánica del deslizamiento fue del tipo traslacional o progresivo. Las causas que originaron el fenómeno fueron las fuertes precipitaciones pluviales, las infiltraciones de los manantiales y lagunas. El volumen del material deslizado que colmató el cauce del río Mantaro, se estima en 1.600'000.000 m³ y el volumen de agua embalsada de 670'000.000 m³ (hasta el 6 de junio de 1974). Las condiciones geológicas, geomorfológicas y climáticas de la región condicionan la posibilidad de la ocurrencia de fenómenos similares. El deslizamiento desencadenó otros eventos que afectaron las poblaciones aledañas, por ejemplo, el embalse inundó tierras de cultivo y obras de ingeniería como carreteras y puentes. Después del desembalse del río Mantaro las aguas arrasaron tierras de cultivo en las partes bajas y obras de ingeniería como puentes, dejando gigantescos daños materiales. De acuerdo al trabajo realizado, el autor sugiere realizar un estudio geológico integral de la estabilidad de taludes del curso medio del río Mantaro, es decir del Izcuchaca hasta la primera curva del Mantaro, para evitar o contrarrestar futuros desastres. Se recomienda a los organismos competentes prestar mayor atención a las recomendaciones de los estudios geotécnicos, que se realizan como medida de prevención, los estudios de carácter geodinámico no sólo debe efectuarse en la mencionada zona, sino a nivel nacional, por ser este territorio susceptible a fenómenos similares (Taype Ramos, 1976, págs. 73-90)".

6.2.2 Cuenca del Río Maipo - Chile

Chile, es un país localizado en el hemisferio sur, su territorio tiene una longitud de más de 4.300 km de norte a sur lo que lo cataloga como el país más largo del mundo, Santiago es su capital y la ciudad más poblada. Limita al norte con Perú, al noreste con Bolivia, al este con Argentina, al sur con el Antártico y al oeste con el océano Pacífico. Geográficamente se encuentra conformado por tres zonas Chile Continental, Chile Insular y el Territorio Chileno Antártico.

La zona Chile Continental es una franja que recorre la costa occidental del cono sur, esta franja alcanza una longitud de 4.270 km, y su ancho varía entre los 90 km y los 445 km. El rango de altitudes varía desde la costa suroriental del océano Pacífico hasta las cumbres más altas de la CAND que corresponden a las divisorias de aguas. La zona de Chile Insular comprende varias islas volcánicas localizadas en el océano Pacífico Sur, esta zona se encuentra por su parte subdividida en Chile insular continental y Chile insular oceánico. La zona de Territorio Chileno Antártico corresponde a una zona del continente Antártico ubicada entre los meridianos 53°O y 90°O prolongándose hasta el polo sur, posee un área de 1.250.257,6 km² la cual se encuentra sometida a las disposiciones del Tratado Antártico. Debido a las características anteriormente mencionadas, Chile se identifica como un país tricontinental.

Orográficamente, el país se encuentra dominado por la CAND y su extensa línea costera, sin embargo, también se diferencian dos unidades que corresponden a la depresión intermedia y la cordillera de la Costa (CCOS), la cual presenta una altitud máxima que en algunos sectores supera los 2.000 msnm. La poca distancia que existe entre la CCOS y la CAND, le ha dado la connotación de país marítimo, el cual suele contar con los puertos como llaves y accesos para su inserción comercial con los demás países del mundo.

Respecto al clima, el tipo templado domina gran parte de la región central, no obstante *“la aridez del desierto, la HUMD de Isla de Pascua y el frío de los hielos del sur, convierten a Chile en un verdadero representante de la diversidad climática (Biblioteca Nacional de Chile, 2024)”*.

En cuanto a la geología, esta ha sido descrita en el Mapa Geológico de Chile escala 1:1.000.000 que publicó SERNAGEOMIN en 2002, donde se incluyen las coberturas cartográficas más relevantes. Por otra parte, *“los nuevos antecedentes geológicos reunidos en las regiones Metropolitana y de Los Lagos, han constituido la base para la línea de mapas geoambientales de SERNAGEOMIN, de inmediata aplicación en el ordenamiento y gestión territorial (SERNAGEOMIN, 2003)”*.

A continuación, se presenta la reseña de la geología contenida en el Mapa Geológico de Chile escala 1:1.000.000, donde se describen las unidades geológicas las cuales tienen valor regional con intervalos de edad.

Las unidades del Precámbrico, corresponden a protolitos de rocas metamórficas que afloran como láminas tectónicas en el Norte Grande, estas unidades corresponden a las únicas rocas precámbricas de Chile, sin embargo, en la porción cratónica del territorio antártico predominan rocas de esta edad y rocas del Paleozoico temprano.

En cuanto a las unidades de edad Ordovícico-Silúrico que se exhiben restringidamente en la precordillera al interior de Iquique corresponden a rocas de afinidad marina. Al interior de la

región de Antofagasta esta unidad de rocas se presenta en afloramientos más potentes constituidos por rocas de origen marino, volcánico y volcanoclásticas. Igualmente, rocas de esta edad se presentan al sur del salar de Atacama, en la precordillera a los 21°S y en la península Antártica las cuales se encuentran reducidas a afloramientos de rocas intrusivas.

Las rocas del periodo Devónico-Carbonífero están asociadas a primas de acreción las cuales constituyen la estructura interna del sector costero desde la frontera con Perú hasta los 38°S, más hacia el sur, estos prismas de acreción incluyen rocas de edades pérmicas a jurásicas. Rocas de esta edad también se encuentran expuestas al este de la cordillera Patagónica y corresponden a remanentes metasedimentarios que actualmente se interpretan como depositado en un margen pasivo.

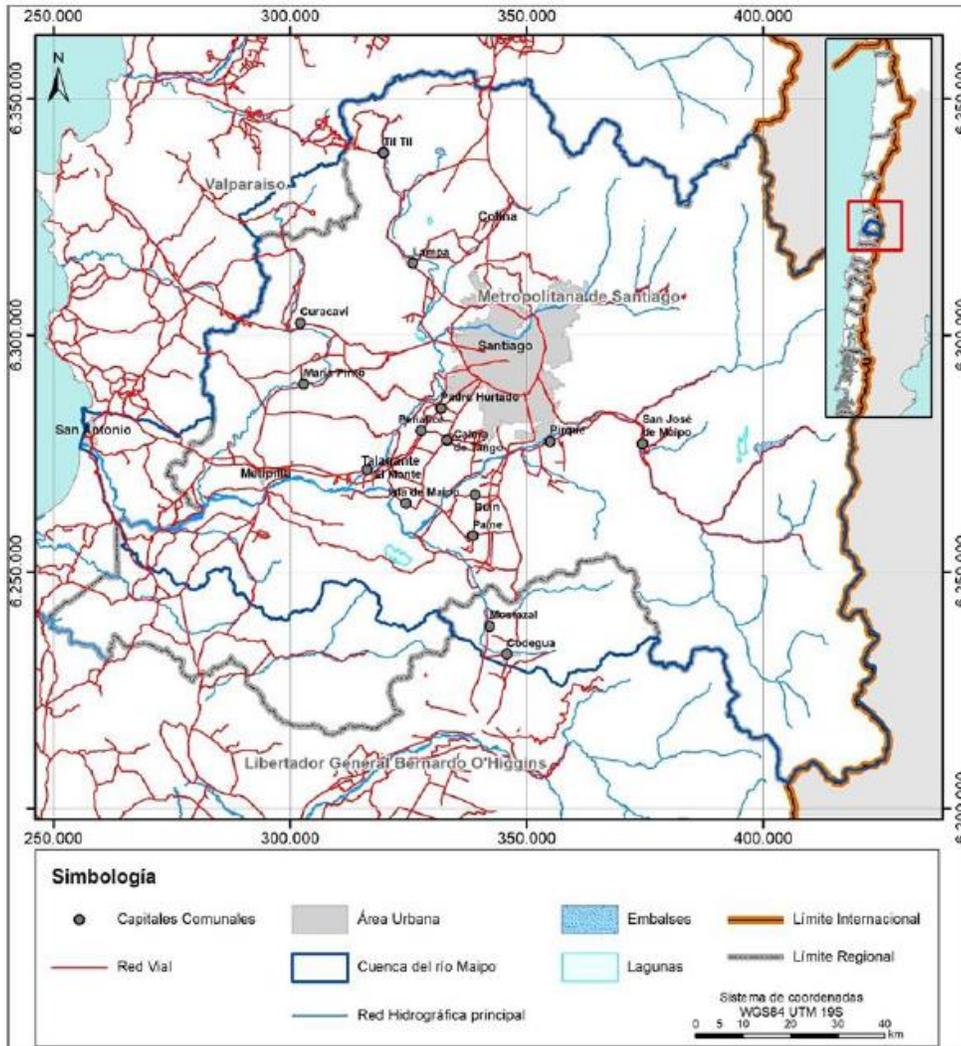
Para el periodo Carbonífero tardío a Triásico se presentan dos franjas de rocas plutónicas, la primera comienza a los 40°S y cruza al oeste hasta la cordillera de Nahuelbuta, donde se prolonga por la CCOS hasta los 33°S. La segunda franja, se localizada al este de la primera, se inicia a los 31°S y va hasta los 27°40' en una franja continua, esta se caracteriza por presentar facies volcánicas silíceas y hacia el norte son cubiertos por rocas mesozoicas-cenozoicas ocasionando que sus afloramientos se vuelvan más dispersos.

Las rocas del Triásico-Jurásico Inferior afloran como relleno de cuencas marinas híbridas de 'rift' de antearco entre los 37° y los 26° hacia el sector costero, hacia el norte a los 26°S el volcanismo bimodal aumenta, y hacia el este se pueden observar insuficientes afloramientos que contienen rocas de cuenca trasarco. En cuanto al periodo Jurásico Medio-Superior, está caracterizado por rocas volcánicas, volcanoclásticas y marinas que presentan ampliamente distribuidas. El periodo Titoniano-Cretácico Inferior, está representado por rocas sedimentarias de origen marino que se encuentran como depósitos de cuencas de intraarco y de cuencas de trasarco. Para el Cretácico Superior, se encuentran rocas relacionadas con las volcanitas subaéreas de Aisén y los depósitos continentales de fosas tectónicas nortinas, sin embargo, para la región de Chile central se evidencia una falta de depositación en este periodo.

El periodo Cenozoico, se encuentra caracterizado hacia el norte del país por extensos flujos de lavas o piroclásticos que lo recubren, igualmente gravas cenozoicas se encuentran recubriendo este sector, las cuales se asocian a la intensa erosión por levantamiento de la CAND, también es característico de este periodo la depositación de potentes depósitos piroclásticos y sedimentarios en cuencas de intraarco simultáneo a la construcción de un potente arco volcánico mioceno. El emplazamiento de plutones de edad mioceno son asociados a la actividad de los sistemas de fallas. Hacia la zona oriental del país las cuencas cenozoicas recolectaron principalmente depósitos fluviales durante el Paleoceno Superior y el Mioceno-Plioceno, que presentaron una intercalación marina durante el Oligoceno Superior-Mioceno Inferior. Estas sedimentitas fueron depositadas principalmente en cuencas de antepaís y al este de una cadena magmática, en parte contemporáneamente con basaltos de 'plateau' del Eoceno y Mioceno-Plioceno. Muchos volcanes cuaternarios se distribuyen al largo del país de forma discontinua, y la mayoría se desarrollan en el Altiplano, depósitos lahárico y piroclásticos producto de la actividad volcánica rellenan la depresión central entre Santiago y Temuco, mientras que sedimentos asociados a glaciares lo hacen más al sur (SERNAGEOMIN, 2003).

6.2.2.1 Cuenca del río Maipo - CMAI

Figura 19. Mapa de ubicación de la CMAI, Chile.



Fuente: Tomado de (DGA, 2021).

La CMAI se encuentra emplazada en la región central de Chile, cubre más del 90% del área de la región Metropolitana, el 4% del área de la región de Valparaíso y un 5% del área de la región del Libertador General Bernardo O'Higgins. El afluente principal de esta cuenca corresponde al río Maipo el cual fluye entre las regiones Metropolitana y de Valparaíso hasta desembocar en el océano Pacífico. En la laguna Nacimiento ubicada en la falda del Volcán Maipo nace el río Maipo el cual aumenta su caudal a medida que recibe las aguas de sus afluentes los ríos Cruz de Piedra, Alvarado y Argüelles, igualmente recoge las aguas de los ríos Volcán, Colorado y Yeso. En la cuenca de Santiago, el río Mapocho que atraviesa Santiago y entrega sus aguas al río Maipo, los ríos Angostura, Río Clarillo (Maipo) y el río Puangue, así como los esteros Cholqui y Popeta corresponden a otros afluentes del río Maipo. En las cercanías de la localidad de Llolleo, en la Región de Valparaíso, el río Maipo desagua en el océano Pacífico tras recorrer 250 km. Esta cuenca drena unos 15.380 km², y se encuentra dividida en 5 subcuencas y 37 subsubcuencas. El río Maipo

posee un caudal promedio de 92,3 m³/s, y sus aguas provienen tanto del deshielo cordillerano como de las precipitaciones invernales, su nombre proviene del mapudungun maipun que significa trabajar la tierra; arar.

Cabe resaltar algunas de las características de las diferentes subcuencas en las que se encuentra dividida la CMAI.

La cuenca superior corresponde a la parte alta del río Maipo la cual se halla encajonada por macizos, cerros y farellones, y representada por El Cajón de Maipo ubicado en la zona suroriental de la Región Metropolitana y que se caracteriza por ser un cañón andino. Ríos como el Yeso, el Volcán y el Colorado, así como los esteros Manzanito, San Gabriel, el Sauce, Coyanco, el Manzano y San José confluyen en este sector de la cuenca.

La depresión intermedia se encuentra rodeada por dos cadenas montañosas que componen alrededor del 80% del área del valle del Maipo, cruza longitudinalmente el país siguiendo la trayectoria del río desde que abandona las últimas estribaciones de la CAND hasta su cruce a través de la CCOS. El clima en el valle es templado cálido, y durante los meses de diciembre a marzo se caracteriza por veranos secos.

Los principales afluentes de la subcuenca superior corresponden a los ríos Colorado, Olivares, Yeso y Volcán. En toda la subcuenca se puede observar un régimen nival predominante, manifestando mayores caudales en diciembre y enero debido a los deshielos cordilleranos, mientras que en los meses desde junio hasta agosto se registran los menores caudales.

En la subcuenca media, se distingue que el uso agrícola de sus aguas se realiza de una manera intensa, esta subcuenca no posee estaciones para medir el caudal. La cuenca inferior, corresponde a la superficie drenada que se ubica desde la unión con el río Mapocho hasta la salida en el océano pacífico.

6.2.2.1.1 Geología

La CMAI presenta una geología caracterizada por rocas graníticas paleozoicas y mesozoicas, rocas volcánicas y sedimentarias cretácicas, además se presentan rellenos de sedimentos fluviales y fluvioglaciales, y depósitos de cenizas volcánicas.

Las formaciones que se distinguen en la cuenca son:

- Para el Mioceno inferior- medio; se presentan rocas relacionadas a complejos volcánicos que se encuentran en parte erosionados y secuencias volcánicas conformadas por lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basáltica a dacíticas que se ubican especialmente hacia el sector de río Olivares.
- El Neocomiano se caracteriza por secuencias sedimentarias marinas y volcánicas, lavas andesíticas y basálticas, brechas y tobas volcánicas y rocas sedimentarias como areniscas y calizas fosilíferas que se ubican en el sector de la junta entre el río Maipo y río Mapocho principalmente.
- Para el periodo Cretácico inferior-alto; se presentan secuencias y complejos volcánicos continentales, lavas y brechas andesíticas y basálticas, rocas ígneas piroclásticas de

composición andesítica a riolítica que se encuentran localizadas principalmente en el sector de río Clarillo.

- El Jurásico superior- Cretácico inferior; se encuentra caracterizado por secuencias sedimentarias marinas litorales o plataformales, donde se presentan rocas calizas, areniscas calcáreas, areniscas, lutitas y coquinas localizadas esencialmente en el nacimiento del río Maipo.

Secuencias de lavas y formaciones carbonatadas se encuentran aflorando entre el nacimiento del río Maipo hasta la confluencia con el río Colorado y desde el sector de río Colorado hasta el Estero Colina. En cuanto a la parte alta del cauce del río Olivares, se presenta una leve influencia de andesitas. El río Mapocho y Maipo, se encuentran influenciados por la presencia de rocas andesíticas, desde la junta con río Colorado hasta la intersección con el Mapocho. En la cuenca la influencia volcánica es variada y está representada por la actividad de los volcanes Tupungato, Marmolejo, Tupungatito, San José y Maipo, estos últimos tres en la actualidad se encuentran activos, de los cuales el volcán Tupungatito presenta fumarolas permanentes, mientras que el volcán Maipo no ha presentado erupciones en los últimos dos siglos (DGA, 2004).

