

ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LAS HELADAS COMO INSTRUMENTO PARA
LA EFICIENTE PLANIFICACIÓN AGRÍCOLA EN LA PROVINCIA DE PAMPLONA
NORTE DE SANTANDER

YEISON ALEXIS FLOREZ PEÑA

RODRIGO DE JESUS VARGAS MARTINEZ

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Línea de Investigación

Análisis y Modelamiento Espacial

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización Sistemas de información Geográfica

Manizales, 2022

Resumen

Las heladas son un fenómeno que ocurre cuando se presentan ciertas condiciones atmosféricas como el descenso de la temperatura del aire de la superficie terrestre por debajo de los 0 ° C, presencia de vientos tranquilos, cielos con poca nubosidad y una inversión de temperatura que causa un tipo de escarcha radiactiva, o por advección de aire frío en una región durante condiciones de vientos moderados a fuertes, cielos nublados y sin inversión que cause heladas de tipo advectiva. En este trabajo de investigación se analizaron los estudios de diversos autores compilando las variables relevantes según cada uno de estos, así mismo se analizaron las posibles metodologías de cálculo de amenaza aplicables al fenómeno y se obtuvo información de la comunidad a través de un panel de expertos diseñado, dando como resultado la formula propuesta, se obtuvo como resultado que los meses con mayor amenaza ante heladas en la provincia de Pamplona son Diciembre, Enero y Febrero con un Porcentaje para el rango de amenaza alto de 19.4%, 13.3% y 12.5% respectivamente, resultados validados por la información obtenida a través del panel de expertos, estos resultados permiten consolidar una metodología aplicable para el cálculo de amenaza ante heladas.

Palabras clave: (Heladas, Amenaza, Velocidad del Viento, Temperatura, Pendientes, Sistemas de Información Geográfica).

Abstract

Frost is a phenomenon that occurs when certain atmospheric conditions occur, such as a drop in the air temperature of the earth's surface below 0°C , the presence of calm winds, skies with little cloudiness and a temperature inversion that causes a type of radioactive frost, or by advection of cold air into a region during conditions of moderate to strong winds, cloudy skies, and no inversion to cause advective frost. In this research work, the studies of various authors were analyzed, compiling the relevant variables according to each of these, likewise the possible methodologies for calculating the threat applicable to the phenomenon were analyzed and information was obtained from the community through a panel of experts. designed, resulting in the proposed formula, it was obtained as a result that the months with the greatest threat to frost in the province of Pamplona are December, January and February with a percentage for the high threat range of 19.4%, 13.3% and 12.5% respectively, results validated by the information obtained through the panel of experts, these results allow to consolidate an applicable methodology for the calculation of frost threat.

Keywords: (Frost, Hazard, Wind Speed, Temperature, Slopes, Geographic Information Systems).

Contenido

	Pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN	11
1.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA	11
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	12
1.3 JUSTIFICACIÓN	14
2. OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GENERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. ANTECEDENTES	17
4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL	28
5. REFERENTE TEÓRICO	30
5.1 HELADAS	31
5.2 ANALISIS Y GESTION DEL RIESGO	34
5.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	35
5.4 SENSORES REMOTOS	36
	37
5.5 ESTADÍSTICA ESPACIAL	37
5.6 METODO DE KRIGING	38
5.7 METODO IDW INVERSO PONDERADO DE LA DISTANCIA	39
6. METODOLOGÍA	40
6.1 PROCEDIMIENTO	41

7. RESULTADOS	49
7.1 SELECCIÓN DE VARIABLES DE ESTUDIO	49
7.2 OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN	51
7.3 DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN Y PONDERACIÓN DE CADA UNA DE LAS VARIABLES ANALIZADAS EN LA INFLUENCIA DE OCURRENCIA DE UNA HELADA.	59
7.4 IDENTIFICACIÓN DE LAS ÁREAS DE LA PROVINCIA DE PAMPLONA MÁS SUSCEPTIBLES A LA OCURRENCIA DE HELADAS DURANTE LAS DIFERENTES ÉPOCAS DEL AÑO MEDIANTE UNA EVALUACIÓN ESPACIO TEMPORAL.	64
7.5 OBTENCIÓN DE CARTOGRAFÍA TEMÁTICA	68
7.6 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA A HELADAS	93
8. CONCLUSIONES	99
9. RECOMENDACIONES	101
10. REFERENCIAS	102

Lista de figuras

Figura 1. Provincia de Pamplona.....	11
. Figura 2. Aplicaciones de los Sistemas de información geográfica	37
Figura 3. Tipos de Kriging.....	38
Figura 4. Principios de la interpolacion	38
Figura 5. Pasos propuestos.....	40
Figura 6. Área de estudio	41
Figura 7. Plataforma IDHIME	52
Figura 8. Estaciones velocidad del viento.....	53
Figura 9. Estaciones humedad relativa	54
Figura 10. Estaciones nubosidad.....	55
Figura 11. Estaciones Temperatura.....	56
Figura 12. Modelo Digital de Elevación.....	57
Figura 13. Coberturas Área de estudio	58
Figura 14. Distribución de respuestas por municipios.....	59
Figura 15. Mes más afectado por heladas.....	60
Figura 16. Variables con mayor importancia en la ocurrencia de las heladas	60
Figura 17. Formula modelo de incendios	63
Figura 18. Histograma datos estaciones (humedad, nubosidad, Temperatura, Velocidad del viento)	65

Figura 19. Normal QQ Plot variables (humedad, nubosidad, Temperatura, Velocidad del viento)	66
Figura 20. Diagrama de Voronoi variables (humedad, nubosidad, Temperatura, Velocidad del viento)	67
Figura 21. Mapa de Alturas	69
Figura 22. Mapa Alturas reclasificado	71
Figura 23. Mapas pendientes	73
Figura 24. Mapa Pendientes reclasificado	75
Figura 25. Mapa de coberturas	77
Figura 26. Mapa coberturas reclasificado	79
Figura 27. Menú Geostatistical Analyst (interpolación Velocidad del viento)	80
Figura 28. Mapas Velocidad del Viento	81
Figura 29. Mapas Velocidad del viento Reclasificado	82
Figura 30. Menu Geostatistical Analyst (interpolación Humedad Relativa)	84
Figura 31. Mapas Humedad relativa	85
Figura 32. Mapas Humedad relativa reclasificado	86
Figura 33. Menú Geostatistical Analyst (interpolación Nubosidad)	87
Figura 34. Mapas Nubosidad	87
Figura 35. Mapas Nubosidad reclasificado	89
Figura 36. Menú Geostatistical Analyst (interpolación Nubosidad)	90
Figura 37. Mapas Temperatura	91
Figura 38. Mapas Temperatura reclasificado	92

Figura 39. Resultado Amenaza Algebra de Mapas.....	94
Figura 40. Amenaza Mensual Provincia de Pamplona	95

Lista de tablas

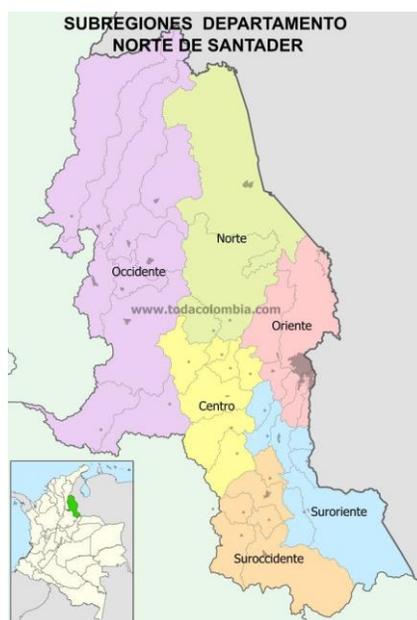
Tabla 1. Estaciones utilizadas para el análisis de la humedad relativa	43
Tabla 2. Estaciones utilizadas para el análisis de la nubosidad	43
Tabla 3. Estaciones utilizadas para el análisis de la temperatura mínima	44
Tabla 4. Estaciones utilizadas para el análisis de la velocidad del viento	45
Tabla 5. Revisión bibliográfica.....	49
Tabla 6. Promedios mensuales multianuales velocidad del viento(m/s)	53
Tabla 7. Promedios mensuales multianuales humedad relativa (%).....	54
Tabla 8. Promedios mensuales multianuales nubosidad.....	55
Tabla 9. Promedios mensuales multianuales temperatura (°C)	56
Tabla 10. Rangos y calificación Altura.....	62
Tabla 11. Rangos y calificación Altura.....	70
Tabla 12. Rangos y calificación Pendiente	74
Tabla 13. Coberturas área de estudio.....	76
Tabla 14. Rangos y calificación Coberturas	78
Tabla 15. Rangos y calificación Velocidad del Viento.....	81
Tabla 16. Rangos y calificación Humedad Relativa.....	85
Tabla 17. Rangos y calificación Nubosidad	88
Tabla 18. Rangos y calificación temperatura.....	91
Tabla 19. Rangos y calificación Amenaza.....	94
Tabla 20. Nivel de Amenaza mensual porcentual	96