6.2.2.1.2 *Geología Estructural*

A raíz del proceso de subducción de las placas de Nazca y Antártica bajo la placa Sudamericana, Chile es considerado como una zona altamente sísmica. En cuanto al marco estructural de la cuenca, esta presenta diversas características de oeste a este, según se observa en terreno, debido al mayor grado de deformación que muestran las formaciones hacia el sector oriental del área del Cajón del Maipo.

En el límite entre la Depresión Central y la Cordillera Principal, en la parte más occidental, *“las rocas se encuentran fuertemente plegadas y falladas, observándose de oeste a este un pliegue sinclinal y anticlinal, ambos apretados y asimétricos con ejes de orientación NS a NNE, los que en algunos casos son cortados por fallas inversas a lo largo de su eje. Estos pliegues se continúan hacia el sur del río Maipo, observándose que sus flancos occidentales llegan a ser incluso verticales (Sellés y Gana, 2001)”*. La deformación en este sector está profundamente relacionada al sistema de Falla San Ramón. *“Al este del Cerro de Ramón y hasta la franja de los intrusivos del Mioceno Medio – Superior la secuencia se encuentra plegada suavemente, formando un sinclinal y un anticlinal de longitudes de onda kilométricas y de pequeña amplitud, con ejes orientados aproximadamente norte-sur. Al este de los intrusivos del Mioceno Medio – Superior, se presentan las rocas sedimentarias fuertemente deformadas afectadas por un sistema de fallas y pliegues de vergencia oeste que corresponden a retrocorrimientos asociados a la Falla El Diablo (Fock, 2005)”*. Esta falla, situada en el límite entre la Cordillera Principal Occidental y Oriental, corresponde a *“la estructura más occidental de la Faja Plegada y Corrida del Aconcagua en este sector, la cual marca un cambio en el estilo y vergencia de deformación en la Cordillera Principal, que afecta principalmente a rocas mesozoicas (Geoaprendo, 2024)”*.

“Hacia el borde sur de la CMAI el dominio estructural corresponde a un relieve montañoso abrupto, disectado por valles encajonados de dirección predominante Noroeste, constituido por intrusivos jurásicos y cretácicos y por rocas volcánicas y sedimentarias mesozoicas que conforman una secuencia monoclinial de rumbo Norte-Sur a Noroeste y una inclinación promedio de 25°-35° hacia el Este. Según Wall et al. (1996), las estructuras principales corresponden a lineamientos y fallas que en general coinciden con el lineamiento

de los valles encajados, como también a estructuras menores, lineamientos y fallas inferidas que se orientan con rumbo Nor-Noreste y Nor-Noroeste. Selles y Gana (2001) coinciden en la orientación de estas fallas, las cuales han afectado al conjunto de rocas volcánicas de la CCOS y a los intrusivos del Cretácico Superior que las atraviesan. También reconocen numerosos lineamientos y fallas de dirección Noroeste-Sureste, de gran extensión y coincidentes con los bordes de la depresión de la laguna de Aculeo. Estas estructuras se interpretan como pertenecientes al conjunto de fallas que se extienden hasta la costa y de la cual forma parte la falla Melipilla. Los autores mencionados ponen especial interés en la Formación Las Chilcas, en la cual reconocen importantes regímenes intensivo-compresivos de deformación, que habrían tenido lugar al comienzo del Cretácico Superior, probablemente relacionados con el alzamiento de la CCOS (Soto, Castro, Rodolfi, Maerker, & Padilla, 2006)”.

6.2.2.1.3 Geomorfología

La colisión entre la placa oceánica Nazca, que subduce la placa continental Sudamericana es la responsable de la configuración geomorfológica de la CMAI. Durante este proceso se generó el volcanismo, las fallas geológicas y sismicidad en la zona, y se dio lugar a la formación de un arco volcánico continental, dividido en cuatro unidades morfoestructurales que determinan la manera en que los diferentes cursos de agua se mueven en la cuenca, estas unidades son: Planicie Fluvio Marina, CCOS, Depresión Intermedia y CAND. (Ecosistemas, 2021).

La cuenca alta presenta una morfología netamente glacial y periglacial que ha sido modelada por procesos fluviales más que todo en las partes medias y bajas, se encuentra caracterizado por valles respaldados por laderas de pendientes entre 28° y 32°, altitudinalmente varía entre los 1.000 y 6.500 msnm, la mayor cantidad del área se encuentra entre los 3.600 msnm. La erosión glacial es la responsable del modelado del relieve, generando cerros inclinados de laderas abruptas al lado de cajones glaciares profundos, también se generan importantes valles colgados emplazados hasta más de cien metros encima de los fondos de los valles mayores. Otro de los factores importantes del modelado han sido las laderas y quebradas que caen en forma perpendicular al eje del río principal.

Otras geoformas importantes corresponden a *“los conos de cineritas que han fosilizados algunos depósitos aluviales y coluviales. Posteriores fenómenos de erosión y soliflucción periglacial han permitido que el río Maipo capte como retomada de carga gran parte de las efusiones eólicas del volcanismo local. Este mismo volcanismo ha sido el causante de la destrucción y desaparición de las morrenas que debieron ocupar los valles altos de este sistema fluvial (Municipalidad de San José de Maipo, 2010)”.*

Geomorfológicamente, *“en la cuenca alta del río Maipo, se pueden observar unidades glaciales como morrenas laterales, de fondo y llanuras glaciofluviales. Los valles que se adentran en la cuenca, poseen laderas con alta gradiente, rasgos de disgregación periglacial y escasa cobertura vegetal, esto demuestra lo severo del clima de altura (Videla Giering, 2013)”.* En cuanto a la geomorfología fluvial de la cuenca, *“en la parte alta los sedimentos glaciofluviales, se disponen en niveles aterrazados ocupando el fondo de los valles glaciales, a medida que se desciende en altura estos varían entremezclándose con unidades de terrazas fluviales. En cuanto a la parte baja de la cuenca, la característica más importante, es que tanto el río Maipo como el Mapocho, al atravesar el llano central de la cuenca presentan un cauce ancho con presencia de bancos con material de gravas y arenas, dándoles el carácter de ríos anastomosado (DGA, 2004)”.*

6.2.2.1.4 Cobertura vegetal y uso del suelo

De acuerdo a la identificación del uso actual de suelo para la generación de una cobertura en la CMAI, en el marco del proyecto “Análisis oferta hídrica y su impacto en la agricultura, zona centro” ejecutado por CIREN para la Comisión Nacional de Riego, CNR (2022), se pudo determinar que la cobertura vegetal, en la CMAI, está representada de la siguiente manera, el 55,4% praderas, matorrales, bosques y plantaciones forestales, 14,5% áreas desprovistas de vegetación, 14,1% a terrenos agrícolas, 7,6% áreas artificiales, 6,6% nieves y glaciares, 1% humedales y el 0,8% a cuerpos de agua (MINAGRI, 2024).

En cuanto a los usos de suelo que predominan en la CMAI, corresponden a praderas y matorrales que ocupan un 32,6%, seguidos de bosques con 22,1%, áreas desprovistas de vegetación con 14,5% y terrenos agrícolas con el 14,1%; y las plantaciones forestales ocupan un 0,8%. En cuanto a las áreas artificiales, estas ocupan la mayor parte de las cuencas baja y media con un 7,6%. En relación con cuerpos de agua y humedales estos ocupan un 0,8% y 1,0% respectivamente. Por otra parte, un 6,6 % de los terrenos en la cuenca alta corresponden a nieves eternas y glaciares, resaltando la influencia de la nieve que existe sobre el régimen hidrológico de la cuenca.

6.2.2.1.5 Pendiente

Teniendo en cuenta los estudios cartográficos que se han adelantado en la cuenca, se puede determinar que gran parte de la misma presenta una clasificación de pendientes entre 6,1°-15° y 15,1°- 30°, y pendientes que superan los 30°. Según Delgado (2007), cuando las cuencas sobrepasan los 25°, presentan condiciones para generar caídas, avalanchas, DESL, flujos y arroyada.

La parte alta de la cuenca se distingue por fuertes valles encerrados, con pendientes entre los 28° y los 32°, mientras que las pendientes con menor superficie en la cuenca corresponden a pendientes bajas con valores de 0-1° y de 1,1-3°, ubicadas en el fondo del valle cerca del curso principal de la cuenca, las bajas pendientes muestran el bajo nivel de inclinación que posee la cuenca (Urzúa Flores, 2022).

6.2.2.1.6 Clima

“Chile presenta una serie de variables topográficas, latitudinal y altitudinal, que permiten describir el comportamiento de las variables hidrológicas de PPT. Las precipitaciones tienden a aumentar con la latitud y altitud (Quintana & Aceituno, 2006) y, se ven influenciadas por la VC presente en el territorio chileno correspondiente al fenómeno del Niño – Oscilación del Sur (ENSO), Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), Oscilación de Madden y Julian (MJO) y la Oscilación Antártica (AAO) (Valdés-Pineda, Cañón, & Valdés, 2018)”. Se pueden diferenciar tres ciclos de PPT anual, uno de bajas precipitaciones entre los 200 y 600 mm/año que se presentan en el Altiplano a una altura sobre los 3.000 msnm, mientras que en las zonas de menor altitud prevalece un modelo de aridez extrema hasta los 27°S. Un ciclo anual bien definido conocido como clima mediterráneo que se presenta en la zona central y se caracteriza por presentar el peak de precipitaciones en invierno y valores más bajos en

verano, y un ciclo determinado por la presencia de precipitaciones durante todo el año, alcanzando los 5.500 mm/año, el cual se presenta en la zona Austral (Valdés-Pineda, y otros, 2014).

Igualmente, en la CMAI se pueden identificar dos tipos de climas, un clima Templado Mediterráneo que *“se caracteriza por una estación seca prolongada con máximas que superan los 30°C en algunos sectores y ausencia de precipitaciones en los meses de verano (diciembre, enero, febrero) y en los meses de invierno (junio, julio, agosto) con presencia de precipitaciones y temperaturas mínimas que caen incluso bajo o cercanas los 0°C, que se manifiesta prácticamente en toda el área, y el clima Frío de Altura que se localiza en la CAND por sobre los 3.000 msnm, y se distingue por temperaturas menores de 0°C y precipitaciones sólidas que permiten la acumulación de nieve y hielo (DGA, 2004)”*. Las cantidades de PPT fluctúan dentro de la cuenca, *“en el sector costero los valores de PPT alcanzan 404 mm/año, en tanto que en el sector centro de la cuenca (estación Quinta Normal) en los sectores de Santiago se registran valores entorno a los 300 mm/año, por lo menos hasta el año 2004, mientras que en sectores más cordilleranos como San José de Maipo las precipitaciones aumentan alcanzando valores medios de 536 mm/año. En ambos casos las precipitaciones son mayores durante las temporadas invernales especialmente durante los meses de mayo, junio, julio y agosto (DGA, 2004)”*.

Como se mencionó, *“la PPT en la cuenca es altamente variable, con años lluviosos, eventos de lluvia de alta intensidad e importante presencia de sequías en los registros históricos. Esta condición de sequía se ha intensificado desde hace más de una década en todo Chile Central, siendo coherente con manifestaciones tempranas de escenarios de CC. Proyecciones de CC indican una fuerte tendencia a la disminución en las precipitaciones y un alza en las temperaturas, lo que generará importantes desafíos en materia de disponibilidad de agua y cambio en la temporalidad de los caudales (DGA, 2021)”*. Teniendo en cuenta lo anterior, para el año 2030 las precipitaciones podrán verse disminuidas en un 5 y 15%, posteriormente se intensificarían entre los años 2031 y 2050, lo contrario ocurre en la región de Magallanes, donde las precipitaciones se incrementarán debido a que la cota de la isoterma 0°C aumentará, lo que repercute en una disminución de la PPT nival. (MMA, 2017). Se proyecta que hacia fines de siglo XXI, según Garreaud et al. (2011) en las regiones del Maule y Los Lagos las precipitaciones disminuirán entre un 60 y 70%, mientras que para la zona austral estas incrementarían entre un 10 y 20% en comparación con el período 1960 - 1990 (Arriagada Sanhueza, 2021).

6.2.2.1.6.1 Precipitación

La PPT en la cuenca está caracterizada por la presencia de un ciclo anual de PPT bien marcado, donde se puede identificar un máximo invernal y un período estival con un monto considerablemente menor que va aumentando hacia el sur, el cual es conocido como clima templado mediterráneo. Las precipitaciones hacia la parte alta de la CMAI sobre los 1.500 msnm se pueden presentar en forma de nieve incrementándose de acuerdo con la altura, consiguiendo valores medios anuales de 536 mm y 640 mm. Sobre los 3.000 msnm se presenta un clima frío de altura debido a las bajas temperaturas y las precipitaciones, lo cual permite que se acumule nieve y mantengan las masas de hielo en las cumbres así como las quebradas de la alta cordillera (Videla Giering, 2013).

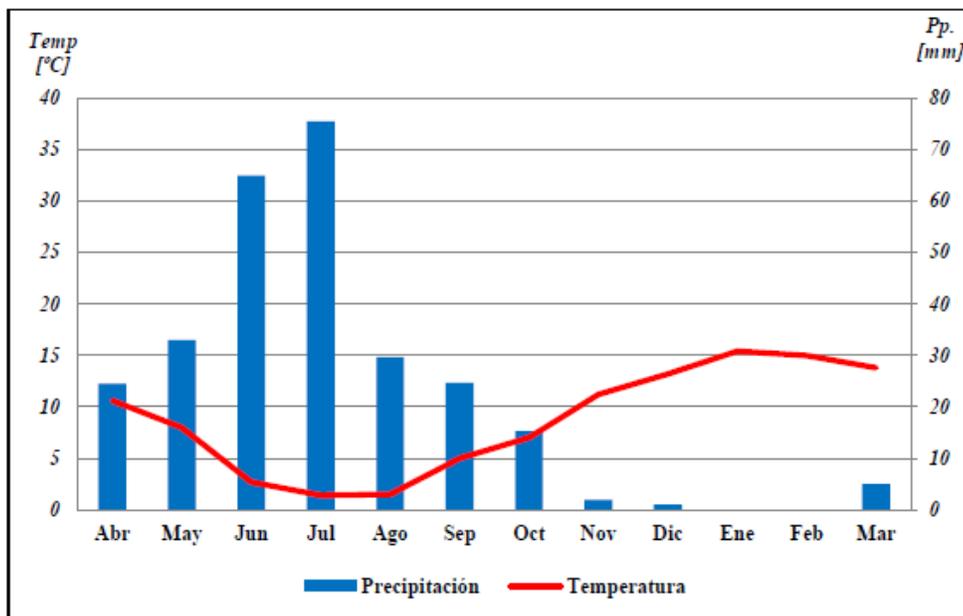
En la estación meteorológica Yeso Embalse, ubicada en la cuenca alta, se puede observar el comportamiento climático de este sector, donde la TEMP media mensual presenta un comportamiento decreciente a medida que aumenta la PPT media mensual, el cual es característico de inviernos lluviosos y veranos secos (Ecosistemas, 2021).

Tabla 21. Comportamiento de la TEMP y PPT media mensual a 1500 msnm – Período de análisis 2001- 2012. Estación San José del Maipo en Reten (valores en mm).

Variable	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Temperatura	10.6	8	2.7	1.4	1.5	5	7	11.2	13.2	15.4	15	13.8
Precipitación	24.5	33	65	75.5	29.7	24.7	15.3	2	1	0	0	5

Fuente: Tomado de (Videla Giering, 2013).

Figura 20. Comportamiento de la TEMP y PPT medias mensual a 2500 msnm – Período de análisis 2001- 2012. Estación Yeso Embalse.



Fuente: Tomado de (Videla Giering, 2013).

“En la zona de San José de Maipo, las precipitaciones se mueven entre los 1.200 y 2.000 mm/año, entre agua y nieve; especialmente en la época de invierno. Por esta razón es que la conservación de los recursos hídricos de la zona no deja de ser importante, dada la amplia posibilidad de precipitaciones. Por el factor altitud esto también incide, generando glaciares y hielos en las altas cumbres (Municipalidad de San José de Maipo, 2010)”.

Igualmente, teniendo en cuenta el factor altitud, es posible que en la parte alta de la cuenca se presenten eventos de lluvia sobre nieve (ROS, por sus siglas en inglés), los cuales juegan un papel importante en la generación de crecidas en cuencas montañosas. A nivel mundial, estos tipos de eventos han sido asociados a importantes inundaciones y avalanchas históricas, y se espera que, con las variaciones de PPT y TEMP asociadas al CC, la frecuencia e intensidad de los ROS en el futuro cambie. Los eventos de lluvia sobre nieve pueden provocar el derretimiento del manto nival, lo que, sumado a la PPT líquida añadida, puede derivar en importantes crecidas. Sin embargo, no todos los eventos de lluvia sobre nieve derivan en crecidas, lo que depende de la intensidad de la PPT y las condiciones del manto nival (Coumerme Gonzáles, 2021).

“En cuanto a los montos de las precipitaciones en el área comunal, registrados en las estaciones El Canelo y Planta Maitenes, éstas muestran una distribución continua a lo largo del año, con un aumento sustancial durante el período invernal (mayo - agosto), siendo junio el mes más lluvioso y febrero el mes con menor cantidad de precipitaciones del año, lo cual puede ser observado en la Tabla 22. Por las características del relieve local se desarrollan, principalmente en la estación invernal, precipitaciones del tipo orográfico en las que la masa de aire oceánico llega a la zona central y al ascender por el macizo Andino precipita al encontrarse con una masa de aire frío que genera la condensación. En contraposición, en época estival las masas de aire húmedo tienen origen en el país trasandino, cayendo mediante convección al territorio nacional. Importante destacar que el total de precipitaciones anuales supera en 15% al promedio general de la Región Metropolitana debido a las razones expuestas (Municipalidad de San José de Maipo, 2010)”.

Tabla 22. Comportamiento de la PPT media mensual para la comuna de San José del Maipo. Registros de las estaciones Los Maitenes y El Canelo

Precipitación Mensual (mm)													
Estación	Meses												TOTAL
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Los Maitenes	2,9	6,8	8,6	23	80	86	84	71	32	24	16	6,6	440,9
El Canelo	9,8	8,2	21	37	134	178	117	117	48	36	17	13	736

Fuente: Tomado de (Municipalidad de San José de Maipo, 2010).

En la cuenca media, donde se encuentra ubicada la estación Quinta Normal, las precipitaciones se distribuyen durante los meses de mayo a septiembre, marcándose un punto máximo de PPT durante los meses de junio y julio, lo anterior logra una evidente diferencia entre la estación seca y lluviosa, los que en promedio duran 8 y 4 meses respectivamente (Videla Giering, 2013).

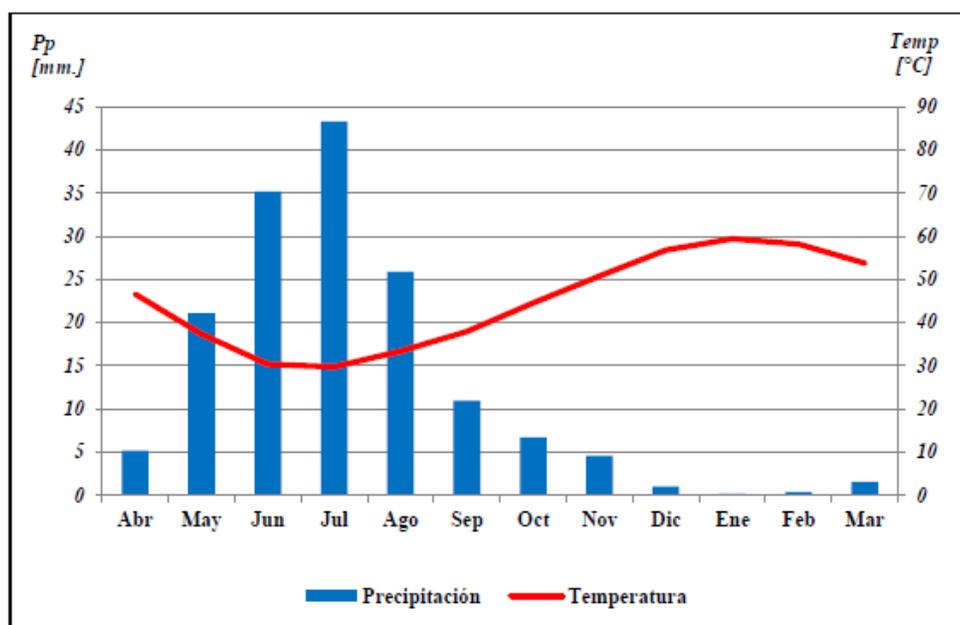
Igualmente, la influencia del océano en el sector de la depresión central y valles interiores de la CCOS, provoca una inversión térmica y que las precipitaciones disminuyan en los sectores aledaños a su ladera oriental (sotavento). Mientras que, en la parte alta de la cuenca y a medida que se gana altura (Barlovento), la CAND produce un efecto contrario, aumentando las precipitaciones. *“Esto provoca que existan dos áreas completamente diferentes entre el sector andino y la depresión intermedia (Videla Giering, 2013)”.*

Tabla 23. Comportamiento de la TEMP y PPT media mensual en la parte media de la cuenca – Período de análisis 2000-2012. Estación Quinta Normal (valores en mm).

Variable	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Temperatura	23.3	18.7	15.2	14.9	16.7	19	22.3	25.4	28.4	29.7	29.1	26.9
Precipitación	10.4	42.2	70.4	86.6	51.8	22	13.4	9.2	2.1	0.4	0.8	3.2

Fuente: Tomado de (Videla Giering, 2013).

Figura 21. Comportamiento de la TEMP y PPT media mensual en la parte media de la cuenca– Período de análisis 2000-2012. Estación Quinta Normal.



Fuente: Tomado de (Videla Giering, 2013).

Por otro lado, para poder conocer el comportamiento de la PPT en la parte baja de la cuenca, se tuvo en cuenta la distribución espacial de la PPT media anual durante el período 1990 - 2020 en las cuencas Costeras entre Maipo y Rapel, la que alcanza un valor de 500 mm/año. Y de acuerdo a la información de PPT para estas cuencas, la PPT media anual varía espacialmente entre los 412 y 619 mm, incrementándose en la dirección NO - SE (DGA, 2021). La PPT mensual promedio en dicho periodo, cuyo máximo se alcanza en el mes de junio y su mínimo en el mes de enero se observa en la siguiente tabla.

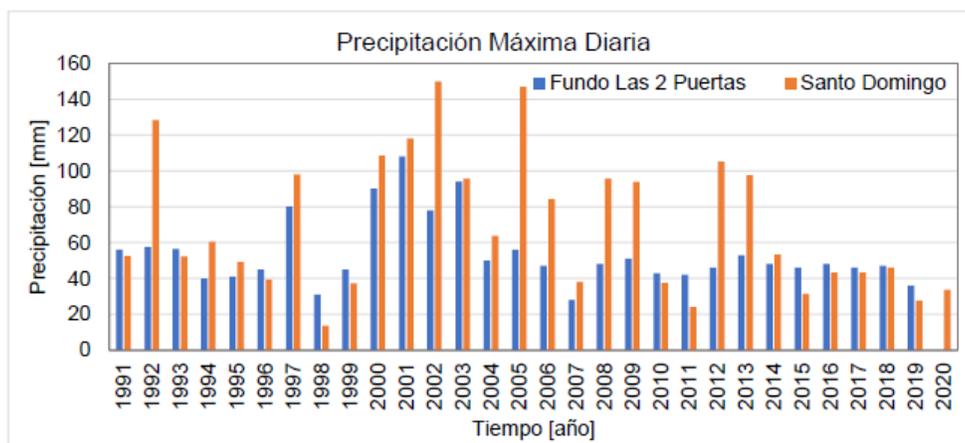
Tabla 24. PPT mensual promedio en las cuencas Costeras entre Maipo y Rapel – Período de análisis 1990- 2020.

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación [mm]	1	2	6	26	82	143	92	79	38	20	6	5	500

Fuente: Tomado de (DGA, 2021).

Respecto de las precipitaciones extremas, la Figura 22 presenta la PPT máxima diaria anual para las estaciones meteorológicas Fundo Las Dos Puertas (DGA) y Santo Domingo (DMC) entre los años 1991-2020. Se aprecian varios años con precipitaciones máximas diarias anuales superiores a 100 mm, particularmente en la estación Santo Domingo, las que tienen mayor probabilidad de producir INU, anegamientos y REMA (DGA, 2021).

Figura 22. PPT máxima diaria anual en las estaciones de las cuencas Costeras entre Maipo y Rapel.



Fuente: Tomado de (DGA, 2021).

6.2.2.1.7 Histórico de eventos

Históricamente, la parte alta de la CMAI se ha visto afectada por eventos de precipitaciones generando distintos tipos de REMA e INU, que han puesto en riesgo los recursos hídricos debido al aumento de turbidez de los caudales fluviales. De hecho, los antecedentes indican que en los últimos 50 años se han desarrollado 43 de estos eventos de REMA desencadenados por precipitaciones. Esto se debe a que su distribución espacial abarca áreas con diferentes características geológicas y geomorfológicas, lo que hace suponer una importante variabilidad de los factores condicionantes para la generación de estas amenazas (CIGIDEN, 2023).

Además, es importante tener en cuenta que las lluvias anuales se alteran significativamente en función de la ocurrencia de años con fenómenos como el Niño y Niña. “Durante el primero, pueden superar los 800 mm anuales y originar aluviones (ALUV) e INU, como ocurrió en mayo de 1993, cuando lluvias cálidas registradas a mediados del otoño caídas sobre la nieve generaron una enorme descarga de agua y sedimentos desde la alta cordillera, arrasando con barrios completos y causando numerosas víctimas. El fenómeno aluvional provocó el corte del abastecimiento de agua potable para Santiago. En febrero del

2017, ocurrió otro evento aluvional en 8 cauces (quebradas) del Cajón del Maipo, con varios fallecidos, puentes cortados, y corte del suministro del agua potable e incluso de electricidad para la ciudad de Santiago. (Ecosistemas, 2021)”.

Teniendo en cuenta lo anterior, en San José de Maipo ubicado en la cuenca alta, las principales zonas de desborde de cauce corresponden comúnmente a las riberas de esteros con caudal variable y los ríos Maipo, Colorado, El Volcán, El Yeso. De acuerdo con estudios realizados por la Dirección de Vialidad, en la comuna existen 22 puntos de riesgo de cortes viales, concentrados en su mayoría en la ruta G-25 (14 puntos), y producidos en algunos casos por el anegamiento generado por las aguas lluvias. Otros sectores en la comuna con INU recurrentes son Guayacán y La Obra, en los que, en momentos de crecidas, el caudal genera socavamiento de las terrazas inmediatas, produciendo una disminución de la extensión de ésta (Municipalidad de San José de Maipo, 2010).

En cuanto a los escenarios de REMA, estos procesos se presentan en esteros y quebradas de cauces angostos y con alta presencia de material sedimentario que se incorpora al caudal. *“Sectores de flancos de valle, en donde la pendiente y la alta meteorización a los materiales propios de ambientes con fuerte pendiente, crean taludes inestables, susceptible a desarrollar REMA cuando agentes naturales (sismos, deshielos o precipitaciones intensas) modifican sus condiciones de equilibrio. Algunos sectores que destacan por presentar estos procesos corresponden a las laderas que limitan el valle del río Maipo; aquí existen dos depósitos asociados a antiguos fenómenos de REMA, uno en la localidad de Guayacán y otro en el camino a la localidad Lagunillas. Sobre el pueblo se reconocieron además depósitos similares, pero con actividad reciente y algunas zonas de derrames coluviales y de caídas de bloques. La ocurrencia de DESL o REMA, si bien depende de las condiciones naturales también está condicionada y alentada por las actividades antrópicas que la aumentan, como la ejecución de cortes de terreno para caminos nivelaciones o canales, y la extracción de áridos; las INU, como vimos, generan riesgos constantes sobre muchas áreas y vías consolidadas de la comuna (Municipalidad de San José de Maipo, 2010)”*.

En cuanto a la región Metropolitana de Santiago, el riesgo de INU se presenta principalmente en zonas urbanas con pasos bajo nivel, zonas rurales con acequias y canales indebidamente tratados y poblaciones nuevas que no tienen un diámetro adecuado en su red de alcantarillado. La cuenca de Santiago, que se encuentra inmersa dentro de la CMAI, se ve afectada regularmente por INU y crecidas fluviales, asociadas a fuertes precipitaciones. En este aspecto, la comuna no se encuentra exenta a sufrir estas amenazas, las cuales concentran un alto peligro de crecidas e inundaciones en sectores de río Clarillo y Maipo (MINAGRI, 2022).

Evento en la Cuenca del Río Colorado.

Por otro lado, la localidad de El Alfalfal, ubicada en el valle del río Colorado, en la comuna de San José del Maipo, la cual se ubica a una altura de 1.300 msnm, emplazada en un sector cordillerano sobre la terraza derecha del río Colorado conformada por depósitos clásticos antiguos y que ha sido afectada frecuentemente por procesos geológicos de REMA relacionados con flujos de detritos, presentó un evento de tipo flujo de detritos el día 29 de noviembre de 1987, dicho flujo afectó el valle del río Colorado causando la muerte de 41 personas e importantes daños materiales en la central hidroeléctrica Los Maitenes y daños en obras de la central hidroeléctrica Alfalfal que se encontraba en construcción, a su paso arrasó con cuatro campamentos de los

contratistas que ejecutaban el proyecto, 14 puentes metálicos y segmentos de caminos de acceso. Además, EMOS (Empresa Metropolitana de Obras Sanitarias, actualmente llamada Aguas Andinas S.A), se vio obligada por 15 días a reducir en un 30% el abastecimiento de agua potable para la ciudad de Santiago, debido al colapso de los sistemas de decantación y filtrado. Según versiones de prensa, el flujo alcanzó parte de la población de El Alfalfal, especialmente las viviendas más próximas al río Colorado, dejando un depósito que sobrepasa los 50 cm de espesor (SERNAGEOMIN, 2001).

Las condiciones climáticas del sector corresponden al tipo templado cálido con temperaturas medias anuales de 12° a 14°C, hacia las zonas más elevadas, las temperaturas medias anuales son bastante inferiores, registrándose en zonas sobre los 3.000 m de altitud, temperaturas por el orden de 20° a 25°C bajo cero durante gran parte del día, en la estación invernal, temperaturas típicas de ambientes periglaciales. Para el periodo 1931-1978, la estación meteorológica de la central Maitenes, ubicada 7 km aguas abajo por el valle, registró una PPT media anual de 522,3 mm, con lluvias concentradas en los meses de invierno (mayo-agosto). Hacia las zonas cordilleranas, sobre los 1.800 m de altura, las precipitaciones son principalmente sólidas.

Por otro lado, de acuerdo a los registros de la estación meteorológica Quinta Normal, ubicada en Santiago, el año 1987 fue el quinto año más lluvioso en 138 años con un total de 712,2 mm. En la zona cordillerana se acumuló una gran cantidad de nieve, mucho mayor que un año normal. Los registros de la estación Laguna Negra, ubicada aproximadamente 20 km al sur de El Alfalfal, indican que el equivalente en agua de la nieve caída alcanzó 1.473 mm, mientras que en el periodo 1951-1990, el promedio anual fue de sólo 566 mm. Adicionalmente, durante los días previos a la ocurrencia del flujo de detritos de noviembre de 1987, se registraron altas temperaturas, superiores a los promedios diarios para la época en el sector. Según estimaciones de ingenieros del Ministerio de Obras Públicas, la isoterma 0°C se situó esos días alrededor de los 5.100 msnm, mientras que, en verano comúnmente se sitúa a una cota inferior a 4.200 msnm (SERNAGEOMIN, 2001).

La ocurrencia de fenómenos de REMA que podrían generar flujos de detritos, como los que afectaron a la localidad de El Alfalfal el 29 de noviembre de 1987, se debe a la interacción de diversos factores, principalmente geológicos, geomorfológicos, sísmicos y climáticos. En cuanto a los factores climáticos, los fenómenos climáticos como precipitaciones intensas o altas tasas de fusión de nieve, son factores que pueden desencadenar la generación de DESL en laderas inestables y posteriores flujos de detritos. Por consiguiente, la gran acumulación de nieve caída durante el año 1987, notablemente mayor que un año normal, junto con las altas tasa de fusión por la ocurrencia de elevadas temperaturas durante los días previos al DESL, fueron condiciones que contribuyeron a la generación de este evento. La fusión de la nieve acumulada pudo haber favorecido el incremento de la presión de poros mediante la incorporación de agua a través de las fracturas y planos de estratificación, provocando pérdidas instantáneas en la resistencia al corte de las sedimentitas (SERNAGEOMIN, 2001).