1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

1.1 Descripción del área problemática

La Sub-región Sur Occidental o provincia de Pamplona está conformada por los municipios de Pamplona, Pamplonita, Mutiscua, Silos, Chitagá y Cacota. El epicentro es la ciudad de Pamplona con una economía basada en la agricultura, la ganadería, la educación y el turismo religioso y agroambiental. Su extensión es de 10.59% del territorio Departamental. Cuenta con una población de 81.969 habitantes, que corresponde al 6% de la población del Departamento de Norte de Santander.

Figura 1. Provincia de Pamplona



Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC - Diccionario Geográfico

Gobernación del Departamento de Norte de Santander

Departamento Administrativo Nacional de Estadística: www.dane.gov.co

1.2 Formulación del problema

Los fenómenos naturales en Colombia son eventos que han generado un sin número de impactos negativos en los diferentes escenarios en los que se presentan. Uno de los principales causantes de pérdidas económicas en los campesinos colombianos es el fenómeno de las heladas que afecta directamente los cultivos y genera pérdida parcial o total de los mismos. En Colombia este fenómeno se presenta de manera frecuente, principalmente en zonas con alturas sobre el nivel del mar superiores a los 2500 m.s.n.m y especialmente en las temporadas secas del año (IDEAM, 2012)

Las áreas con mayor susceptibilidad a heladas son los altiplanos fríos, como el altiplano cundiboyacense en la Cordillera Oriental, los altiplanos de Taqueras e Ipiales en Nariño y el de Paletará al suroccidente del país. Estas zonas presentan condiciones ideales para la ocurrencia del fenómeno ya que se ubican entre los 2500 y 3000 m.s.n.m, con temperaturas medias entre 9 y 12° C y baja nubosidad que permite la pérdida de radiación en las horas finales del día.

La provincia de Pamplona es una unidad de municipios conformada por: Mutiscua, Silos, Pamplona, Pamplonita, Chitagá y Cácuta; municipios con población entre los 5.000 y los 60.000 habitantes y cuya economía se basa principalmente en la producción agrícola y pecuaria. Esta población se ha visto históricamente afectada por las heladas en eventos como el ocurrido en enero del año 2020 donde se vieron afectados más 800 familias de agricultores, ocasionando pérdidas millonarias por la afectación de sus cultivos dentro de los que se encuentran hortalizas, frutales y pastos, situación por la cual el IDEAM decreto alerta roja en las zonas susceptibles del país (La

Opinión, 2020), otro evento significativo se presentó en enero del año 2022 donde según el alcalde de Chitagá, Jorge Rojas Pacheco, en el municipio se concentran más de 100 hectáreas de cultivos de papa dañados y unas 150 hectáreas entre durazno, frijol, pastos para ganado, zanahoria, repollo y fresa, entre otros productos. Mencionó que “En plata estaríamos hablando de un estimado en 1.500 millones de pesos. Eso afecta la economía del campesino y más a los que tienen préstamos con el Banco Agrario y otras entidades crediticias” (LA OPINION, 2022) a pesar de que la ocurrencia de las heladas no es una novedad para la provincia de Pamplona y se repite durante la mayoría de los años, no se ve reflejada la experiencia adquirida en la reducción de pérdidas y afectaciones a los campesinos, se siguen aplicando las mismas prácticas en el establecimiento y manejo de los cultivos y el acompañamiento institucional de la Gobernación de Norte de Santander a través de su secretaría de agricultura y desarrollo rural, la consejería de gestión de riesgos del departamento y las alcaldías municipales se ve limitado a compensar los daños económicos, además no se han generado estudios e investigaciones que zonifican las áreas susceptibles y que establezca la probabilidad de ocurrencia en las diferentes épocas del año . Teniendo en cuenta el contexto anterior surge el interrogante ¿un estudio espacio temporal permite planificación eficiente de las prácticas agrícolas ante los efectos ocasionados por las heladas en la provincia de Pamplona?

1.3 Justificación

La provincia de Pamplona es una zona principalmente campesina donde se encuentran aproximadamente 10152 unidades productivas de cultivos permanentes y transitorios como mora, fresa, durazno, curuba, tomate de árbol, uchuva, lulo, granadilla, aguacate, ciruela, brevo, flores, guayaba, gulupa, arveja, cilantro, frijol, haba, lechuga, papa negra, papa criolla, repollo, zanahoria entre otros (gobernación norte de Santander, 2022). Tradicionalmente se han cultivado estas variedades por familias campesinas del sector las cuales han implementado dichos cultivos como la principal fuente de ingresos y sustento, sin embargo, en los últimos años se ha visto cómo la población campesina va envejeciendo sin evidenciarse un recambio generacional que asegure la permanencia de la tradición rural. Este fenómeno se ha ocasionado por la poca factibilidad que ofrece el campo actualmente; las altas inversiones para producir, el elevado costo de los insumos y las pérdidas por la inclemencia del clima ha generado que el índice de pobreza de los productores aumente. La necesidad de mitigar estos impactos, ha incentivado que se realicen investigaciones en favor del desarrollo del campo, no obstante, estos estudios generalmente son de carácter académico y no son aplicados para la solución de las problemáticas reales.

El deseo de mitigar los impactos negativos generados por las condiciones climáticas, ha impulsado el uso de sistemas de alertas tempranas y de pronóstico ante escenarios climáticos extremos que generan inundaciones o sequías, esto ha permitido que se eviten tragedias y se minimicen pérdidas económicas. A pesar de que las heladas son el fenómeno natural que más ha afectado a los campesinos de la provincia, su escaso estudio y las consecuencias generadas por el cambio

climático en la zona no ha permitido un correcto entendimiento que posibilite la efectiva planificación en la agricultura ante este escenario. Identificar zonas y temporadas con alta amenaza a las heladas y generar pronósticos ante la probabilidad de ocurrencia de este fenómeno facilitará dicha planificación y fortalecerá la capacidad para la toma de decisiones de los campesinos ante esta situación.

Determinar el comportamiento espacial y temporal de las heladas en la provincia de Pamplona permitirá brindarle al productor un complemento científico a sus saberes empíricos y ancestrales a través de la determinación de las variables directamente involucradas en la generación de un evento de heladas, así como la posibilidad de predecir la ocurrencia de las mismas. Esto generará la adopción de las medidas necesarias para mitigar los impactos que se ocasionan en los cultivos facilitando la aplicación de prácticas como Siembra en períodos libres de heladas, utilización de variedades resistentes, utilización de barreras vivas o artificiales, buenas prácticas de riego, labranza mínima., reduciendo así las pérdidas económicas y generando nuevos conocimientos que empoderen la población local ante eventos extremos producidos por el clima.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar de manera espacial y temporal las heladas como instrumento para la eficiente planificación agrícola en la provincia de Pamplona.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar las variables meteorológicas y biofísicas que influyen en la ocurrencia de heladas, para la posterior obtención de información a partir de bases de datos abiertas de las entidades nacionales.
- Determinar la relación y la ponderación de cada una de las variables analizadas en la influencia de ocurrencia de una helada.
- Identificar mediante herramienta SIG las áreas de la provincia de Pamplona más susceptibles a la ocurrencia de heladas durante las diferentes épocas del año mediante una evaluación espacio temporal.
- Proponer prácticas que posibiliten la mitigación del impacto de las heladas en la agricultura a partir de los resultados de zonificación espacio temporal obtenidos

3. Antecedentes

Minimum temperature mapping augments Australian grain farmers' knowledge of frost (2021).