Abril de 2016.

En el año 2016 se presentó un sistema frontal que afectó a la zona central de Chile entre el 14 y 18 de abril, más precisamente la comuna San José del Maipo en la Región Metropolitana, este

evento se destacó por altas precipitaciones y la ubicación de la isoterma 0° a alturas por encima de 3.500 msnm, ocasionando la caída lluvia donde habitualmente nieva. “En el sector del Cajón del Maipo se generaron flujos de detritos que alcanzaron las rutas G-25 (El Volcán), G-345 (Los Maitenes-El Alfalfal), G-455 (El Yeso) y G-465 (Las Melosas). Los efectos de estos flujos fueron diversos, desde interrumpir el suministro de agua potable en Santiago, hasta el corte de caminos, destrucción de vivienda y pérdida de vidas humanas, como ocurrió con el flujo de detritos en la localidad de El Melocotón. Este evento, tuvo como consecuencia diversos procesos de REMA, desbordes de ríos e INU locales, afectando principalmente las regiones Metropolitana y del Libertador General Bernardo O’Higgins. En la Región Metropolitana, puntualmente en la comuna de San José de Maipo, los efectos consistieron en flujos de detritos y de barro en las quebradas laterales a los cursos de los ríos Colorado, El Yeso y El Volcán, principalmente en las zonas de cambio de pendiente asociados a cordones montañosos de la precordillera andina. Efectos de desborde de cauce se observaron en el río Maipo, cercano a la localidad de Las Melosas (Sepúlveda & Jara, 2016)”.

En la Tabla 25 se muestran los registros de PPT de las 4 estaciones que registraron el evento entre el 14 y 18 de abril de 2016, donde según la información recopilada por estas estaciones, la CMAI soportó los días 16 y 17 de abril las mayores precipitaciones diarias, con valores máximos de 69,1 y 87,9 mm/24 horas, respectivamente (Sepúlveda & Jara, 2016).

Tabla 25. Datos de PPT y caudales en las estaciones utilizadas para estudiar el evento entre el 14 y 18 de abril de 2016.

Estación	Precipitación acumulada para el evento (mm)	Precipitación Diaria (mm/24hrs)					Máximo Caudal (m³/s)
		14	15	16	17	18	
1: Río Maipo en El Manzano (DGA)	167,7	2,5	21	48,4	87,9	7,9	1078,5
2: Río Colorado antes de Junta Río Maipo (DGA)	-	-	-	-	-	-	129,47
3: Río Maipo en San Alfonso (DGA)	23,8	1,3	5	3,5	6,4	7,6	559,68
4: Laguna Negra DCP (DGA)	152,9	10,8	22	69,1	45,8	5,2	-

Fuente: Tomado de (Sepúlveda & Jara, 2016).

De acuerdo a la información anterior, los flujos de detritos deben su inicio a las precipitaciones intensas acontecidas en la precordillera de la Región Metropolitana, las que, debido a una situación de isoterma 0° localizada a alturas superiores a 3.500 msnm, afectaron la parte alta de algunas cuencas donde habitualmente se acumula nieve. Por otro lado, estos sectores presentan una gran disponibilidad de material sedimentario suelto susceptible de ser movilizad por las aguas. “Parte de este material, en efecto, fue arrastrado aguas abajo, colmatando los cauces de las quebradas y desembocando, en algunos casos, en los ríos Maipo, El Volcán, Colorado y El Yeso. Los flujos de detritos que afectaron las localidades de El Melocotón y Las Melosas ocurrieron entre las 3 y 4 de la madrugada del día 17 de abril de 2016, momento en el que, de acuerdo a los registros de DGA, habían precipitado más de 72 mm, de modo que al menos para estos dos datos se puede inferir una correlación entre la cantidad de lluvia acumulada y el inicio de ocurrencia de flujos de detritos para este sector ante eventos hidrometeorológicos de similares características (Sepúlveda & Jara, 2016)”.

Febrero de 2017.

Para el año 2017 se presentó un sistema frontal que afectó a la zona central de Chile entre el 25 y 26 de febrero de 2017 se caracterizó por intensas precipitaciones con una isoterma 0° a alturas superiores a 4.540 msnm (dato entregado por DMC), generando la caída de agua-lluvia donde habitualmente cae nieve.

“En algunas subcuencas del río Maipo este sistema generó, una serie de REMA del tipo flujos de detritos y flujos de barro (ALUV), siendo la quebrada San José, la que canalizó uno de los flujos que causó mayor impacto, con 8 personas fallecidas y 1 desaparecido. Además, dichas remociones generaron el corte de la Ruta G-25 en varios puntos, dejando aislada a gran parte de la comuna de San José de Maipo, y provocando daños en la infraestructura pública y privada. Adicionalmente, dichas remociones contribuyeron al corte masivo del suministro de agua potable debido a la turbiedad presente, situación que afectó a más de 1’700.000 clientes, principalmente de las comunas del Gran Santiago (Marín, Contreras, & Olea, 2017)”.

Tabla 26. Datos de PPT en las estaciones utilizadas para estudiar el evento entre el 24 y 26 de febrero de 2017.

Estación	Precipitación acumulada para el evento (mm)	Intensidad máxima para el evento (mm/h)	Precipitación Diaria (mm/24hrs)			
			24/Feb	25/Feb	26/Feb	27/Feb
Embalse El Yeso (DGA)	22,8	5,7	0	20,5	2,3	0
4: Río Maipo en San Alfonso (DGA)	-		0	-	-	-
5: Río Olivares antes Junta Río Colorado (DGA)	2,4	1,0	0	0,2	2,2	0

Fuente: Tomado de (Marín, Contreras, & Olea, 2017).

En la Tabla 26 se presentan los registros de PPT de las 4 estaciones pluviométricas pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA) ubicadas en la CMAI que registraron el evento entre el 24 y 27 de febrero de 2017, donde según la información recopilada por estas estaciones, la CMAI presentó mayores precipitaciones medidas en la estación Embalse El Yeso el día 25 de febrero de 2017 cuyo máximo valor registrado fue de 20,5 mm/24hr y una intensidad máxima de 5,7 mm/hr registrada a las 22:57 horas Santiago (Marín, Contreras, & Olea, 2017).

“Para este evento, se revisaron los datos de precipitaciones caídas, a partir de datos del proyecto IMERG (NASA), y se comparó con las cuencas que se activaron para el frente de lluvia dando como resultado que las precipitaciones durante el día 25 de febrero se concentraron en la cuenca aportante del embalse El Yeso, con precipitaciones del orden de 50 mm, lo cual coincide con los datos de la estación pluviométrica de la DGA en cuanto a la magnitud y distribución de las precipitaciones. Además, pudieron observar que durante el día 26 de febrero las precipitaciones se concentraron principalmente en la cuenca del río Colorado, con precipitaciones a lo largo del día de aproximadamente 55 mm/24 hr. Esta estimación coincide con las mediciones realizadas por la DGA en dicha cuenca. Cabe señalar que la diferencia en los montos medidos por las estaciones de la DGA y la estimación realizada por parte de la NASA se explican por diversos

factores, entre los que se encuentra la ubicación de las estaciones meteorológicas y el tamaño del pixel (10 km) del proyecto IMERG.

A partir de entrevistas a vecinos de la zona, principalmente de la quebrada San José se tiene que los flujos ocurrieron aproximadamente entre las 9:30 pm del sábado 25 de febrero y las 2:00 am de la madrugada del día 26 de febrero de 2017, momento en el que, de acuerdo a los registros de DGA, habían precipitado más de 5,7 mm/hr en la estación Embalse El Yeso a las 22:57 horas, de modo que se puede inferir una correlación entre la cantidad de lluvia acumulada y el inicio de ocurrencia de flujos de detritos para este sector (Marín, Contreras, & Olea, 2017)”.

Junio de 2023.

Un evento meteorológico afectó la zona central de Chile desde la Región de Valparaíso hasta la Región de la Araucanía entre el 21 al 26 de junio de 2023 ocasionando distintos tipos de amenazas de caída de rocas, DESL, flujos e INU que afectaron al sector agrícola y urbano. Según el informe entregado por el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED) este evento dejó 27.588 damnificados destacándose la Región del Maule con 19.170 damnificados. Además, de 140 albergados, 1.724 personas aisladas, 1.853 casas destruidas, 2.553 viviendas con daño mayor, 5.881 con daño menor, 1 persona desaparecida y 3 personas fallecidas (Región Metropolitana, Región del Maule y Región del Biobío). Sumado a lo anterior, se registró un alto número de cortes de rutas, daños en la red vial y urbana, inhabilitación de puentes, anegamientos y cortes en el suministro eléctrico e hídrico, impactando desde distintos ámbitos a la comunidad (CIGIDEN, 2023).

El evento hidrometeorológico de junio se vio favorecido por el fenómeno de El Niño, que desencadenó un Río Atmosférico Zonal (Garreaud, 2024), el cual se define como corredores o flujos estrechos de vapor de agua atmosférica (con <1000 km de ancho en relación con su escala de longitud de >~2000 km) (Neiman, Ralph, Wick, Lundquist, & Dettinger, 2008), en el caso de Chile Central, en más del 80 % de los eventos meteorológicos cálidos, está presente uno de estos fenómenos. Esto, a pesar de que las precipitaciones más usuales son las que se concentran en el invierno austral, en su mayoría asociadas al paso de frentes fríos con una isoterma 0° típica entre 1.500 y 2.500 msnm, cuando hay precipitaciones. Sin embargo, en aproximadamente un tercio de los casos, la PPT ocurre acompañada de temperaturas cálidas y niveles de congelación por encima de los 3.000 msnm, aumentando el área pluvial de las cuencas andinas y aumentando a su vez, la susceptibilidad al desarrollo de amenazas hidrometeorológicas (Garreaud, 2013), siendo similar a este caso en particular, las precipitaciones mayores se concentraron en la alta cordillera andina, ocasionando un aumento importante del caudal en los ápices y zonas medias de las macro cuencas, afectando la zona de desembocadura con inundaciones principalmente las terrazas fluviales de INU y en la parte media y baja de los cauces fluviales.

Respecto a las precipitaciones registradas en la parte alta de la CMAI, se observan tendencias significativas respecto a su distribución, influenciadas principalmente por el desplazamiento del Río Atmosférico Zonal, el efecto orográfico y el aumento en la altitud de la isoterma 0°. Específicamente, estos datos fueron extraídos desde 5 estaciones meteorológicas disponibles desde los datos en línea de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas mediante el Visualizador Meteorológico VisMet del Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia

(Center for Climate and Resilience Research (CR)2). La selección de las estaciones fue con base a su ubicación, altitud y respecto a la calidad de sus datos; se descartaron en este caso las estaciones que presentan rangos de tiempo considerable sin datos y/o una alta cantidad de datos con bajo porcentaje de confiabilidad (<50%). Los datos resultantes, no consideraron registros con porcentaje de confiabilidad menor al 50%.

Tabla 27. Datos y análisis estadísticos de las precipitaciones registradas desde el 19 al 27 de junio de 2023 para las 6 estaciones utilizadas para estudiar el evento. Los datos están representados en función de su ubicación W-E.

DATA FROM JUNE 19 TO 27, 2023	QUEBRADA DE MACUL WEATHER STATION (DGA)	SAN JOSÉ DE MAIPO RETÉN WEATHER STATION (DGA)	VALLE OLIVARES WEATHER STATION (DGA)	EL YESO EMBALSE WEATHER STATION (DGA)	GLACIAR SAN FRANCISCO EN AGUAS PANIMÁVIDA WEATHER STATION (DGA)	TERMAS DEL PLOMO WEATHER STATION (DGA)
ALTITUDE [m a.s.l.]	950	963	2787	2475	2220	3000
EVENT ACCUMULATED RAINFALL [mm]	163.4	170.7	263.4	265.9	416.0	76.9
AVERAGE [mm]	0.9	0.9	1.3	1.3	2.5	0.4
MEAN [mm]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MAXIMUM ACCUMULATED RAINFALL [mm]	12.2	8.5	9.7	11.3	28.9	2.9
DATE MAXIMUM ACCUMULATED RAINFALL	23-06-2023 1:00	23-06-2023 1:00	22-06-2023 16:00	22-06-2023 15:00	22-06-2023 17:00	23-06-2023 15:00
MINIMUM ACCUMULATED RAINFALL [mm]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DATE MINIMUM ACCUMULATED RAINFALL [mm]	Multiple dates	Multiple dates	Multiple dates	Multiple dates	Multiple dates	Multiple dates
MAXIMUM RAINFALL INTENSITY [mm/h]	12.2 mm/h	8.5 mm/h	9.7 mm/h	11.3 mm/h	28.9 mm/h	2.9 mm/hr
STANDARD DEVIATION	2.2	1.9	2.6	2.5	4.7	0.7
MODE	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DATE ACCUMULATED RAINFALL [mm/24hr]	19-06-2023	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	20-06-2023	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	21-06-2023	0.0	1.6	0.0	0.3	3.9
	22-06-2023	84.2	73.4	50.9	94.7	84.7
	23-06-2023	68.0	78.2	144.6	114.9	229.1
	24-06-2023	10.4	17.4	67.9	56.0	97.4
	25-06-2023	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2
	26-06-2023	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0
	27-06-2023	0.2	0.0	0.0	0.0	0.8
TOTAL	163.4	170.7	263.4	265.9	416.0	76.9

Fuente: Tomado de (CIGIDEN, 2023).

Los resultados presentados en la Tabla 27, indican los registros de precipitaciones acumuladas diarias y totales desde el 19 al 27 de junio de 2023, cuyas precipitaciones están concentradas principalmente durante el 22, 23 y 24 de junio. Respecto a las precipitaciones acumuladas registradas, se registra un valor mínimo de 76.9 mm acumulado en la estación pluviométrica de Termas del Plomo y una máxima acumulada de 416 mm en la estación de Glaciar San Francisco en Aguas Panimávida. En cuanto a eso, se observa una clara tendencia en la variabilidad de las precipitaciones en sentido oeste-este (W-E), y a partir de su altitud donde se encuentra la estación pluviométrica, exceptuando la estación de las Termas del Plomo, la cual registró una caída de un 540% respecto a la estación de Glaciar San Francisco en Aguas Panimávida. La estación de las Termas del Plomo se encuentra ubicada al extremo oriental de la cuenca y presenta la mayor altitud (3.000 msnm) respecto a las otras estaciones utilizadas, por lo tanto, la disminución en los registros de PPT acumulada puede deberse posiblemente a su ubicación en una cota superior o cercana a la cota de Isoterma 0°C (CIGIDEN, 2023).

Por otro lado, se observa que un 83.3% de los datos presenta un máximo acumulado para el 23 de junio, cuya excepción en su tendencia la presenta la estación pluviométrica de Macul. Esto refleja la evolución del avance del flujo del río atmosférico zonal en dirección oeste-este (W-E), acumulando una mayor cantidad de PPT en el piedemonte cordillerano para el día 22 de junio y en las zonas al interior cordillerano para el día 23 de junio. Respecto a las intensidades máximas registradas, se concentran durante los días 22 y 23 de junio, cuyo valor máximo lo registró la estación Glaciar San Francisco en Aguas Panimávida con una intensidad de 28.9 mm/hr el día 22

de junio a las 17:00 horas, seguido de una intensidad de 12.2 mm/hr registrada en la estación de Macul para el día 23 de junio a las 1:00 horas. En cuanto a la acumulación diaria de PPT, se puede observar que para el día 23 de junio, la estación Glaciar San Francisco en Aguas Panimávida el registro fue de 229,1 mm/24 hr. Estos datos muestran la magnitud del evento hidrometeorológico de junio y que ocasionaron distintos tipos de amenazas de caída de rocas, DESL, flujos e INU.

Por otro lado, el aumento en la altitud de la isoterma 0°C desencadena indudablemente un aumento en la captación de agua líquida por área de las hoyas hidrográficas y en las laderas que constituyen estas zonas montañosas, la cual repercute en una mayor saturación del suelo, disminución de la fuerza de roce y que el material sedimentario se desliza ante el efecto gravitatorio provocando movimientos de REMA hacia cotas bajas (CIGIDEN, 2023).

6.3 Matriz de comparación

En la Tabla 28 se expone la comparación del municipio de Villamaría, Caldas que corresponde al EDC, con los dos casos relacionados, la CMAN en Perú y la CMAI en Chile, aquí se hace una comparación de las variables y parámetros utilizados para la caracterización de cada uno de los casos y a partir de esta se pudo identificar que las cuencas poseen algunas variables con características similares al EDC, donde por ejemplo, depósitos de flujos de escombros (coluviales), de caída piroclástica, fluviales y glaciares, que corresponden a características geológicas, son comunes en las tres áreas de estudio, además observándose similitudes en algunas características de las variables de geología estructural, pendientes y geomorfología. Igualmente se pudo identificar diferencias en algunas características de la geología y geología estructural, como por ejemplo el predominio de unidades de rocas sedimentarias y la presencia de pliegues, anticlinales y sinclinales en la parte estructural, mientras que para el EDC solo se presenta fallamiento asociado al sistema de fallas que atraviesa la zona y geología relacionada con rocas metamórficas.

Tabla 28. Matriz de comparación con la descripción de las variables y parámetros utilizados.

Municipio de Villamaría, Colombia (EDC)	CMAN, Perú (Caso relacionado)	CMAI, Chile (Caso relacionado)
<i>Ubicación</i>		
Se encuentra en la región andina, a los 5°3'0,0" de Latitud Norte, y a los 75°31'1,0" de Longitud Oeste.	Se encuentra en los andes centrales peruanos, entre los 10°33'52,66" y 13°32'31,39" de Latitud Sur, y entre los 73°55'10,88" y 76°39'16,01" de Longitud Oeste.	Se encuentra en el centro de Chile y su cuenca alta se ubica en la CAND, entre los 32°55'0,0" y 34°15'0,0" de Latitud Sur, y entre los 69°55'0,0" y 71°33'0,0" de Longitud Oeste.
<i>Rango de alturas</i>		
Desde los 1.000 msnm en límites con Chinchiná, hasta los 5.320 msnm en las nieves perpetuas de la cumbre del VNR, en el PNN.	Desde los 500 hasta los 5.000 msnm.	Entre los 1.000 y 6.500 msnm.
<i>Geología</i>		
Rocas metasedimentarias, metamórficas, ígneas y flujos andesíticos, depósitos de flujos de escombros, caída piroclástica, aluviales y glaciares	Rocas sedimentarias, metamórficas e intrusivos ígneos, materiales de recubrimiento depósitos glaciáricos, terrazas y depósitos fluvio-glaciares, depósitos coluviales (escombros, DESL), y secuencias tufáceas de origen volcánico.	Depósitos fluviales y fluvio-glaciares y cenizas volcánicas, rocas graníticas, rocas volcánicas y sedimentarias
<i>Geología Estructural</i>		
Sistema de fallas Palestina y Romeral, orientación general Norte-Sur	Anticlinales y sinclinales y numerosos sistemas de fallas; estructuras orientadas en la dirección general del plegamiento Andino (dirección Noroeste-Sureste).	Pliegues y fallas, de oeste a este un pliegue sinclinal y anticlinal, ambos apretados y asimétricos con ejes de orientación NS a NNE, cortados por fallas inversas a lo largo de su eje.
<i>Geomorfología</i>		
Ambientes morfo-genéticos Estructural, Denudacional, Glacial, Fluvial y Volcánico	Unidades geomorfológicas: Cordillera Occidental, Cordillera Oriental, Superficie Puna, Depresiones, y zona de valles interandinos. Ambientes Estructural, Denudacional, Glacial, Fluvial y Volcánico.	Cuatro unidades morfoestructurales: Planicie Fluvio-marina, CCOS, Depresión Intermedia y CAND. Predominio morfología glacial y periglacial parte alta. Ambientes Estructural, Denudacional, Glacial, Fluvial y Volcánico.
<i>Cobertura de la tierra</i>		
Pastos 34,4% (pastos limpios), bosques 24% (bosque denso), áreas con vegetación herbácea y arbustiva 21,26 % (herbazal). El 20,34% territorios artificializados, territorios agrícolas, áreas húmedas y superficies de agua.	Pajonales andinos, matorrales andinos y bofedales 72,5%, territorios agrícolas 12,2% y 15,3% área alto andina con escasa o sin vegetación, área urbana, áreas de no bosque amazónico, bosques, glaciario, lagunas, lagos y cochas, plantación forestal, río y vegetación de isla.	Praderas, matorrales, bosques y plantaciones forestales 55,4%, áreas desprovistas de vegetación 14,5%, terrenos agrícolas 14,1%, áreas artificiales 7,6%, nieves y glaciares 6,6%, humedales 1% y cuerpos de agua 0,8%.
<i>Pendientes</i>		

Abrupta 50,2% (19-40°); muy inclinada 25% (11-19°); inclinada 9,1% (7-11°); escarpada 8,4 % (>45°), y plana a suavemente inclinada 7,3% (0-7°)	Abrupta 40% (30-70°); montañosa 30% (>70°); intermedia 20% (10-30°) y plana 10% (0-10°)	Gran parte de la cuenca presenta pendientes 6,1°-15° y 15,1°- 30°, y zonas que superan los 30° (muy escarpada).
<i>Clima</i>		
Típicamente (ínter) tropical con distribución bimodal de la lluvia durante el año, mayores valores en los meses de abril-mayo y octubre-noviembre. Esta área está influenciada por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) donde convergen los vientos alisios del hemisferio norte con los del hemisferio sur, así como por el carácter montañoso de la región, y por el fenómeno del Niño - Oscilación del Sur (ENSO).	Cálido lluvioso, con régimen de PPT bien definido con mayor cantidad de lluvia entre diciembre y marzo, lo que coincide con la estación de verano. El VIE está condicionado a las forzantes dinámicas como la corriente de chorro de Sudamérica (CCSA) y el clima es influenciado por la Corriente de Humboldt, así como por el fenómeno del Niño - Oscilación del Sur (ENSO)	Templado Mediterráneo en toda el área y Frio de Altura que se localiza en la CAND. Un ciclo anual de PPT bien definido con mayor cantidad de precipitaciones durante las temporadas invernales de mayo, junio, julio y agosto. Influenciado por el fenómeno del Niño - Oscilación del Sur (ENSO), Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), Oscilación de Madden y Julian (MJO) y la Oscilación Antártica (AAO).
<i>Precipitación</i>		
Promedio entre 2.000 y 2.200 mm/año. En la cuenca alta 600-800 mm/año. En la zona media 1.000 a 4.000 mm/año. Papayal ubicada a una altura de 2.304 msnm es la estación que tiene un registro mayor de PPT media mensual y anual con valores de 163,04 y 1.956,5 mm respectivamente	Promedio multianual valores que superan los 1.000 mm/año. Región centro-occidental de la cuenca 700-800 mm/año. A altitudes mayores a 3.300 los valores pueden exceder 900 mm/año	En la parte alta de la cuenca sobre los 1.500 msnm precipita en forma de nieve con valores medios de 536 mm/año y 640 mm/año. En la zona media-alta entre 1.200 y 2.000 mm/año. En la parte baja la PPT media anual varía espacialmente entre los 412 y 619 mm.
<i>Umbrales</i>		
Lluvias diarias >70 mm Lluvias antecedentes 15 días (A15) >150 mm Lluvias antecedentes 25 días (A25) >200 mm	Lluvias diarias 7-15 mm Lluvias antecedentes 15 días (A15) >110 mm	Lluvias diarias 20 - 72 mm *Evento del 2023 mayor PPT en 24 horas 229,1 mm. Máximo acumulado en 9 días 416 mm

Fuente: Elaboración propia, 2024.

6.4 Lecciones aprendidas

De acuerdo a la información consultada y a los resultados obtenidos, la experiencia de algunos países andinos, como Perú y Chile, en el proceso del CRD relacionado con MM, INU y AVT exacerbados por las lluvias, se presentan como lecciones aprendidas y puede ser replicada para fortalecer el proceso del CRD del EDC.

6.4.1 Lecciones aprendidas Perú

Teniendo en cuenta, toda la información consultada, el registro histórico de eventos, los diferentes estudios e informes que han realizado algunas instituciones en Perú y la experiencia que ha tenido el país en torno al conocimiento de los eventos hidrometeorológicos que han desencadenado emergencias, se tiene lo siguiente:

En Perú, una de las estrategias implementadas por el gobierno para fortalecer el proceso de la GRD, fue el fortalecimiento de las instituciones que hacen parte del sistema nacional, una de las entidades corresponde al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI, quien es la entidad encargada de manejar la información oficial sobre meteorología, hidrología y clima, información que es utilizada tanto para realizar análisis pasados como para las proyecciones a futuro, dicha entidad está adscrita al Ministerio del Ambiente, y tiene el propósito de generar y proveer conocimiento de manera confiable, oportuna y accesible en beneficio de la sociedad peruana.

Por otro lado, el Instituto Geofísico del Perú – IGP ha desarrollado diferentes investigaciones y proyectos, en los que han trabajado junto con otras entidades para robustecer la capacidad de manejo del riesgo ante eventos meteorológicos extremos, dentro de los que se destacan las lluvias extremas, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad y mejorar la capacidad de adaptación de las poblaciones urbanas y rurales, frente a cambios del clima; y de esta manera usar la información para la GRD y la preparación de planes locales de adaptación.

“Igualmente, realizar talleres internacionales donde se compartan lecciones aprendidas de la GRD en procesos de Planificación e Inversión para el Desarrollo, es importante para generar aportes conceptuales y aplicativos a partir de la riqueza de experiencias y lecciones de otros países. Por lo que se podrá tanto mejorar como profundizar y extender los procesos de planificación e inversión para el desarrollo reduciendo vulnerabilidades en los contextos de CC; del mismo modo, se podrá continuar el rumbo de los caminos propuestos, los cuales permiten vislumbrar la articulación sinérgica de la GRD y la adaptación al CC propiciando procesos de desarrollo sostenible que reduzcan los riesgos. Se ha encontrado que los desastres que ocasionan mayores daños no son los más grandes, sino la acumulación de pequeños desastres, por eso dentro de estos talleres, consideran vital reducir las amenazas y la vulnerabilidad, lo cual se viene haciendo en el Perú al incorporar la GRD en los procesos de planificación e inversión pública, esto renueva el enfoque tradicional centrado en el desastre. Ahora, se entiende que el riesgo de desastre es básicamente un tema de desarrollo. Un reto en este sentido es aumentar la inversión pública y privada en estos términos, lo que debe ir acompañado de avances en la medición real de impactos, para llegar a conclusiones que conduzcan hacia resultados de calidad en relación con la RRD a nivel latinoamericano (Ministerio de Economía y Finanzas del Perú, 2011)”.

Por otro lado, debido a “lo sucedido a fines del año 2009 y comienzos del 2010 por efecto de las precipitaciones, sumado a la experiencia de otros eventos, como el sismo de agosto del 2007 cuyo epicentro se localizó en las costas del centro de Perú a 40 km al oeste de Pisco y a 150 km al suroeste de Lima o los efectos del fenómeno El Niño 1997-1998, se evidenció para el sector urbano las limitaciones, falta de interés y escasa voluntad política de las autoridades para entender la planificación y sus mecanismos de control como parte esencial del desarrollo. Por lo que los instrumentos de gestión de gran parte de las ciudades y localidades del país deben incorporar el componente de riesgo, que exponga la inversión ante peligros que colocan en alto riesgo la vida e integridad de las personas, por lo general, en las poblaciones con mayor nivel de pobreza (Ministerio de Economía y Finanzas del Perú, 2011)”.

En el documento “Lecciones Aprendidas de la Gestión del Riesgo en Procesos de Planificación e Inversión para el Desarrollo”, en la sección “Avances y lecciones aprendidas en el sector vivienda, construcción, urbanismo y saneamiento, Perú, Neyra (2010)” menciona que “Perú es propenso a la manifestación de diversos fenómenos naturales, cuyas consecuencias, se encuentran asociadas al patrón de ocupación del territorio, a las prácticas de autoconstrucción sin asistencia técnica y a la falta de capacidad de gestión. Al existir una relación directa entre las condiciones de riesgo, la inadecuada ocupación del territorio y la inadecuada aplicación de sistemas constructivos no solo se incrementa la condición de vulnerabilidad sino también se generan conflictos y nuevos peligros. Los asentamientos humanos en las zonas rurales de las partes bajas de las cuencas también están expuestos a peligros, tales como INU por efecto de la activación de quebradas a consecuencia del embalse de aguas en las lagunas en períodos extraordinarios de precipitaciones (Ministerio de Economía y Finanzas del Perú, 2011)”.

De otro modo, “la planificación del desarrollo local y del desarrollo urbano en particular constituye una competencia de los gobiernos locales que requiere ser fortalecida incorporando la GRD para prevenirlos y mitigarlos. Para ello se requiere generar información sobre la base de un Análisis del Riesgo y luego utilizarla para la formulación de políticas preventivas, principalmente en planificación. El reto es disminuir las brechas entre las políticas y las prácticas institucionales. Para ello se trata de abordar la incorporación de la GRD, de tal modo que involucre a los niveles nacional, regional y local, coordinando a base de las respectivas competencias (Ministerio de Economía y Finanzas del Perú, 2011)”.

No obstante, en la mayoría de países de Latinoamérica se tiene normativa en temas de GRD, en Perú, “en los diferentes ámbitos locales, regionales y nacionales existe un conjunto de instrumentos de gestión que apoyan la aplicación de la GRD y la adaptación al CC. A nivel regional y local, el plan de ordenamiento territorial con enfoque de GRD y adaptación al CC es un instrumento que ayuda a ordenar la normatividad (Ministerio de Economía y Finanzas del Perú, 2011)”, vinculando la GRD como eje transversal. Cabe recordar que “la GRD se debe iniciar con la identificación del riesgo, a base del conocimiento del territorio y de las condiciones de la población. La RRD debe comprender políticas e instrumentos para la ocupación segura del territorio y para no generar nuevos riesgos con las intervenciones de rehabilitación y reconstrucción. Así, entonces, hay que manejar el desastre en el contexto de la emergencia, en términos de preparación y respuesta (Ministerio de Economía y Finanzas del Perú, 2011)”. Asimismo, se deben diseñar estrategias encaminadas a transferir el riesgo mediante la adquisición de seguros, pólizas y créditos. Al interior del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento “se han identificado las acciones integrales que corresponde abordar en ese camino, el seguro contra riesgos climáticos, frente a este tipo de problemática surge esta alternativa como un instrumento financiero que brinda protección a las inversiones (productivas, de infraestructura, de transporte, etc.) ante la ocurrencia de riesgos climáticos (Ministerio de Economía y Finanzas del Perú, 2011)”.

De igual manera, hay que lograr que la RRD establezca una prioridad nacional y local dotada de una sólida base institucional de aplicación. Igualmente se deben realizar proyectos para identificar, evaluar y vigilar los riesgos de desastre y potenciar la alerta temprana, utilizando los conocimientos, las innovaciones y la educación para crear una cultura de seguridad y de resiliencia a todo nivel. Teniendo en cuenta el tema de la educación, algunas universidades peruanas como la Universidad del Pacífico, han desarrollado investigaciones que incorporan la GRD y la Adaptación al CC involucrando nuevos campos del conocimiento, tal es el caso de los estudiantes de Economía, quienes pueden hacer investigaciones aplicadas a la resolución de problemas de la realidad para disminuir la vulnerabilidad, aprendiendo las temáticas de la GRD y la Adaptación al CC, lo anterior se debe a que el curso base sobre estos temas es obligatorio para la Facultad de Economía, entre las investigaciones realizadas se destacan *“Reducción de los riesgos asociados a las sequías a través de la incorporación de nuevos cultivos en la rotación anual de los terrenos de cultivo de arroz: el caso del distrito de Morropón en el departamento de Piura”*, de José López y Nicolás Flores (2007) y *“El rol estatal para el aseguramiento de viviendas de familias pobres: el caso de Tambo de Mora luego del terremoto del 15 de agosto”*, de Javier Iriarte y José Miguel Raffo (2008).

Esfuerzos análogos a este se han realizado en otras universidades, en mayor medida a nivel de postgrado, como sucede en la Universidad Nacional de Ingeniería y la Universidad Nacional de Piura. A nivel de pregrado se dan experiencias también en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, por lo anterior es primordial que en las instituciones educativas se fomente la investigación en proyectos relacionados con la GRD y Adaptación al CC en los programas de pregrado (Ministerio de Economía y Finanzas del Perú, 2011).

Lo anterior se fundamenta, a nivel de docencia, en que a partir de la *“inclusión de la temática en algún curso básico general permite fomentar interés en ella; por otro lado, el desarrollo de ejemplos que incorporen más elementos de teoría posibilita la inclusión del tema en cursos más avanzados. Y a nivel de investigación, es importante reconocer investigadores que tengan interés en el tema de tal forma que puedan reclutar asistentes que posteriormente lo sigan desarrollando. La propuesta de temas de investigación en GRD y Adaptación al CC por parte de los docentes hacia jóvenes universitarios de los últimos años de estudio es un mecanismo que permite desarrollar investigaciones con mucho trabajo aplicado. Por otro lado, la difusión de publicaciones –online o impresas– es un elemento básico para fomentar el desarrollo de investigaciones en la temática (Ministerio de Economía y Finanzas del Perú, 2011)”*.