Cita: David L. Gobbett, Uday Nidumolu, Huidong Jin, Peter Hayman, John Gallant, Minimum temperature mapping augments Australian grain farmers' knowledge of frost, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volumes 304–305, 2021, 108422, ISSN 0168-1923, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108422>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192321001052>)

Keywords: Frost; Minimum temperature; Terrain; Multivariate adaptive regression splines (MARS)

Goberr, Nidumolu, Jin, Hayman y Gallant(2021) realizaron su investigación para generar mapas de temperatura mínima a escala finca con el objetivo de mejorar la comprensión de las heladas en los agricultores de granos y cereales de Australia . Para ello seleccionaron dos sitios con historial de ocurrencia de heladas, con un rango de elevación de 20 m y una pendiente quebrada en cada uno de estos sitios se dispuso de una estación meteorológica para la toma de datos de temperatura y velocidad del viento. Y se extrajeron datos de terreno como Elevación menos la elevación media dentro de un radio, Índice de resolución múltiple, Elevación por encima de la referencia, relación de radiación solar de onda corta de junio. Incorpora pendiente, Índice de humedad topográfica DEM nacional, finalmente se socializó el resultado con los agricultores y se observó gran concordancia de lo modelado con la experiencia y la zona ya establecida previamente por la población local.

Frost Forecast using Machine Learning from association to causality (2019)

Cita: Liya Ding, Kosuke Noborio, Kazuki Shibuya, Frost Forecast using Machine Learning - from association to causality, *Procedia Computer Science*, Volume 159, 2019, Pages 1001-1010, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.267>.

A través de una breve introducción y recopilación bibliográfica evidencian los diferentes métodos para la predicción de eventos de heladas finalmente proponen el pronóstico de este fenómeno mediante el aprendizaje automático (machine learning) con el método de vectores de soporte y regresión. Se sugiere un modelado para determinar la correlación entre factores ambientales como temperatura, humedad relativa, radiación neta y velocidad del viento y las heladas. Se determinó la temperatura como el factor clave para realizar modelos predictivos de heladas, sin embargo, la humedad relativa ayuda a la generación de alarmas tempranas en periodos de hasta 3 horas y la radiación solar mejora el tiempo de respuesta a los cambios locales en periodos cortos de tiempo.

Modelling and learning cause-effect – application in frost forecast (2020) Cita: Liya Ding, Kosuke Noborio, Kazuki Shibuya, *Modelling and learning cause-effect — application in frost forecast*, *Procedia Computer Science*, Volume 176, 2020, Pages 2264-2273, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.09.285>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050920321918>)

Continúan su investigación acerca de los modelos óptimos para la predicción de eventos de heladas a partir del análisis de variables ambientales como la temperatura, la humedad, la radiación y la velocidad del viento. Se observó que cualquier modelo predictivo para el pronóstico de heladas no funcionaría bien sin involucrar la temperatura del aire; un modelo con la temperatura del aire sola parece ser menos sensible a los cambios locales en la línea de tiempo.; por otro lado menciona que

la utilización de la predicción de cada uno de los factores por separado y luego usar dichos valores para el pronóstico de las heladas es un enfoque ampliamente aceptado y de estudio.

Finalmente discutió cinco grupos de métodos de modelado como casos especiales del modelo generalmente realizado una comparación de rendimiento entre los grupos de métodos. A través de sus experimentos, concluyo: que con el desequilibrio de datos, un modelo de regresión para el ajuste de curvas tiende a dar valores de respuesta más bajos, lo que hace que la predicción sea menos sensible al movimiento local y al establecimiento de umbrales más difícil; Si se considera la relación causa-efecto en la aplicación de heladas como un proceso continuo con posible retraso, la participación explícita del retraso de tiempo en el modelado puede ser desventajosa; Con el esquema de etiquetado actual, es más apropiado tratar los valores de escarcha como categórico y tarea de aprendizaje como de clasificación; en este caso, se puede introducir un etiquetado apropiado para el objetivo derivado para ayudar a lograr una alarma temprana. Statistical characterization of frost zones: Case of tea freeze damage in the Kenyan highlands (2021) Cita: Susan M. Kotikot, Africa Flores, Robert E. Griffin, James Nyaga, Jonathan L. Case, Robinson Mugo, Absae Sedah, Emily Adams, Ashutosh Limaye, Daniel E. Irwin, Statistical characterization of frost zones: Case of tea freeze damage in the Kenyan highlands, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Volume 84, 2020, 101971, ISSN 0303-2434, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101971>.(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243418309899>)

Los autores evaluaron un modelo para estimación de la probabilidad de ocurrencia de heladas en Kenia para ello seleccionaron dos sitios de estudio ubicados en los condados de Kericho y Nandi estos tienen características propicias a heladas ya que se ubican entre los 1500 y 2400 m.s.n.m y

su topografía es ondulada. Para su análisis se recolectó información de campo basada en la experiencia de la población local identificando zonas donde históricamente han ocurrido heladas y áreas en las que no han ocurrido, lo cual se compararía con los resultados obtenidos por el modelo. Se utilizó datos DEM del SRTM de la NASA, el producto de LST de MODIS del satélite aqua y datos de NASA-LIS. Estos datos se estudiaron con el objetivo de delinear las zonas dentro de las plantaciones de té en Kenia considerando factores de riesgo relevantes inicialmente se seleccionaron las variables Convexidad de la temperatura de la superficie terrestre, Longitud de la ruta de flujo, Elevación, Aspecto, Humedad relativa del suelo, Humedad específica, Velocidad del viento, Distancia a la fuente de agua las cuales mediante una regresión logística se determinó que la temperatura de la superficie, la humedad específica, la humedad relativa del suelo, el aspecto, la convexidad, la elevación, la distancia a un cuerpo de agua y la longitud del flujo ascendente tienen una asociación significativa con la ocurrencia de heladas mientras que la velocidad y la dirección del viento no están asociadas al fenómeno. Finalmente se concluyó que el modelo logístico utilizado muestra una mejora significativa en la precisión de la delimitación de las zonas de heladas, además de indicar zonas de alta susceptibilidad a las heladas mediante la determinación de umbrales basada en la probabilidad. Zonificación de peligro por temperaturas mínimas extremas mediante geoprocésamiento en la Cuenca Illpa en la región Puno (2020) Cita: Sullca (2020) Sullca realizó la zonificación del riesgo por temperaturas bajas extremas o heladas para la cuenca de illpa en puno Perú a través de su revisión bibliográfica selecciono las variables ambientales Temperatura Mínima, Zona de vida, Pendiente DEM y Humedad Relativa y con la herramienta SIG Arc Gis obtuvo la zonas de peligro de temperaturas mínimas extremas, en el territorio de

la cuenca Illpa la cual presentó los porcentajes 0.42, 0.92, 52.26 y 46.39, de muy alto, alto, medio y bajo, respectivamente. Forecasting frost risk in forest plantations by the combination of spatial data and machine learning algorithms (2021) Cita: Écio Souza Diniz, Alexandre Simões Lorenzon, Nero Lemos Martins de Castro, Gustavo Eduardo Marcatti, Osmarino Pires dos Santos, José Carlos de Deus Júnior, Rosane Barbosa Lopes Cavalcante, Elpídio Inácio Fernandes-Filho, Cibele Hummeldo Amaral, Forecasting frost risk in forest plantations by the combination of spatial data and machine learning algorithms, Agricultural and Forest Meteorology, Volume 306, 2021,108450, ISSN 0168-1923, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108450>.(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192321001337>)

En su estudio se utilizaron algoritmos de aprendizaje automático para crear clasificaciones de zonificación que pronostican el riesgo de heladas para las plantaciones forestales ubicadas en la región centro-sur del estado de Rio Grande do Sul, Brasil. Para ello, se recolectó y analizó una serie de datos locales dentro de los cuales se encontraba: líneas de contorno de alta resolución espacial, hidrografía y límites de rodales forestales que comprende 30 unidades de manejo con datos históricos consistentes de ocurrencia de heladas. Posteriormente se generaron posibles predictores a escala local de la ocurrencia de heladas, que incluían longitud, latitud, elevación, altitud relativa, orientación del relieve y distancia euclidiana de la hidrografía. Se realizaron pruebas de tres clasificadores de aprendizaje automático (Random Forest - RF; Support Vector Machine-SVM y Multi-layer Perceptron-MLP) para determinar cuál predeciría con mayor precisión la ocurrencia de heladas. Se determinó que RF proporcionaba la mayor precisión (> 90%), así como los porcentajes más pequeños de errores.