Por otro lado, *“los sistemas de información son una herramienta importante en relación con el análisis de riesgo y su gestión, aunque muchas veces solo después del desastre se aprecian sus carencias y la falta de actualización y de uniformidad de los datos. No contar con información de calidad, suficiente, uniforme, oportuna y ágil hace más vulnerable a la población y a las instituciones, siendo los sistemas de alerta temprana y el trabajo de zonificación y ordenamiento territorial instrumentos fundamentales que dan información a priori. Los proyectos de inversión pública con GRD requieren información para hacer el análisis del riesgo del entorno y llegar a elaborar el mapa de peligros, pero frecuentemente no se cuenta con toda la información necesaria. El sistema de información es una estrategia importante para el tema de desastres, que era antes visible con el sistema de alerta temprana y ahora lo es con el trabajo de zonificación y ordenamiento territorial. Por otro lado, después del desastre se aprecia su necesidad a través de los bancos de información y con las estrategias para rehabilitación y reconstrucción. Si la población y/o las*

instituciones no cuentan con información de calidad, suficiente y oportuna, eso les hace también vulnerables (Ministerio de Economía y Finanzas del Perú, 2011)”.

En cuanto a “los sistemas de alerta temprana, estos son fundamentales y funcionan sobre todo a nivel de cuenca, asegurando información oportuna, aunque existe preocupación por las barreras técnicas para su uso por la población. De las experiencias que se han tenido en Perú, se ha podido evidenciar la necesidad de fortalecer los sistemas de información, especialmente en los aspectos hidrológico, cartográfico y de recursos naturales, con mayor énfasis en el nivel local y en los espacios altamente vulnerables, que son normalmente rurales. Además, se requiere realizar coordinaciones transfronterizas en información entre problemáticas vecinas. En cuanto a la recolección de la información para la GRD y la adaptación al CC, se debe enfatizar en la construcción de metodologías participativas para sistematizar el conocimiento local o información etnoclimática; la construcción de mapas municipales de amenazas; y la elaboración de productos como mapas digitalizados y bases de datos de riesgo. Tal información debe ser usada en la formulación de políticas preventivas en los procesos de planificación y de gestión financiera municipal y ser continuamente actualizada mediante eventos comunitarios y municipales, teniendo en cuenta que los sistemas de información deben estar articulados a la normativa y al financiamiento y con atención prioritaria a las regiones altamente vulnerables (Ministerio de Economía y Finanzas del Perú, 2011)”.

6.4.2 Lecciones aprendidas Chile

De acuerdo a la recopilación de estudios, información consultada, el registro histórico e informes que han presentado instituciones tanto públicas como privadas en Chile y la experiencia que ha tenido el país en torno al conocimiento de las amenazas desencadenadas por los eventos hidrometeorológicos se tiene lo siguiente:

Al igual que Perú, en Chile una de las estrategias implementadas por el gobierno para mejorar el proceso de la GRD, fue el fortalecimiento de las instituciones que hacen parte del sistema nacional, se promulgó la Ley que establece el Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SINAPRED) y configura el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED), que sustituyó a la Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI). *“Las nuevas instancias reconocen e incorporan todos los avances y desarrollos que se han logrado en función de las buenas prácticas y lecciones aprendidas en la última década por las entidades que reemplazan; se enfoca en la prevención, alerta temprana, descentralización y territorialidad. Asimismo, con este cambio se buscó actualizar, reforzar, estandarizar y hacer vinculantes esas experiencias, para alcanzar estándares de excelencia en la GRD. La ley modificó la forma que el Estado de Chile se hace cargo de la GRD, reconociendo a través de normas de rango legal un “Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres” (Ministerio de Salud, 2021)”.*

Por otro lado, en lo descrito en la Política Nacional y Plan Estratégico Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres (2020-2030), *“algunos eventos serán cada vez más severos producto del CC que exacerba aquellos de origen meteorológico, hidrometeorológico y climatológico, pudiendo transformarse esta situación en una constante creciente en el país que reconfigure algunas actividades humanas en búsqueda de la adaptación a esta nueva realidad nacional, regional y global”.*

Por lo tanto, una de las experiencias exitosas en Chile es que en años recientes el sector académico ha adquirido un rol importante para la GRD, por medio del establecimiento de múltiples alianzas con organismos técnicos y la creación de centros de investigación aplicada que

han puesto a disposición resultados de interés nacional y han propiciado una relación sinérgica entre los organismos estatales y el desarrollo científico. Estas instituciones han aportado nuevas visiones respecto a la RRD, añadiendo a las discusiones marcos teóricos y herramientas vanguardistas que han contribuido a optimizar y/o resolver necesidades demandadas por distintos actores del país, brindando antecedentes que sirven de sustento objetivo para diversas áreas de trabajo.

Del mismo modo, “en el sector privado, durante los últimos años se han constituido una serie de comisiones y consejos que, directa o indirectamente, contribuyen a la RRD desde sus distintos alcances, objetivos y misiones, permitiendo sumar diferentes ópticas ante una misma problemática o temática prioritaria para el país. A ello, se suman diversas alianzas público – privadas que han contribuido a aunar intereses y plasmar compromisos de todas las partes involucradas, los que en ocasiones han permitido tomar medidas preventivas concretas y mejorar procedimientos que apuntan a la continuidad operacional de los servicios, el que reconoce en el privado un aliado importante para fines de coordinación y disponibilidad de capacidades en las distintas fases del ciclo de la GRD. Desde el sector público, existen Ministerios y servicios dependientes en los que la GRD se ha incorporado formalmente dentro de su orgánica, conformando Departamentos o Unidades de la GRD que permiten darle una mirada más integral y de dedicación exclusiva a este ámbito. Tal es el caso del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Ministerio de Obras Públicas, Ministerio de Salud, Ministerio de Agricultura, Ministerio de Energía, Superintendencia de Servicios Sanitarios, Ministerio de Relaciones Exteriores y Ministerio de Educación por citar algunos (Gobierno de Chile, 2020)”.

Otra de las estrategias implementadas por Chile para avanzar en un marco institucional para la GRD, fue la suscripción de tratados y acuerdos internacionales con los que se busca lograr que el país esté preparado para hacer frente a los eventos y contar con una rápida capacidad de recuperación una vez estos ocurran. Entre los que se destacan el Marco de Sendai para la RRD 2015-2030, el Marco de Acción de Hyogo 2005-2015, la Red Interamericana de Mitigación de Desastres (RIMD), el Sistema de Alerta de Tsunamis del Pacífico (PTWS), el Plan de Acción de Hospitales Seguros y la Declaración de Panamá sobre la RRD en el Sector Educativo de América Latina y el Caribe.

Además de lo anterior, desde el año 2000 opera en el país el Centro de Alerta Temprana (CAT), que en su momento fue dependiente de la ONEMI (ahora SENAPRED), el cual *“se creó con la función principal de vigilar permanente y sistemáticamente los escenarios de riesgo a nivel país, los siete días de la semana y las 24 horas del día, para recabar y difundir la información. Igualmente, poseer este sistema es importante para constituir, según grados de prioridad, los mecanismos funcionales existentes para enfrentar y coordinar la respuesta a situaciones de emergencia y desastres. El proceso se desarrolla en base a información proveniente de organismos técnicos que oficialmente asesoran a ONEMI (el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, SHOA; SERNAGEOMIN; el Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur, OVDAS, el Instituto Sismológico de la Universidad de Chile, Dirección Meteorológica de Chile, entre otros). A partir de esta información se analiza la situación, previniendo escenarios posibles que pudieran ser provocados por la ocurrencia de un determinado fenómeno (MMA, 2021)”.*

De acuerdo a la experiencia que ha tenido Chile, en la atención de emergencias por INU, en el caso de la CMAI, han establecido que, de acuerdo a las características de la misma, se deben

realizar estudios de riesgo de INU originados por desborde de cauces, para que sean incorporados en los protocolos de evacuación y en los Instrumentos de Planificación Territorial, considerando que esta información técnica debe incluir datos respecto a dinámicas del río, tales como pH, batimetría, entre otras, igualmente para la zonificación de la INU se debe considerar imágenes de radar, satelitales, drones u otras, también es necesario fortalecer el sistema de monitoreo de los niveles del río a partir de la implementación de mecanismos alternativos de medición de caudal, o la incorporación de instrumentos adicionales, que permitirán una continuidad en el monitoreo, evitando los vacíos de información producidos por la falta de buena cobertura de las estaciones de medición dentro de la cuenca. Por otro lado, de acuerdo a la experiencia, es necesario avanzar en el desarrollo de planes para la recuperación de ecosistemas degradados por causas antrópicas, como por ejemplo la alteración de cauces y quebradas locales, contaminación, entre otros, ya que los ecosistemas degradados no pueden realizar funciones de mitigación ante eventos extremos (CIGIDEN, 2023).

En cuanto a la experiencia que ha tenido Chile en la atención de emergencias por REMA tipo flujo, ven la necesidad de mejorar la distribución y aumentar el número de estaciones pluviométricas presentes en la CMAI, con el fin de mejorar el registro de agua lluvia caída en cotas altas y bajas, incluyendo la medición de aguanieve. Esto permitirá una mejor estimación de la captación de agua por hoya hidrográfica, predecir con mayor precisión los umbrales de activación aluvial y profundizar en el propio entendimiento de sus procesos para desarrollar a futuro modelos predictivos de mayor exactitud que puedan contribuir a la toma de decisiones.

Igualmente, para ejercer una adecuada política de RRD se requiere considerar la dimensión de la multiamenaza, particularmente de la cartografía de ella. Esta consideración permite comprender mejor el riesgo, definir acciones de mitigación y una mejor planificación urbana. Si bien en Chile se ha avanzado en la caracterización individual de los procesos físicos que constituyen las amenazas y en la generación de sistemas de monitoreo y alerta, aún se carece de una visión integrada de las amenazas, en lo que técnicamente debería definirse como multiamenaza. La falta de integración de las amenazas hace que el país no cuente con acciones operativas para la evaluación del multirisgo y su mitigación. Dada esta limitación se generó un proyecto FONDEF IDEA 2019 titulado *“Propuesta de guía, elaboración de mapas y plataforma de multiamenaza para la toma de decisiones críticas y adaptación al CC de regiones metropolitanas y grandes conurbaciones de Chile”*. Los grandes objetivos de este proyecto son: i) instalar capacidades para elaborar mapas de multiamenaza y ii) promover el uso del mapa de multiamenaza en el sistema público. Ambos son objetivos pioneros en el país, y en casi todo el mundo, constituyendo una innovación en la caracterización integrada de las amenazas naturales. Por lo tanto, este estudio piloto configura un bien público relevante que entrega información para la planificación territorial en el corto, mediano y largo plazo. Para cumplir con estos objetivos durante los años 2020 y 2021 se desarrolló un piloto de caracterización de la multiamenaza en el territorio de la CMAI. Esta prueba de concepto se plasmó en una guía, la cual contiene una descripción pormenorizada de las metodologías y los pasos sucesivos desarrollados. Las amenazas consideradas en la guía son las REMA (caída de rocas, DESL y flujos, incluyendo los flujos de lodo y/o detritos), INU por lluvia, amenaza sísmica, amenaza de tsunamis y amenaza volcánica

(flujo de lavas, flujo de lahares, caída de ceniza, flujos piroclásticos y eyección de balísticos). Además, se integra la amenaza antrópica de incendios forestales (González, y otros, 2022).

Lo anterior permitirá tener un estudio sistémico de la línea de base de amenazas y sus interacciones que afectan a una zona, y con esto poder elaborar mapas de multiamenaza, que permitan medir la probabilidad de que dos o más amenazas actúen de manera concatenada, debido a que en la naturaleza las amenazas pueden activarse de manera conjunta y potenciar su impacto en las personas y en la infraestructura.

7 Conclusiones y Recomendaciones

A partir de la búsqueda exhaustiva de información relacionada con la experiencia que han tenido algunos países andinos en temas que comprenden el análisis y estudio de eventos relacionados con MM, INU y AVT detonados por lluvias, y que significa un aporte importante para mejorar el proceso del CRD, en esta investigación logramos identificar y visibilizar lecciones aprendidas, en las cuales pudimos conocer la aplicación de métodos, procesos, estrategias, planes y proyectos que ayudan a cumplir con el objetivo de este trabajo y poder plasmar las siguientes conclusiones y recomendaciones.

Para cumplir con el objetivo general, se tuvieron en cuenta algunos países de la región andina que por sus características podrían tener similitudes con el EDC el municipio de Villamaría, Colombia, tal es así que para el análisis y comparación se seleccionaron dos casos relacionados, en Perú la CMAN y en Chile la CMAI.

Para poder caracterizar la ZDE o el EDC se establecieron parámetros y variables que por sus características son tenidas en cuenta en la generación de eventos relacionados con MM, INU y AVT, teniendo como principal factor detonante la PPT. De acuerdo a la revisión de la información relacionada se pudo determinar que los factores detonantes corresponden a una colección de datos geoespaciales que tienen influencia en la ocurrencia de estos eventos, y que son utilizados tanto en la explicación de los procesos existentes, como en los que se espera puedan ocurrir en el área de estudio.

Dentro de la investigación se pudo determinar que el factor condicionante que más afecta la estabilidad de las laderas corresponde a la pendiente del terreno, esta variable es considerada de gran importancia en el análisis de susceptibilidad por MM dado que se establece que el grado de inestabilidad de una ladera aumenta con la pendiente.

Aunado a lo anterior, otra variable que por sus características influye en la susceptibilidad de un área a la ocurrencia de eventos amenazantes, corresponde a la cobertura de la tierra y uso del suelo, esta se constituye en un factor determinante en las condiciones de estabilidad de una ladera, particularmente en lo que tiene que ver con control de la erosión e infiltración de aguas de escorrentía, igualmente, esta variable se relaciona con la densidad de la vegetación y el uso del suelo. Por otro lado, la acción antrópica y los cambios en el uso del suelo tienen una gran influencia sobre la estabilidad de las laderas, ya que se evidencia, que en las regiones con mayor dinámica de la población, el impacto antrópico en el medio ambiente contribuyen considerablemente a la iniciación y la reactivación de MM, algo similar ocurre cuando en eventos de fuertes lluvias, la cementación de los suelos causada por la creciente urbanización, impide la infiltración del agua de escorrentía, y hace que ésta llegue directo a los ríos, lo que desencadena incrementos abruptos de los caudales y de la turbidez del agua de los cursos fluviales que atraviesan las ciudades.

Por lo anterior es importante tener en cuenta que los tipos de coberturas permite determinar el grado de protección que la vegetación brinda al suelo contra la erosión hídrica, donde por ejemplo la vegetación de tipo arbórea densa constituye la protección más eficaz en comparación con suelos desnudos o sin ningún tipo de vegetación. Por ejemplo, en sectores de piedemonte, la

vegetación evita o reduce la creciente ocurrencia de INU y ALUV que afectan los sectores bajos de una cuenca hidrográfica.

Para poder realizar una caracterización adecuada con el fin de conocer el comportamiento de un área a diferentes eventos amenazantes, se recomienda definir y describir variables contribuyentes dentro de las cuales se debe describir como mínimo la geología, geología estructural, geomorfología, pendiente, cobertura de la tierra y uso del suelo, así como las variables detonantes tales como lluvia o sismo, cuya respuesta casi inmediata es un MM producto del rápido cambio en el estado de esfuerzos o disminución de la resistencia del material que conforma la ladera o talud, o INU por un aumento en el nivel del cauce normal de los ríos o quebradas debido al aporte de la escorrentía. Además, la PPT y la intensidad, que son factores de gran importancia para determinar la potencialidad torrencial que presentan los cursos de agua, constituyen un agente activador de fenómenos torrenciales. De acuerdo con estudios realizados, en el contexto histórico de estos fenómenos, la PPT fue por mucho el factor detonante más recurrente, ya sea PPT de carácter acumulado (p. ej., PPT antecedente al evento) o instantáneo (p. ej., intensidad de la PPT muy alta al momento del evento).

De acuerdo a lo anterior, para el municipio de Villamaría, se realizó la caracterización y perfil teniendo en cuenta las variables y parámetros seleccionados, de acuerdo a esto se pudo evidenciar que en el municipio se presenta un predominio de pendientes abruptas, variable que es considerada de gran aporte a la susceptibilidad por MM, otra de las variables caracterizadas y que contribuyen a la generación de eventos amenazantes corresponde a la cobertura de las tierras, que para el municipio se presenta un mayor porcentaje de cobertura relacionada a pastos limpios, este tipo de cobertura no brinda la protección suficiente contra la erosión hídrica y favorece la escorrentía.

En cuanto a la PPT, se pudo identificar que en el municipio el promedio de PPT se encuentra entre 2.000 y 2.200 mm/año, pero se debe tener en cuenta que en la zona media del municipio se tiene un promedio de 1.000 a 4.000 mm/año, evidenciado en el registro de PPT de la estación Papayal, estación que tiene un registro mayor de PPT mensual y anual con valores de 163,04 mm y 1.956,5 mm respectivamente. Aunado a lo anterior, en el histórico de eventos se pudo identificar que la mayoría de los eventos ocurridos se presentan en la zona media, demostrando que esta zona es la más susceptible a la generación de eventos amenazantes.

Dentro del análisis de los datos de PPT y la correlación con el histórico de eventos, además soportado con información técnica del Sistema de Monitoreo Ambiental de Caldas – SIMAC, donde se presentan parámetros del indicador de lluvia antecedente de 25 días (A25) con los cuales se clasifican los niveles de alerta por DESL en Manizales en tres categorías donde el nivel de alerta amarilla o baja se da para valores de A25 mayores e igual a 200 mm y menores a 300 mm, el nivel naranja o media para valores de A25 mayores e igual a 300 mm y menores a 400 mm, y el nivel rojo o alta para valores mayores o igual a 400 mm; e información de otros autores, se pudo establecer que para el municipio de Villamaría se pueden adoptar como umbrales críticos de lluvia, las lluvias acumuladas antecedentes de 25 días (A25) con valores sobre 200 mm y para las lluvias acumuladas de 15 días (A15) con valores de 150 mm, esto justificado en que la mayoría de los eventos se presentan cuando las lluvias acumuladas antecedentes superan los valores de

referencia adoptados, de acuerdo al análisis realizado, los eventos se presentan para valores de A25 superiores a 200 mm y para valores de A15 superiores a 150 mm. Los resultados de este análisis representan un primer intento en el municipio de Villamaría, por determinar umbrales de PPT que detonan eventos de MM y aumento en los niveles de los ríos y quebradas que generan fenómenos de INU, igualmente estos umbrales de PPT podrían brindar una aproximación a la identificación de lluvias que activan las cuencas hidrográficas detonando fenómenos de AVT o flujos de detritos.

Igualmente, es necesario incorporar las proyecciones realizadas en torno al CC y los diferentes escenarios esperados, dado que dichas proyecciones dan cuenta de un probable aumento en la ocurrencia de fenómenos amenazantes como MM y AVT producto del aumento en las precipitaciones, detonante principal de estos escenarios, es por esto que dichas proyecciones se deben constituir en un insumo base dentro del proceso de incorporación de la GRD y el CC como determinantes en un modelo de ocupación territorial sostenible.

También se realizó la caracterización para los casos relacionados en donde se tuvieron en cuenta las variables y parámetros definidos, con el objetivo de conocer mejor los casos seleccionados, identificar las características homogéneas con el EDC, así como las lecciones aprendidas que puedan ser replicadas para mejorar el CRD.

Teniendo en cuenta lo anterior, se seleccionó la CMAN en Perú y la CMAI en Chile, en donde se realizó la caracterización de cada una de las cuencas, se describieron y analizaron las variables y parámetros definidos, se identificaron los eventos históricos y el comportamiento de la PPT en la cuenca.

A partir de esta caracterización se realizó una matriz de comparación donde se pudo identificar que las cuencas poseen algunas variables con características similares al EDC, como por ejemplo la geología, donde los depósitos de flujos de escombros (coluviales), de caída piroclástica, fluviales y glaciares, son comunes en las tres áreas de estudio, igual pasa con la variable de geología estructural, donde a causa de la influencia que tiene la zona de subducción del pacífico, en las áreas se presentan características estructurales asociadas a este gran sistema, presentándose sistemas de fallas con tendencia norte sur, siguiendo el lineamiento del plegamiento andino. Para la variable pendiente, se pudo observar que en las tres zonas se presentan rangos de pendientes similares y que se encuentran clasificadas como pendientes abruptas a muy escarpadas teniendo entonces que para la mayor parte del área del EDC (Villamaría) se presentan pendientes entre los 19 - 40°, para la CMAN pendientes entre los 30 - 70° y para la CMAI, hacia la parte alta, se presentan pendientes que superan los 30° de inclinación. En cuanto a la variable geomorfología, se identificó que para los tres casos hay similitudes en las geoformas asociadas a los ambientes glaciar, volcánico y estructural, teniendo un marcado predominio del ambiente glaciar para las cuencas de los ríos Mantaro y Maipo, a diferencia del EDC.

De acuerdo a la matriz de comparación también se pudieron identificar algunas diferencias que tienen las cuencas de los ríos Mantaro y Maipo con respecto al EDC Villamaría, con respecto a la geología, en ambas cuencas se identifican unidades de rocas sedimentarias; en la parte estructural, estas cuencas presentan además del fallamiento, estructuras como pliegues,

anticlinales y sinclinales, mientras que para el EDC solo se presenta fallamiento asociado al sistemas de fallas que atraviesa la zona.

Para la PPT se pudo identificar, con esta matriz de comparación, que en la CMAN se presentan precipitaciones promedio por encima de los 1.000 mm/año, en la CMAI precipitaciones promedio de 1.200 y 2.000 mm/año y en el municipio de Villamaría, precipitaciones entre los 1.000 a 4.000 mm/año, con esta información se puede identificar que la cantidad de lluvia anual se encuentra dentro de rangos similares para los tres casos. Y de acuerdo a los registros de PPT de las estaciones, estudios e informes de características climatológicas y de eventos históricos, se pudo establecer umbrales de PPT que detonan eventos relacionados con MM, INU y AVT. Teniendo entonces que, para el municipio de Villamaría se sugieren umbrales de lluvias diarias >70 mm, de lluvias antecedentes 15 días (A15) >150 mm y de lluvias antecedentes 25 días (A25) >200 mm; para la CMAN (Perú) umbrales de 7 -15 mm de lluvia diaria y lluvias antecedentes 15 días (A15) >110 mm y para la CMAI (Chile) umbral de lluvia diaria entre 20 - 70 mm.

Igualmente, se pudo observar que los umbrales de PPT para las estaciones utilizadas para analizar el comportamiento de la lluvia y la relación con los eventos generados en la CMAN tienen valores cercanos a los valores determinados como umbrales de PPT para las estaciones Papayal y Aeropuerto La Nubia ubicados en el municipio de Villamaría Caldas, las cuales presentan valores de precipitaciones diarias entre los 20-50 mm/día y entre los 20-72 mm/día los cuales pueden ser asociados como detonantes de MM e INU.

De acuerdo a las similitudes encontradas de las variables y parámetros descritos para los tres casos, se puede considerar que las lecciones aprendidas en cuanto a la GRD de los países nombrados en los casos relacionados, son aplicables al EDC que corresponde al municipio de Villamaría, Colombia.

De acuerdo al párrafo anterior, y teniendo en cuenta la información relacionada con la GRD de Perú se puede traer como experiencia exitosa el fortalecimiento de procesos educativos de diferentes programas de pregrado que incluyen temas relacionados con la GRD, se sugiere para el municipio de Villamaría fomentar en las instituciones educativas y universitarias programas y proyectos obligatorios con temas base para la GRD y para la Adaptación al CC en las diferentes áreas del conocimiento, teniendo en cuenta las disciplinas que son necesarias en el estudio de los fenómenos relacionados con los riesgos de desastres, tales como economía, geología, ingeniería civil, trabajo social, sociología, ingeniería ambiental y agronomía.

En cuanto a la experiencia que ha tenido Chile en la atención de emergencias por REMA tipo flujo, ven la necesidad de mejorar la distribución y aumentar el número de estaciones pluviométricas presentes en la CMAI, con el fin de mejorar el registro de agua lluvia caída en cotas altas y bajas. Esto permitirá una mejor estimación de la captación de agua por hoyo hidrográfica, predecir con mayor precisión los umbrales de activación aluvial y profundizar en el propio entendimiento de sus procesos para desarrollar a futuro modelos predictivos de mayor exactitud que puedan contribuir a la toma de decisiones, lo anterior puede ser aplicado en el municipio de Villamaría, teniendo en cuenta la necesidad de mejorar la instrumentación de las cuencas hidrográficas del municipio a fin de mejorar el registro para llenar los vacíos de información y mejorar el CRD.

Para el municipio de Villamaría también se sugiere adoptar la experiencia que ha tenido Chile en el CRD, aplicando el proyecto piloto de caracterización de la multiamenaza en el territorio de la CMAI, el cual tiene en cuenta que para ejercer una adecuada política de RRD se requiere considerar la dimensión de la multiamenaza, particularmente de la cartografía lo que permite comprender mejor el riesgo, definir acciones de mitigación y una mejor planificación urbana. Esta caracterización permite tener una visión integrada de amenazas como REMA (caída de rocas, DESL y flujos, incluyendo los flujos de lodo y/o detritos), INU por lluvia, amenaza sísmica, amenaza de tsunamis y amenaza volcánica (flujo de lavas, flujo de lahares, caída de ceniza, flujos piroclásticos y eyección de balísticos) así como la integración de la amenaza antrópica de incendios forestales. Lo anterior permitirá tener un estudio sistémico de la línea de base de amenazas y sus interacciones que afectan a una zona, y con esto poder elaborar mapas de multiamenaza, que permitan medir la probabilidad de que dos o más amenazas actúen de manera concatenada, debido a que en la naturaleza las amenazas pueden activarse de manera conjunta y potenciar su impacto en las personas y en la infraestructura.

8 Referencias bibliográficas

- Alcaldía municipal de Villamaría. (2020). *Plan de Desarrollo Municipal 2020-2023. Un sueño llamado Villamaría*. Villamaría, Colombia: Alcaldía Municipal de Villamaría, Caldas.
- Arango, J. (2000). *Relaciones lluvia deslizamiento y zonificación geotécnica en la comuna 2 de la ciudad de Manizales*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Aristizábal Giraldo, E. V., Vélez Upegui, J. I., & Martínez Carvajal, H. E. (2016). Influencia de la lluvia antecedente y la conductividad hidráulica en la ocurrencia de deslizamientos detonados por lluvias utilizando el modelo SHIA_Landslide. *Revista EIA* (26), 31-46.
- Aristizábal, E., Martínez, H., & Vélez, J. I. (2010). Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 34 (131), 209-227.
- Arriagada Sanhueza, P. J. (2021). *Análisis de la variabilidad espacial de tendencias observadas en el recurso hídrico de la cuenca del Río Maipo y su efecto en la disponibilidad hídrica de la Región Metropolitana*. Santiago, Chile: Universidad de Concepción.
- Bellido B, E. (1969). *Sinopsis de la Geología del Perú*. Lima: Servicio de Geología y Minería, Perú.
- Biblioteca Nacional de Chile. (24 de Marzo de 2024). *Memoria Chilena, Biblioteca Nacional de Chile*. Obtenido de Primera parte: los factores naturales: <https://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-75466.html>
- CENEPRED. (2015). *Guía metodológica para la evaluación de los efectos socioeconómicos y ambientales e impacto de los desastres*. Lima - Perú: Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción de Riesgo de Desastres.
- CIGIDEN. (2023). *Informe Post Desastre. Evento: Inundaciones 21-26 junio 2023. Cuenca Río Maipo*. Santiago, Chile: Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN).
- CIIFEN. (2017). *Estimación de la vulnerabilidad frente al cambio climático de la cuenca del río Mantaro*. Lima: Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño - CIIFEN. USAID.
- Congreso de la República de Colombia. (27 de julio de 2018). *Ley 1931 de 2018. Por la cual se establecen directrices para la gestión del cambio climático*. Bogotá D.C., Colombia: Diario Oficial No. 50.667 del 27 de julio de 2018.
- Congreso de la República de Colombia. (24 de abril de 2012b). *Ley 1523 de 2012. Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones*. Bogotá D.C., Colombia: Diario Oficial No. 48.411 de abril 24 de 2012.
- Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres Villamaría. (2020). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres*. Villamaría.

- Convenio Corpocaldas - ASOCARS - U.N. (2013). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río Chinchiná. Síntesis del Diagnóstico*. Manizales: CORPOCALDAS.
- Convenio Corpocaldas - ASOCARS - U.N. IDEA. (2014). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río Chinchiná. Fase de Diagnóstico. Tomo I*. Manizales: CORPOCALDAS.
- Córdova Aguilar, H. (2020). Vulnerabilidad y gestión del riesgo de desastres frente al cambio climático en Piura, Perú. *Semestre Económico*, 23 (54), 85-112.
- Corominas, J., Van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulus, S., & et al. (2013). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, 209-263.
- Corpocaldas, Universidad Autónoma de Manizales. (2019). *Agendas de Cambio Climático Villamaría - Caldas. Plan Integral de Gestión de Cambio Climático del Departamento de Caldas*. Manizales.
- Coumerme Gonzáles, D. A. (2021). *Caracterización de eventos meteorológicos extremos en la parte alta del Río Maipo, Chile: Efecto de eventos de lluvia sobre nieve y proyecciones por Cambio Climático*. Santiago, Chile: UNIVERSIDAD DE CHILE. FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS. DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL.
- Crozier, M. J. (2010). Deciphering the effect of climate change on landslide activity: A review. . *Geomorphology*, 124(3-4), 260-267.
- Cruden, D. M. (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, no. 43., 27-29.
- Cuevas, A. B., & Preciado, N. E. (2018). Asia Pacífico frente al Acuerdo de París contra el cambio climático: geopolítica y cooperación. *ESTUDIOS DE ASIA Y ÁFRICA*, VOL. 53, NÚM. 1 (165),, 151-188.
- Cuya, A. A. (2017). *Escenarios de riesgo sísmico y lluvias intensas en el área urbana de Chosica. Tesis Pregrado*. Lima - Perú: UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL. Escuela Profesional de Ingeniería.
- Delgado, E. (2007). *Geodinámica y valoración del nivel potencial de riesgo natural en alta montaña: cuenca del río Las Leñas, vertiente occidental de los Andes Centrales. Memoria para optar al título de Geógrafo*. Santiago, Chile: UNIVERSIDAD DE CHILE. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Escuela de Geografía.
- DGA. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del Río Maipo*. Santiago, Chile: Gobierno de Chile. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas.
- DGA. (2021). *PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA DEL MAIPO. S.I.T. N° 471. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación*. Santiago, Chile: ICASS SpA.