Evaluation of the Weather Research and Forecasting model for two frost events (2008)

Cita: Thara Prabha, Gerrit Hoogenboom, Evaluation of the Weather Research and Forecasting model for two frost events, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 64, Issue 2, 2008,

Pages 234-247, ISSN 0168-1699,

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.05.019>.(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169908001518>)

Se analizaron dos eventos heladas ocurridos en s del 3 al 9 de diciembre de 2006 y del 3 al 11 de abril de 2007. Para este estudio se seleccionaron 8 estaciones meteorológicas de AEMN para las cuales se hizo una evaluación de la climatología que incide en las heladas para el periodo de 1993-2006 y así obtener una descripción general de la climatología de la zona. Se empleó el modelo ARW de heladas para estos dos eventos a una resolución espacial de 1 Km dentro del que se evaluó la temperatura del aire, la humedad relativa, la temperatura del punto de rocío, temperatura del bulbo húmedo, velocidad del viento y se compararon con las observaciones de las estaciones meteorológicas finalmente se obtuvieron predicciones de la temperatura mínima con una precisión del 90% para el evento de abril y del 80 % para el evento de diciembre.

A landscape assessment of frost damage in the northmost Neotropical dry forest (2021) Cita:

Adrián Bojórquez, Angelina Martínez-Yrizar, Juan C. Álvarez-Yépez, A landscape assessment of frost damage in the northmost Neotropical dry forest, *Agricultural and Forest Meteorology*,

Volumes 308–309, 2021, 108562, ISSN 0168-1923,

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108562>.(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016819232100246X>) En su estudio se evaluaron los daños ocasionados por un evento de

heladas en el bosque seco neotropical a través de la evaluación de cambios en la vegetación; para esto se recopiló información de satélites landsat 5 con una nubosidad inferior al 10% y a partir de estas imágenes se obtuvieron índices de vegetación de diferencia normalizada NDVI lo que permite identificar las zonas con daños y cuantificar el área afectada. La relación entre las anomalías del NDVI y la densidad de árboles muertos por heladas confirma el alto grado de daño por heladas en la vegetación de las tierras bajas y destaca el papel clave de la topografía y, en particular, la elevación durante las heladas advectivas. Estos resultados demuestran la utilidad de la teledetección y la confiabilidad de los índices espectrales para una evaluación rápida del cambio de vegetación inducido por el clima.

Normalized NDVI valley area index (NNVAI)-based framework for quantitative and timely monitoring of winter wheat frost damage on the Huang-Huai-Hai Plain, China.(2020)

Cita: Longcai Zhao, Qiangzi Li, Yuan Zhang, Hongyan Wang, Xin Du, Normalized NDVI valley area index (NNVAI)-based framework for quantitative and timely monitoring of winter wheat frost damage on the Huang-Huai-Hai Plain, China, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 292, 2020, 106793, ISSN 0167-8809, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106793>.(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880919304104>)

Se presento un monitoreo de las heladas para proporcionar una evaluación oportuna y precisa de los daños ocasionados en cultivos de trigo en las llanuras de Huang-Huai-Hai, China . Para ello se empleó el índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI el cual describe cuantitativamente los daños sufridos. Este estudio encontró que el daño al trigo de invierno en diferentes etapas de crecimiento es sensible a las diferentes características de las heladas, y que los modelos de

predicción eran capaces de capturar tales características, lo que significaba que podían evitar una evaluación errónea de la gravedad del daño por heladas.

Application of artificial neural networks to frost detection in central Chile using the next day minimum air temperature forecast (2018).

Cita: Fuentes (2018), doi:10.4067/S0718-58392018000300327

Su estudio presenta una metodología basada en las redes neuronales artificiales para facilitar el pronóstico de eventos de heladas. Esta metodología consiste en la predicción de la temperatura mínima del día siguiente a partir de la red neuronal analizando las variables Temperatura, ° C, humedad relativa, % Radiación, Velocidad del viento, Dirección del viento, Precipitación y Punto de rocío, los cuales se recolectaron a partir de series de tiempo de aproximadamente 8 años (2010-2017) de 10 estaciones meteorológicas automáticas ubicadas en los valles interiores de las Regiones del Maule y Biobío. Los resultados de la prueba ANN mostraron un ajuste muy bueno en la temperatura mínima estimada (predicha) y conocida (real) para todas las estaciones; en general, se observó un valor de MSE de 2.99 °C para el mejor desempeño, específicamente MSE de 1.71 °C para entrenamiento, 1.77 °C para validación y 1.74 °C para procesos de prueba.

Mapping Statistical Characteristics of Frosts in Iran (2014)

Cita: Mahmoudi, Peyman. (2014). Mapping Statistical Characteristics of Frosts in Iran. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XL-2/W3. 175-180. 10.5194/isprsarchives-XL-2-W3-175-2014.

Realizo un análisis espacio-temporal de las características de las heladas en Irán, se utilizaron datos de 69 estaciones de la organización meteorológica de Irán durante un periodo de 15 años

(1990-2005) de octubre a mayo. Esto se hizo analizando cinco características estadísticas: el día juliano medio de la primera helada, el día juliano medio de la última helada, el número medio de días helados, la duración media del período de heladas y la duración media de la temporada con las cuales se generaron los mapas a través del método de interpolación de kriging. Este estudio no tuvo en cuenta variables ambientales como la vegetación, la situación del terreno, la dirección de la pendiente. Debido a esto sugiere la incorporación de las mismas en futuros estudios y el análisis a partir de diferentes métodos de interpolación.

Frost risk mapping derived from satellite and surface data over the Bolivian Altiplano (C. François, 1999) C. François, R. Bosseno, J.J. Vacher, B. Seguin, Frost risk mapping derived from satellite and surface data over the Bolivian Altiplano, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 95, Issue 2, 1999, Pages 113-137, ISSN 0168-1923, [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00002-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00002-7). (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192399000027>)

Se realizó, un análisis para determinar el riesgo por heladas en los altiplanos Bolivianos utilizando datos de estaciones meteorológicas y datos tomados por el satélite NOAA, se evaluaron registros históricos de temperaturas mínimas, obteniendo una zonificación de riesgo de heladas para el altiplano boliviano esto utilizando diferentes funciones espaciales para establecer el vínculo entre las temperaturas de la superficie del satélite a las 2 am y las temperaturas mínimas de la estación aérea a las 6 am. Se derivan así cinco tipos de mapas un mapa de temperaturas mínimas extremas, un mapa de temperaturas mínimas medias y tres mapas de porcentajes de riesgo para las variedades de cultivos estudiados. Se concluyó que las temperaturas mínimas parecen estar relacionadas con las laderas y las colinas donde las temperaturas son más cálidas que en el campo abierto. The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate (Giovanni Sgubin, 2018)

Giovanni Sgubin, Didier Swingedouw, Gildas Dayon, Iñaki García de Cortázar-Atauri, Nathalie Ollat, Christian Pagé, Cornelis van Leeuwen, The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volumes 250–251, 2018, Pages 226-242, ISSN 0168-1923, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.253>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192317306731>)

Analizo el riesgo por heladas tardías específicamente para el cultivo de vid en Francia en el siglo XXI para ello comparo las ocurrencias estadísticas de las heladas como día del año y los datos de fecha de brotación de cada cultivo las cuales se simularon en tres modelos fenológicos distintos. Y así evaluar la posibilidad del daño de cada cultivo a partir de la identificación de las temporadas propensas a heladas.

Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades
(Yann Vitasse, 2018)

Yann Vitasse, Léonard Schneider, Christian Rixen, Danilo Christen, Martine Rebetez, Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 248, 2018 Pages 60-69, ISSN 0168-1923, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.005>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192317303003>)

En su estudio analizo datos de temperatura en 50 locaciones diferentes en suiza y se cruzaron con modelos fenológicos calibrados a largo plazo para la simulación de la floración y el crecimiento de hojas de dos árboles frutales el manzano y el cerezo con el objetivo de determinar si el riesgo a heladas ha aumentado durante los últimos años. Se determinó que, a pesar del aumento sustancial de la temperatura durante el período de estudio, el riesgo de daños por heladas no se redujo porque la fenología primaveral ha avanzado a un ritmo más rápido que la fecha de la última helada primaveral. En contraste, encontramos que el riesgo de exposición a las heladas y el daño potencial subsecuente ha aumentado para las especies en la gran mayoría de las estaciones ubicadas en elevaciones superiores a 800 m, mientras que permanece sin cambios en elevaciones más bajas.

4. Referente normativo y legal

NORMA	ENTIDAD QUE LO EXPIDE	CONTENIDO
Artículos 58, 79, 80, 95, 268, 313, 317, 334 y 339	Constitución Política de la República de Colombia	Por los cuales se reglamenta la protección de los recursos naturales como los derechos adquiridos para el bien público y social, previniendo y controlando el deterioro ambiental garantizando un desarrollo sostenible, su conservación y restauración
Ley 388 del 18 de julio de 1997	Congreso de la República de Colombia.	Por la cual establece cuales deben ser las normas para tener en cuenta en el POT, con el fin de contribuir a la preservación, protección y conservación de los recursos naturales, previniendo los efectos de riesgo y a
Ley 1523 de 2012	Congreso de la república de Colombia	Por la cual se adopta la política nacional de gestión de riesgo y desastre y se establece el Sistema Nacional de Gestión Del Riesgo de Desastre y se dictan otras disposiciones.
ley 99 de 1993 Artículos 109 y 110	Congreso de la República	Por la cual se crea el Ministerio de Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y la conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables.
Decreto 2811 del 18 de diciembre de 1974	Presidencia de la República	Decreta el uso adecuado de los recursos naturales

		renovables teniendo en cuenta los aspectos del uso de agua, suelo, flora y fauna, y a su vez reglamenta como debe ser el manejo y el ordenamiento de las cuencas.
Decreto 3600 de 2007.	Presidencia de la República	Decreta el ordenamiento del suelo del área rural, las actualizaciones urbanísticas de parcelas, el desarrollo de edificaciones y los suelos de la zona para la adaptación de disposiciones.

5. Referente teórico

La principal amenaza en la producción agrícola son los fenómenos naturales, las altas precipitaciones, las temporadas de sequías y las heladas son causantes de pérdidas millonarias para los agricultores alrededor del mundo, siendo este último el de mayor impacto. Según (Kalma y col., 1992; Snyder y de Melo-Abreu, 2005) citado por (Bojorquez, 2021). Las heladas son un fenómeno meteorológico que ocurre cuando la temperatura del aire de la superficie terrestre cae por debajo de los 0°C . esta reducción de la temperatura puede ocasionarse debido a la radiación continua de energía de la superficie a la atmósfera durante condiciones de vientos tranquilos, cielos con poca nubosidad y una inversión de temperatura que causa un tipo de escarcha radiactiva, o por advección de aire frío en una región durante condiciones de vientos moderados a fuertes, cielos nublados y sin inversión que cause heladas de tipo advectivo, y (3) ocurrencia intermitente de ambas condiciones ((Snyder y de Melo-Abreu, 2005) citados por (Kotikot, 2021).

Múltiples estudios se han enfocado en el análisis de las variables que influyen en la ocurrencia de una helada, siendo la temperatura el factor clave para describir el comportamiento del evento (Ding, Frost Forecast using Machine Learning from association to causality, 2019), otros estudios han incorporado otras variables como el realizado por (Kotikot, 2021) quien describe que la temperatura de la superficie, la humedad específica, la humedad relativa del suelo, el aspecto, la convexidad, la elevación, la distancia a un cuerpo de agua y la longitud del flujo ascendente tienen una asociación significativa con la ocurrencia de heladas mientras que la velocidad del viento y la dirección no están tan relacionadas al fenómeno. La comprensión de la ocurrencia de las heladas a través de estudios donde se involucren las variables meteorológicas y de terrenos que hacen que un área sea propensa a este fenómeno es de vital importancia, el análisis espacio- temporal permite determinar el comportamiento de un fenómeno natural y su distribución dimensional. A partir de estos estudios y de la constante generación de nuevos conocimientos se ha profundizado en metodologías que permitan generar alertas tempranas ante la aparición de una helada, (Ding, Frost Forecast using Machine Learning □ from association to causality,

2019) y (Ding 2020) propone modelos de aprendizaje automático a través de la correlación y el análisis causa-efecto entre los factores ambientales y las heladas, por otra parte (Fuentes, 2018) propone el modelo de redes neuronales artificiales (ANN). Las ANN son el grupo de unidades de procesamiento simple que se comunican entre sí a través del envío de señales analógicas y es una de las tecnológicas más utilizadas recientemente para la predicción de fenómenos climatológicos (González-Camacho et al., 2008). Jacob y Murugan (2016) citados por (Fuentes, 2018). Como se puede evidenciar las heladas han sido protagonistas de amplios estudios en todo el mundo y la aplicación de estos a escala regional fortalecerá el entendimiento del fenómeno y favorecerá investigaciones futuras que permitan la mitigación de los impactos negativos causados.

Comprender los conceptos que se ven involucrados en este fenómeno y describir los modelos y métodos utilizados para el estudio del mismo es fundamental para su completo entrenamiento y análisis

5.1 HELADAS

Las heladas son un fenómeno meteorológico que ocurre cuando la temperatura del aire de la superficie terrestre cae por debajo de los 0 ° C. esta reducción de la temperatura puede ocasionarse debido a la radiación continua de energía de la superficie a la atmósfera durante condiciones de vientos tranquilos, cielos con poca nubosidad y una inversión de temperatura que causa un tipo de escarcha radiactiva, o por advección de aire frío en una región durante condiciones de vientos moderados a fuertes, cielos nublados y sin inversión que cause heladas de tipo advectivo, y (3) ocurrencia intermitente de ambas condiciones ((Snyder y de Melo-Abreu, 2005). Según la (FAO,2010) citados por (CAR, 2020) La palabra “helada” hace referencia a la formación de cristales de hielo sobre las superficies, tanto por congelación del rocío como por un cambio de fase de vapor de agua a hielo. Sin embargo, también es

utilizada para describir un evento meteorológico cuando los cultivos y otras plantas experimentan daño por congelación. Según el sistema nacional de información para la gestión del riesgo es uno de los fenómenos más adversos a que están expuestos los cultivos de tierra y consisten en el descenso por debajo de los cero grados (hacia los valores negativos) de la temperatura ambiente en la capa más baja del aire (1 - 2 metros), en la cual se encuentra la mayoría absoluta del follaje de los cultivos tradicionales. (UNGDR, 2022); Para el (IDEAM, 2012) una helada es la temperatura a la cual los tejidos de la planta comienzan a sufrir daño. En esta definición entran en juego aspectos fisiológicos, como la resistencia o susceptibilidad del cultivo a bajas temperaturas en sus diferentes estados de desarrollo, altura de la planta sobre el nivel del suelo y la temperatura de la hoja.

Se conocen diferentes tipos de heladas según sus causas, según (Artunduaga, 1982) son:

Helada por advección. Se presenta cuando una región es invadida por una masa de aire con temperaturas por debajo de los 0°C. la vegetación se enfría por contacto y pueden sufrir daños graves según su estado físico o especie.

Helada por evaporación. Esta ocurre cuando después de una precipitación la humedad relativa del aire desciende y el agua de la vegetación se evapora rápidamente, el calor de evaporación que el agua necesita para pasar del estado líquido al gaseoso lo toma de las plantas y en consecuencia la temperatura de algunos órganos vegetales desciende a límites que ocasionan daños.

Helada por radiación. Es el tipo de helada más común en Colombia, sucede cuando una masa de aire frío y seco se estanca sobre una región durante las horas de la noche, en el día se presenta fuerte radiación con temperaturas de hasta 15°C, mientras que por la noche el cielo con muy poca nubosidad y escasa humedad relativa del aire permite que se pierda rápidamente el calor por radiación. La temperatura comienza a descender y puede llegar al punto de congelación antes de la salida del sol.

Análisis de heladas: Múltiples estudios se han enfocado en el análisis de las variables que influyen en la ocurrencia de una helada, siendo la temperatura el factor clave para describir el comportamiento del

evento (Ding, Frost Forecast using Machine Learning □ from association to causality, 2019), otros estudios han incorporado otras variables como el realizado por (Kotikot, 2021) quien describe que la temperatura de la superficie, la humedad específica, la humedad relativa del suelo, el aspecto, la convexidad, la elevación, la distancia a un cuerpo de agua y la longitud del flujo ascendente tienen una asociación significativa con la ocurrencia de heladas mientras que la velocidad del viento y la dirección no están tan relacionadas al fenómeno. La comprensión de la ocurrencia de las heladas a través de estudios donde se involucren las variables meteorológicas y de terrenos que hacen que un área sea propensa a este fenómeno es de vital importancia, el análisis espacio-temporal permite determinar el comportamiento de un fenómeno natural y su distribución dimensional. A partir de estos estudios y de la constante generación de nuevos conocimientos se ha profundizado en metodologías que permitan generar alertas tempranas ante la aparición de una helada, (Ding, Frost Forecast using Machine Learning □ from association to causality, 2019) y (Ding 2020) propone modelos de aprendizaje automático a través de la correlación y el análisis causa-efecto entre los factores ambientales y las heladas, por otra parte (Fuentes, 2018) propone el modelo de redes neuronales artificiales (ANN). Las ANN son el grupo de unidades de procesamiento simple que se comunican entre sí a través del envío de señales analógicas y es una de las tecnológicas más utilizadas recientemente para la predicción de fenómenos climatológicos (González-Camacho et al., 2008). Jacob y Murugan (2016) citados por (Fuentes, 2018). Como se puede evidenciar las heladas han sido protagonistas de amplios estudios en todo el mundo y la aplicación de estos a escala regional fortalecerá el entendimiento del fenómeno y favorecerá investigaciones futuras que permitan la mitigación de los impactos negativos causados.

Efectos del clima en la agricultura: Colombia es un país con gran variedad de pisos térmicos que favorecen la variedad en la producción agrícola y pecuaria sin embargo el poco avance tecnológico e investigativo ocasionado que la agricultura en Colombia se vea considerablemente afectada por la variabilidad climática. Según (Monetealegre, 2000) citado por (Rojas, 2011) cuando los eventos ENSO

cubren periodos de dos años consecutivos (más usual en eventos La Niña), el impacto negativo en los cultivos es fuerte, debido a que el periodo de finalización del evento (fase madura) coincide con la primera temporada seca, alterando los promedios normales de lluvia principalmente

5.2 ANALISIS Y GESTION DEL RIESGO

Se reconoce el riesgo como un proceso construido en el tiempo por la sociedad y en consecuencia se define la Gestión del Riesgo de Desastres -GRD- como un proceso social. Se reconoce además que los desastres no son naturales, y que por el contrario existen factores políticos, sociales y culturales que inciden en el grado de vulnerabilidad de los individuos al momento de enfrentar y recuperarse de la ocurrencia de un evento físico. Debido a estos factores los efectos de un evento físico son diferenciados en una misma comunidad, es decir, los efectos pueden tener niveles de impacto diferente, incluso en una misma comunidad. En consecuencia, no siendo los desastres una mera causa de la naturaleza, se reconoce que el riesgo y por tanto los desastres son una construcción social que está determinada por la relación entre los ecosistemas naturales y la cultura de la sociedad. (UNGRD, 2017), La gestión del riesgo está definida por la evaluación y el análisis de los niveles de amenaza y de vulnerabilidad que se tienen ante un evento determinado.

Amenaza se define como la probabilidad de ocurrencia en un lugar determinado y periodo de tiempo determinado de un evento dañino para el hombre, ya sea de origen natural o antrópico. (Alcántara Carrió, 2008), en la (Ley 1523 de 2012). La amenaza se define como el peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así

como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.

Vulnerabilidad (Kumpulainen 2006) citado (Rojas Vilches & Martínez Reyes, 2011) define vulnerabilidad como una parte esencial de los peligros y como la susceptibilidad de las personas, comunidades o regiones antes diversos peligros naturales o tecnológicos, identificando tres dimensiones: económica, social y ecológica. La (Ley 1523 de 2012). La define como la susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos

5.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Un SIG es un sistema de información compuesto por hardware, software y procedimientos para capturar, manejar, manipular, analizar, modelizar y representar datos georreferenciados, con el objetivo de resolver problemas de gestión y planificación. (NCGIA). Los sistemas de información geográfica son herramientas que permiten trabajar con información espacial, integrar y superponer diferentes tipos de capas de información y son de gran utilidad en la gestión del riesgo de desastres desde aspectos de estudios de la peligrosidad, como zonificación de precipitaciones y demás variables ambientales. Otros autores como Roger Tomlinson (1987) los definen como Sistema digital para el análisis y manipulación de todo tipo de datos geográficos, a fin de aportar información útil para las decisiones territoriales.

Según el modo en que está representada la información de manera digital en un sistema de información geográfico se pueden clasificar en dos grandes grupos de capas:

Formato Raster. un ráster consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información, como la temperatura. Los ráster son fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales o incluso mapas escaneados. (ESRI, 2022)

Formato vector: según (Mancebo Quintana, Ortega Perez, Valentin Cirado, Martin Ramos, & Martin Fernández, 2008) este formato consta de puntos líneas y polígonos que modelan el aspecto del medio, estos constan de información gráfica, geográfica, localización e información alfanumérica o atributos.

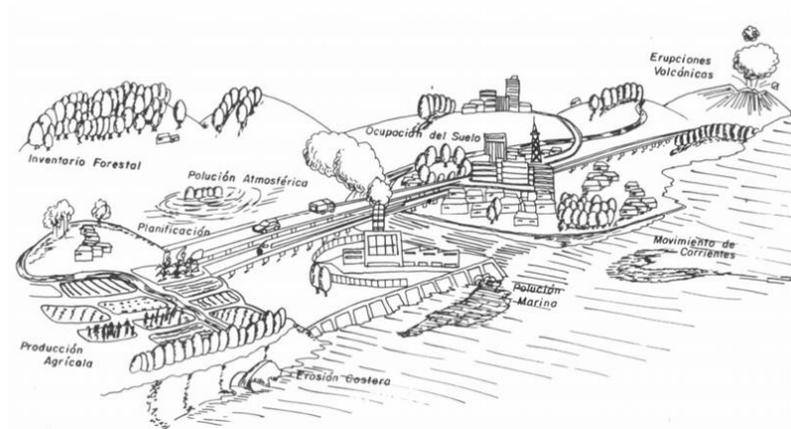
- Los puntos se reducen a coordenadas X, Y o longitud-latitud que marcan la posición del objeto sobre la superficie
- Las líneas son una serie ordenada de vértices, permiten modelar ríos, carreteras curvas de nivel, etc.
- Los polígonos son líneas cerradas que representan superficies, permiten modelar lagos, lagunas, vegetación, municipios, países etc.

5.4 SENSORES REMOTOS

El sensoramiento remoto es la ciencia de obtener información de un objeto, área o fenómeno, a través del análisis de datos adquiridos mediante un dispositivo, el cual no está en contacto directo con el objeto, área o fenómeno que se está investigando. (Lillesand & Kiefer, 1994). Para la obtención de los datos se involucran instrumentos llamados sensores los cuales se pueden categorizar en activos o pasivos según la fuente de energía que requieren, sensores activos generan su propia energía, mientras que los pasivos dependen de energía ambiental de una fuente externa, que en la tierra proviene

principalmente del sol. Dentro de las aplicaciones principales del sensoramiento remoto se encuentra la agricultura, la geología, la hidrográfica, detección de problemáticas ambientales y gestión del riesgo.