- DGA. (2021). *PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LAS CUENCAS COSTERAS ENTRE MAIPO Y RAPEL, S.I.T. N° 488*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación. Santiago, Chile: ICASS SpA.
- DNP. (2004). *Autorización a la Nación para contratar operaciones de crédito externo con la Banca Multilateral hasta por US \$260 millones para financiar.... Documento CONPES 3318*. Bogotá, D.C.,.
- DNP. (2012). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. ABC: Adaptación Bases Concenputales. MARCO CONCEPTUAL Y LINEAMIENTOS DEL PNACC*. Bogotá, D.C.
- DNP. (2022). *Visión Colombia 2050 "Discusión sobre el país del futuro"*. Bogotá, D.C.: Editorial Planeta.
- DNP. (11 de 09 de 2023). *Departamento Nacional de Planeación - Terridata* . Obtenido de <https://terridata.dnp.gov.co/index-app.html#/perfiles/17873>
- DW. (11 de 09 de 2023). *DW Made for minds*. Obtenido de <https://www.dw.com/es/julio-de-2023-se-confirma-como-el-mes-m%C3%A1s-caluroso-registrado-hasta-la-fecha/a-66467671>
- Ecosistemas. (2021). *Usos y abusos – Humanidad en las cuencas – Río Maipo, es una publicación de Ecosistemas con el auspicio de las Fundaciones Lush Charity Pot, Marisla, Patagonia Inc. y Weeden*. Santiago, Chile: Ecosistemas con el auspicio de las Fundaciones Lush Charity Pot, Marisla, Patagonia Inc. y Weeden. Obtenido de <https://www.ecosistemas.cl/wp-content/uploads/2021/02/Usos-y-abusos-Humanidad-en-las-cuencas-Rio-Maipo-web.pdf>
- Endara Huanca, S. M. (2016). *Ciclos horarios de precipitación en el Perú utilizando información satelital*. Lima, Perú: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI.
- Gariano, S. L., & Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, 162, 227-252.
- Garreaud, R. (2013). Warm winter storms in Central Chile. *Journal of Hydrometeorology*, 14(5), 1515-1534.
- Garreaud, R. (28 de marzo de 2024). *Vuelven los gigantes: un análisis preliminar de la tormenta ocurrida entre el 21 y 26 de junio de 2023 en Chile central*. Obtenido de Reporte de Center for Climate and Resilience Research (CR)2.: <https://www.cr2.cl/analisis-cr2-vuelven-los-gigantes-un-analisis-preliminar-de-la-tormenta-ocurrida-entre-el-21-y-26-de-junio-de-2023-en-chile-central/>
- Geoaprendo. (26 de marzo de 2024). *Geoaprendo*. Obtenido de https://www.geoaprendo.com/2014/12/informe-geomorfologia-dinamica-del.html#google_vignette

- Gobierno de Chile. (2020). *POLÍTICA NACIONAL Y PLAN ESTRATÉGICO NACIONAL PARA LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES (2020-2030)*. Santiago, Chile: Departamento de Gestión del Sistema Nacional de Protección Civil ONEMI.
- González, G., Jensen, E., Aron, F., Roldán, F., Sáez, E., Díaz, F., . . . Zúñiga, A. (2022). *Guía Metodológica para la Caracterización de la Multiamenaza de la Cuenca del Río Maipo. Proyecto FONDEF 19i10021*. Antofagasta, Chile.: Centro de Investigación para la Gestión Integrada de Riesgo de Desastres CIGIDEN.
- Gonzalez, H. (2001). *Geología de las planchas 206 Manizales y 225 Nevado del Ruiz. Memorias explicativas de los mapas. Escala 1:100.000*. Bogotá D.C: INGEOMINAS.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in Central and Southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98(3), 239-267.
- Hunger, O., Evans, S. G., Bovis, M. J., & Hutchinson, J. N. (2001). A Review of the Classification of Landslides of the Flow Type. *Environmental & Engineering Geoscience*, 7(3), 221-238.
- IDEAM - UNAL. (2018). *Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia*. Bogotá D.C. doi:ISBN: 978-958-8067-97-1
- IDEAM. (2005). *Atlas climatológico de colombia*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM.
- IDEAM. (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000*. Bogotá, D. C., 72p: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM, IGAC y Cormagdalena. (2008). *Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1: 100.000*. Bogotá D.C.
- IGP. (2005). *Diagnóstico de la Cuenca del Mantaro bajo la visión del cambio climático*. . Lima: CONAM- Consejo Nacional del Ambiente.
- IGP. (2005). *Vulnerabilidad actual y futura ante el cambio climático y medidas de adaptación en la cuenca del río Mantaro. Vol. I, II y III*. Lima, Perú.
- IGP. (2005b). *Diagnóstico de la cuenca del Mantaro bajo la visión del cambio climático: Volumen II*. Lima, Perú: CONAM - Consejo Nacional del Ambiente.
- IGP. (2005c). *Vulnerabilidad actual y futura ante el cambio climático y medidas de adaptación en la cuenca del río Mantaro. Cambio Climático / Evaluación Local Integrada de Cambio Climático para la Cuenca del Río Mantaro, Volumen 3*. Lima, Perú: Fondo Editorial del Consejo Nacional del Medio Ambiente [CONAM].
- IGP. (2012). *Manejo de riesgos de desastres ante eventos meteorológicos extremos en el valle del Mantaro. Volumen 2*. Lima, Perú: Instituto Geofísico del Perú - IGP.

- INGEMMET. (1980). *Estudio Geodinámico de la cuenca del río Mantaro. Boletín No. 5*. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. SERIE C: Geodinámica e Ingeniería Geológica.
- IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*. Ginebra, Suiza: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jakob, M., & Hungr, O. (2005). *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*. Nueva York: Springer.
- Jaramillo, A. (2005). *Clima andino y café en Colombia*. Manizales: Repositorio digital del Centro Nacional de Investigaciones de Café - CENICAFE.
- Lavado Casimiro, W. S., Labat, D., Guyot, J. L., & Ardoin-Bardin, S. (2011). *Assessment of climate change impacts on the hydrology of the Peruvian Amazon-Andes basin*. Hydrological Processes.
- León Lecaros, W. R., Palacios Moncayo, O., Vargas Vilchez, L., & Sánchez Fernández, A. W. (2000). *Memoria explicativa del mapa geológico del Perú Escala 1: 100,000. [Boletín A 136]*. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico - INGEMMET.
- MADS. (2017). *Política nacional de cambio climático / Luis Gilberto Murillo, Ministro (2016 - :); [Eds.] Dirección de Cambio Climático: Florián Buitrago, Maritza; Pabón Restrepo, Giovanni Andrés; Pérez Álvarez, Paulo Andrés; Rojas Laserna, Mariana; Suárez Castaño, Rodr. Bogotá, D.C.*
- Mamani Gonzales, D. M. (2013). *Simulación de la Circulación Atmosférica a nivel superficial para la Cuenca del Río Mantaro usando el Modelo Atmosférico de Mesoescala MM5. Tesis*. Lima, Perú: Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos. Univerisad Mayor de San Marcos.
- Mardones Leyton, V. A. (2019). *Evolución tectónica meso-cenozoica de la cordillera principal de Los Andes de Chile Central, 33° 30'S-34° S*. Santiago, Chile: UNIVERSIDAD DE CHILE. FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS. DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA.
- Marín, M., Contreras, J. P., & Olea, P. (2017). *Efectos Geológicos del Sistema Frontal en la Zona Central del País, el 25 y 26 de febrero de 2017. Región Metropolitana, Comuna San José de Maipo. INF-METROPOLITANA-01.2017*. Santiago, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería. Subdirección Nacional de Geología.
- Mayorga M, R., Hurtado M, G., & Benavides, H. (2011). *Evidencias de cambio climático en Colombia con base en información estadística. Nota Técnica Ideam*. Bogotá. D.C.
- MIDAGRI. (11 de Enero de 2024). *Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego - MIDAGRI*. Obtenido de <https://www.midagri.gob.pe/portal/datero/53-sector-agrario/el-clima/366-generalidades>
- Millán, C. E. (2020). *SILVIA: Sistema de Monitoreo de movimientos en masa potenciales generados por lluvias intensas*. Lima - Perú: Estudios Hidrológicos del SENAMHI. Resúmenes Ejecutivos.
- MINAGRI. (2022). *Recursos Naturales comuna San José de Maipo*. Santiago, Chile: CIREN.

- MINAGRI. (26 de marzo de 2024). *CIREN Centro de Información de Recursos Naturales*. Obtenido de Determinan caracterización de uso de suelo para la cuenca del río Maipo: <https://www.ciren.cl/noticias/determinan-caracterizacion-de-uso-de-suelo-para-la-cuenca-del-rio-maipo/>
- Ministerio de Economía y Finanzas del Perú. (2011). *Lecciones Aprendidas de la Gestión del Riesgo en Procesos de Planificación e Inversión para el Desarrollo*. Lima, Perú: Biblioteca Nacional del Perú N° 2011-03731. Cooperación Alemana al Desarrollo – Agencia de la GIZ en el Perú.
- Ministerio de Salud. (12 de octubre de 2021). *Departamento de Gestión de Riesgos en Emergencias y Desastres*. Obtenido de Chile puso en marcha una nueva institucionalidad para la GRD: <https://degreyd.minsal.cl/chile-puso-en-marcha-una-nueva-institucionalidad-para-la-grd/>
- MMA. (2017). *Plan de Acción Nacional de Cambio climático 2017-2022*. Santiago, Chile: Ministerio del Medio Ambiente: MMA.
- MMA. (2021). *Informe del Estado del Medio Ambiente. Capítulo 17. Eventos Extremos y Desastres*. Santiago, Chile: Ministerio del Medio Ambiente: MMA.
- Municipalidad de San José de Maipo. (2010). *PLADECO Plan de Desarrollo Comunal San José de Maipo 2010-2014. Tomo I Caracterización Diagnóstico Técnico Comunal*. San Jose de Maipo, Chile.
- Neiman, P. J., Ralph, F. M., Wick, G. A., Lundquist, J. D., & Dettinger, M. D. (2008). Meteorological characteristics and overland precipitation impacts of atmospheric rivers affecting the west coast of North America based on eight years of SSM/I satellite observations. *Journal of Hydrometeorology*, 9(1), 22-47.
- Niemeyer, H., & Cereceda, P. (1983). *Geografía de Chile - Tomo VIII: Hidrografía. 1° edición*. Santiago, Chile: Instituto Geográfico Militar.
- OMM. (2008). *Guía de prácticas hidrológicas*. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial. Tiempo - Clima - Agua.
- OMM. (2021). *El Estado del clima en América Latina y el Caribe 2020. OMM-N° 1272*. Ginebra, Suiza: Tiempo Clima Agua. Organización Meteorológica Mundial.
- OMM. (2022). *Estado del clima en América Latina y el Caribe 2021. OMM-N° 1295*. Ginebra, Suiza: Tiempo Clima Agua. Organización Meteorológica Mundial.
- OMM. (19 de marzo de 2024). *Organización Meteorológica Mundial*. Obtenido de Los indicadores del cambio climático alcanzaron niveles sin precedentes en 2023: OMM. Comunicado de Prensa: <https://wmo.int/es/news/media-centre/los-indicadores-del-cambio-climatico-alcanzaron-niveles-sin-precedentes-en-2023-omm>
- Ordoñez, J. (2020). *Movimientos en masa por lluvias intensas en el Perú*. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú –SENAMHI. Dirección de Hidrología –DHI.

- Qinwen, L., Yafeng, L., Yukuan, W., & Pei, X. (2019). Debris Flow Risk Assessment Based on a Water-Soil Process Model at the Watershed Scale Under Climate Change: A Case Study in a Debris-Flow-Prone Area of Southwest China. *Sustainability*, 11(11):3199. doi:https://doi.org/10.3390/su11113199
- Quintana, J., & Aceituno, P. (2006). Trends and Interdecadal Variability of Rainfall in Chile. *Proceedings of 8 ICSHMO, Foz do Iguaçu, Brazil.*, 371-372.
- Reichenbach, P., Busca, C., Mondini, A. C., & Rossi, M. (2014). The Influence of Land Use Change on Landslide Susceptibility Zonation: The Briga Catchment Test Site (Messina, Italy). *Environmental Management*, 54, 1372-1384. doi:10.1007/s00267-014-0357-0
- Risco, E., Lavado-Casimiro, W., & Felipe, O. (2022). *Modelamiento de susceptibilidad a movimientos en masa producto de lluvias intensas a nivel nacional. Estudio Final*. Lima, Perú: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú -SENAMHI.
- Salazar Gutiérrez, L. F. (2018). *Susceptibilidad y amenaza a los movimientos en masa de suelos de laderas en zonas cafeteras colombianas*. Palmira, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- SENAMHI. (2007). *Escenarios de cambio climático en la Cuenca del río Mantaro para el año 2100*. Lima, Perú: SENAMHI - Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Centro de Predicción Numérica - CPN.
- SENAMHI. (2011). *Escenarios de Cambio Climático en la Cuenca del Río Mantaro para el año 2100. Resumen Técnico*. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente - MINAM.
- SENAMHI. (2014). *El fenómeno EL NIÑO en el Perú*. Lima, Perú: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú-SENAMHI.
- Sepúlveda, N., & Jara, C. (2016). *Efectos Geológicos del Sistema Frontal en la Zona Central del País, 14-18 de abril de 2016. Región Metropolitana - Comuna San José de Maipo. INF-SAN JOSÉ DE MAIPO-01*. Santiago, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- SERNAGEOMIN. (2001). *Estudio de peligros de flujos de detritos en el área de El Alfalfal, Cuenca del Río Colorado, Comuna San José del Maipo. 11237c.1*. Santiago, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería. Subdirección Nacional de Geología. Departamento de Geología Aplicada.
- SERNAGEOMIN. (2003). *Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería*. Santiago, Chile: Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión1.0, 2003).
- SGC. (2014). *Memoria Explicativa del Mapa Geomorfológico Aplicado a Movimientos en Masa. Escala 1:100.000. Plancha 206 - Manizales*. Sogamoso, Colombia: Servicio Geológico Colombiano .
- SGC. (2017). *Guía Metodológica de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25.000*. Bogotá, D.C., Colombia: Servicio Geológico Colombiano.

- SGC. (2021). *Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenida torrencial*. Bogotá, D.C., Colombia: Servicio Geológico Colombiano.
- Soto Maass, A. I. (2022). *Variabilidad espacial y temporal de la geoquímica de los ríos en la cuenca del Río Maipo*. Santiago, Chile: UNIVERSIDAD DE CHILE. FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS. DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA.
- Soto, M. V., Castro, C. P., Rodolfi, G., Maerker, M., & Padilla, R. (2006). Procesos geodinámicos actuales en ambiente de media y baja montaña. Borde meridional de la cuenca del río Maipo, Región Metropolitana de Santiago. *Revista de geografía Norte Grande (N°35)*, 77-95.
- Taype Ramos, V. (1976). Mecánica del Deslizamiento de Ccochacay en el río Mantaro. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*. Tomo 52, 73-90.
- Thiele, R., & Cubillos, E. (1980). *Carta de Santiago*. Santiago, Chile.
- UN. (11 de septiembre de 2023). *UN News - Global perspective Human stories*. Obtenido de <https://news.un.org/es/story/2023/07/1523012>
- UNDRR. (2021). *Informe de evaluación regional sobre el riesgo de desastres en América Latina y el Caribe, Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR)*. Panamá.
- UNGRD. (2017). *Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes*. Bogotá: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.
- UNGRD. (2018). *Guía para la integración de la Variabilidad Climática con la Gestión del Riesgo de Desastres a nivel territorial*. Bogotá, D.C.
- UNGRD. (2019). *Atlas de Riesgo de Colombia: revelando los desastres latentes*. Bogotá, D.C.: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - Ingeniar: Risk Intelligence.
- UNGRD. (2022). *Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. Una estrategia de desarrollo 2015 - 2030. Actualización*. Bogotá.
- Upegui V, J. J., Alzáte O, M., Duque M, N. D., & Zuluaga A, B. H. (2015). *Entendimiento de fenómenos ambientales mediante análisis de datos*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Facultad de Administración.
- Urzúa Flores, A. I. (2022). *Carta geomorfológica y dinámica sedimentaria de la cuenca de la laguna Lo Encañado (33°40'S-70°8'O). Región Metropolitana*. Santiago, Chile: UNIVERSIDAD DE CHILE. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Escuela de Pregrado. Carrera de Geografía.
- Valdés-Pineda, R., Cañón, J., & Valdés, J. B. (2018). Multi-decadal 40- to 60-year cycles of precipitation variability in Chile (South America) and their relationship to the AMO and PDO signals. *Journal of Hydrology*. Vol 556 , 1153–1170.
- Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdés, J. B., Olivares, C., Vera, M., . . . Helwig, B. (2014). Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *Journal of Hydrology*, Vol 519, 2538–2567.

- Videla Giering, Y. A. (2013). *Modelación hidrológica de la cuenca alta del río Maipo mediante la aplicación del software "Cold Region Hydrological Model" (2008-2012)*. Santiago, Chile: UNIVERSIDAD DE CHILE. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Escuela de Pregrado. Carrera de Geografía.
- Wang, G., & Sassa, K. (2003). Pore pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine particle content. *Engineering Geology Vol. 69*, 109-125.
- World Economic Forum. (2023). *The Global Risks Report 2023. 18th Edition*. Cologny/Geneva, Switzerland: the World Economic Forum.
- Zubieta, R., & Lagos, P. (2010). *Cambios de la superficie glaciar en la cordillera Huaytapallana: periodo 1976-2006*. Lima, Perú: Libro Cambio climático en la cuenca del río Mantaro. Balance de 7 años de estudio.
- Zubieta, R., & Saavedra, M. (2009). *Distribución espacial del índice de concentración de precipitación diaria en los Andes Centrales Peruanos: Valle del Río Mantaro*. Lima, Perú: Tecnia 19 (2).

9 Anexos

Anexo 1. Inventario y evaluación de información secundaria.



Universidad[®]
Católica
de Manizales

VIGILADA MINEDUCACIÓN

*Obra de Iglesia
de la Congregación*



Hermanas de la Caridad
Dominicas de La Presentación
de la Santísima Virgen

Universidad Católica de Manizales
Carrera 23 # 60-63 Av. Santander / Manizales - Colombia
PBX (6)8 93 30 50 - www.ucm.edu.co