. Figura 2. Aplicaciones de los Sistemas de información geográfica



5.5 ESTADÍSTICA ESPACIAL

La estadística espacial es la dependencia o autocorrelación espacial que analiza la falta de independencia que se produce entre las observaciones de una variable para sus diferentes localizaciones, (Martori & Hoberg, 2007), esta ciencia se basa en la primera ley de la geográfica descrita por Tobler en 1979 donde se afirma que todo está relacionado con todo, pero las cosas cercanas están más relacionadas entre sí que las cosas lejanas. Según (Giraldo, 2002) es la reunión de un conjunto de metodologías apropiadas para el análisis de datos que corresponden a la medición de variables aleatorias en diversos sitios de una región, es decir la estadística espacial trata con el análisis de las realizaciones de un proceso estocástico $\{ Z(s) : s \in D \}$, en el que $s \in \mathbb{R}^d$ representa una ubicación en el espacio euclidiano d -dimensional, $Z(s)$ es una variable aleatoria en la ubicación s y s varía sobre un conjunto de índices $D \subset \mathbb{R}^d$.

Geoestadística. (Journel & Huijbregts, 1978) y (Myers, 1987) citados por (Giraldo, 2002) definen la geoestadística como la rama de la estadística que estudia fenómenos espaciales y cuyo interés principal es la estimación, predicción y simulación de dichos fenómenos. Para esta herramienta es fundamental la característica de continuidad espacial.

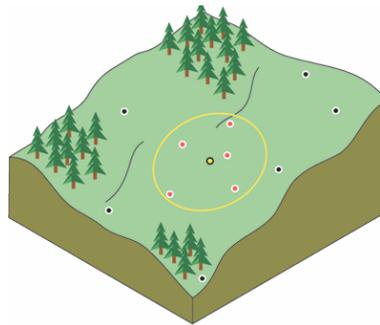
5.6 Metodo de kriging

El nombre de este método proviene del geólogo D.G krigé quien realizo trabajos en la predicción de reservas de oro en la década de los 50, sus investigaciones son consideradas pioneras en interpolación espacial. Dentro del kriging se encuentra un conjunto de métodos de predicción espacial que se fundamenta en la minimización del error cuadrático medio de predicción. (Giraldo, 2002)

Figura 3. Tipos de Kriging

TIPO DE PREDICTOR	NOMBRE	PROPIEDADES
LINEAL	<ul style="list-style-type: none"> • Simple • Ordinario • Universal 	<ul style="list-style-type: none"> • Son óptimos si hay normalidad multivariada. • Independiente de la distribución son los mejores predictores linealmente insesgados.
NO LINEAL	<ul style="list-style-type: none"> • Indicador • Probabilístico • Log Normal, Trans-Gaussiano • Disyuntivo 	<ul style="list-style-type: none"> • Son predictores óptimos.

Figura 4. Principios de la interpolacion



5.7 Metodo IDW inverso ponderado de la distancia

El interpolador IDW, consiste en una combinación de tipo lineal de los datos promediados con un peso que es función del inverso de la distancia. Cuanto más cercano esté el punto de muestreo disponible al punto a interpolar, mayor influencia recibirá dicho dato en su cálculo. Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra.

6. Metodología

Este proyecto correspondió a una investigación de tipo cuantitativa, se buscó generar la zonificación de amenaza ante el fenómeno natural conocido como helada, para este fin se procedió a ejecutar la estructura metodológica descrita a continuación.

Figura 5. Pasos propuestos

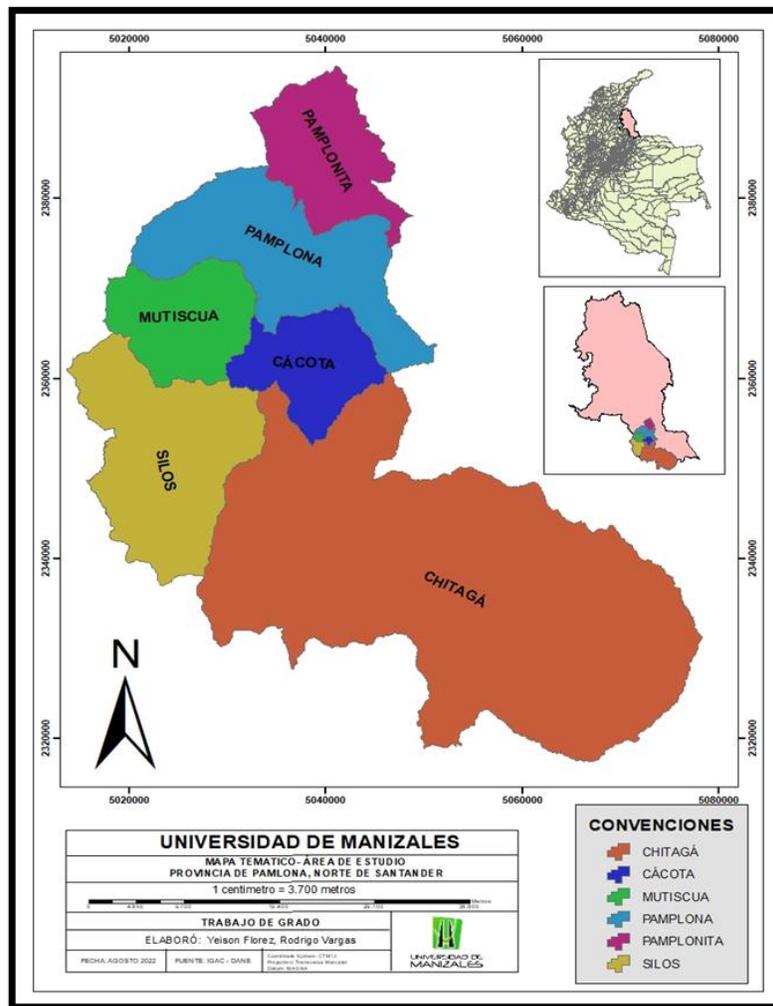


6.1 PROCEDIMIENTO

A continuación, se evaluarán y describirán cada una de las fases que hacen parte del desarrollo regular de la zonificación de amenaza de heladas.

Fase inicial: delimitar el área de interés mediante cartografía básica de los municipios que hacen parte de la provincia y así mismo identificar las estaciones meteorológicas que hacen parte del área de influencia de la investigación.

Figura 6. Área de estudio



A partir de datos abiertos ESRI en el enlace <https://datosabiertos.esri.co> y de la cartografía del IGAC <https://www.colombiaenmapas.gov.co> se definió la zona de estudio y se obtuvo la cartografía básica de la provincia de Pamplona y los municipios que la conforman.

Fase 1: Determinar y evaluar las variables meteorológicas y biofísicas que influyen en la ocurrencia de heladas, para la posterior obtención de información a partir de bases de datos abiertas de las entidades nacionales.

- **Actividad 1:** Indagar a partir de publicaciones, libros y otros documentos las variables biofísicas y climatológicas involucradas en la ocurrencia de heladas.

A partir de la revisión bibliográfica, la revisión sistémica de artículos, el análisis de diversos autores y demás metodologías de investigación se determinaron las variables meteorológicas con las cuales se realizará en el presente estudio.

- **Actividad 2:** Obtener información de las variables seleccionadas para un periodo de tiempo de 10 años aproximadamente en los portales de datos abiertos de las entidades nacionales.

Estaciones por variable

A partir de la selección de las variables a estudiar, se hizo la respectiva solicitud de información al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM quienes a través de su plataforma dhime y de información adicional suministrada mediante correo electrónico permitieron el análisis de las siguientes estaciones para cada una de las variables.

Tabla 1. Estaciones utilizadas para el análisis de la humedad relativa

Municipio	Nombre estación	Fecha inicio	Fecha fin
Tona	BERLIN [37015020]	1/4/2010	31/12/2020
Pamplonita	FCA.LA PALMITA [16015140]	14/4/2010	31/12/2020
Pamplona	ISER PAMPLONA [16015020]	6/1/2010	31/12/2020
Cúcuta	CINERA-VILLA OLGA [16025040]	1/1/2010	31/12/2020
Cucuta	CARMEN DE TONCHALA [16025010]	1/1/2010	31/12/2020
Silos	SILOS [37015010]	1/01/2010	23/05/2012
Cerrito	VOLCAN EL [24035400]	3/01/2010	31/12/2020
TOLEDO	TUNEBIA [37035010]	1/01/2010	31/12/2020
SURATA	VIVERO SURATA - AUT [23195090]	30/07/2010	31/12/2020
SURATA	CACHIRI - AUT [23195200]	03/1/2010	20/12/2020

Tabla 2. Estaciones utilizadas para el análisis de la nubosidad

Municipio	Nombre estación	Fecha inicio	Fecha fin
ABREGO	ABREGO CENTRO ADMO [16055040]	01-01-2010	31-12-2020
TOLEDO	TUNEBIA [37035010]	01-01-2010	31-12-2020
CUCUTA	CARMEN DE TONCHALA [16025010]	01-01-2010	31-12-2020
CUCUTA	CINERA-VILLA OLGA [16025040]	01-01-2010	31-12-2020

PAMPLONA	ISER PAMPLONA [16015020]	01-01-2010	31-12-2020
PAMPLONITA	FCA.LA PALMITA [16015140]	14/04/2010 7:00	31/12/2020
SILOS	SILOS [37015010]	01/01/2010	30/12/2011
CERRITO	VOLCAN EL [24035400]	01-01-2010	31-12-2020
LEBRIJA	AEROPUERTO PALONEGRO [23195502]	1/06/2010 7:00	30/06/2019 7:00
RANGONVALI A	ESPERANZA LA [16015030]	01/01/2010	31/12/2020
RANGONVALI A	RAGONVALIA [16015100]	01/01/2010	31/12/2020
SURATA	CACHIRI - AUT [23195200]	01/01/2010	20/12/2020 19:00
SURATA	VIVERO SURATA - AUT [23195090]	1/08/2010 7:00	31/12/2020
TONA	BERLIN [37015020]	01/01/2010	31/12/2020

Tabla 3. Estaciones utilizadas para el análisis de la temperatura mínima

Municipio	Nombre estación	Fecha inicio	Fecha fin
Tona	BERLIN [37015020]	1/1/2010	31/12/2020
Pamplonita	FCA.LA PALMITA [16015140]	14/4/2010	31/12/2020
Pamplona	ISER PAMPLONA [16015020]	1/1/2010	31/12/2020
Cucuta	CINERA-VILLA OLGA [16025040]	1/1/2010	31/12/2020
Cucuta	CARMEN DE TONCHALA [16025010]	1/1/2010	31/12/2020
LEBRIJA	AEROPUERTO PALONEGRO [23195502]	1/1/2010	26/03/2019
Silos	SILOS [37015010]	1/01/2002	24/05/2012
Cerrito	VOLCAN EL [24035400]	1/01/2010	31/12/2020
TUNEIBA	TUNEIBA [37035010]	1/01/2010	31/12/2020

Tabla 4. Estaciones utilizadas para el análisis de la velocidad del viento

Municipio	Nombre estación	Fecha inicio	Fecha fin
CUCUTA	UNIVERSIDAD FRANCISO DE PAULA SANTANDER - AUT16015110	01-01-2006	31-12-2019
PAMPLONA	UNIVERSIDAD DE PAMPLONA - AUT16015120	01-01-2013	31-12-2021
CUCUTA	APTO CAMILO DAZA16015501	01-01-2016	31-12-2020
CUCUTA	CINERA-VILLA OLGA16025040	01-01-2020	31-12-2021
CUCUTILLA	CUCUTILLA - AUT16025501	01-01-2019	31-12-2021
TONA	TONA - AUT23190130	01-01-2020	31/12/2021

SURATA	VIVERO SURATA - AUT23195090	01/01/2018	31/12/2021
TONA	BERLIN - AUT37015030	01-01-2017	31-12-2021
SILOS	EL PORTILLO - AUT3701500117	01-01-2020	31-12-2021
TOLEDO	CAMPO HERMOSO - AUT3702500113	01/01/2019	31/12/2021
TOLEDO	CHINACOTA - AUT3701500114	01/01/2010	31/12/2021
CERRITO	PARAMO ALMORZADERO - AUT24035390	01/01/2010	20/12/2020 19:00

Cabe resaltar que dentro del catálogo nacional de estaciones suministrado por el IDEAM se pueden encontrar gran variedad de parámetros y variables, sin embargo, dichas estaciones son de tipologías variadas y con fechas de instalación diferentes o incluso existen algunas en estado de suspensión, por esta razón existe disparidad entre el número de estaciones o el número de días estudiado para cada una de las variables.

Para las variables topográficas y de terreno se analizó el Modelo digital de elevación DEM de resolución de 15 m suministrado por NASA, con el cual se obtuvieron las curvas de nivel, pendientes y alturas de la zona de estudio, finalmente se utilizó el insumo del IDEAM de Mapa de coberturas de la tierra periodo (2010-2012).

- **Actividad 3:** procesar la información con el fin de obtener comportamientos mensuales de cada uno de los parámetros analizados.

Una vez recolectada la información de las variables a estudiar se procedió al preprocesamiento con ayuda de herramientas como Excel se filtraron los datos suministrados para identificar valores

atípicos, campos vacíos etc. Una vez culminado el preprocesamiento se continuo con el cálculo de los promedios mensuales multianuales para cada variable meteorológica, en el caso de las variables de terreno solamente se utilizó un promedio general el cual sería insumo para el cruce con cada uno de los meses descritos anteriormente.

- **Actividad 4:** ponderar la influencia de cada una de las variables para realizar el cálculo de la amenaza a heladas en el área de estudio.

Se realizo un comité de expertos dentro del que se encontraba principalmente población campesina de la región quienes son los principales conocedores del fenómeno ya que lo viven de primera mano, para ello se planteó generar un sondeo a través de una encuesta compuesta de cinco preguntas en las que se recolecto información de la ubicación de cada productor, en que meses del año se ha visto mayormente afectado por el fenómeno, que variables meteorológicas ha percibido desde su experiencia son las más influyentes en las heladas y finalmente que acciones realiza para disminuir el impacto en los cultivos.

- **Actividad 5:** a partir de la información obtenida realizar un estudio espacio temporal que permita zonificar la amenaza a las heladas ubicándolas espacial y temporalmente en las diferentes épocas del año.

A través de un análisis multicriterio involucrando las variables consultas se realizará la zonificación de la amenaza para este fenómeno una vez identificado el protocolo mediante el análisis de la información recopilada se procederá a zonificar las áreas con mayor amenaza a heladas en la provincia de Pamplona. Esto se hará a partir de la selección de las variables mencionadas en la fase anterior según la metodología planteada, el cálculo de la amenaza se

realizará a partir de la influencia de cada una de estas variables, esta zonificación se contrastará con información recopilada de informes, noticias o comunicados que registren la ocurrencia historia de heladas en el área de interés.

Adicionalmente se analizará la ubicación temporal de las heladas determinando los meses de mayor amenaza del evento, su comportamiento a través de los años en las zonas de la provincia para cada una de las temporadas del año.

Fase 4: Proponer prácticas que posibiliten la mitigación del impacto de las heladas en la agricultura a partir de los resultados de zonificación espacio temporal obtenidos

- **Actividad 1:** a partir de la identificación de las zonas con mayor amenaza a las heladas y de las temporadas con mayor probabilidad de ocurrencia se propondrán prácticas agrícolas que mitiguen los daños ocasionados por las heladas, así como también los parámetros a tener en cuenta en el día a día para prever la ocurrencia del fenómeno.

7. Resultados

7.1 SELECCIÓN DE VARIABLES DE ESTUDIO

Se analizaron los siguientes artículos científicos dentro de los que se identificaron las variables de estudio de cada uno de ellos.

Tabla 5.Revisión bibliográfica

ESTADO DEL ARTE SELECCIÓN DE VARIABLES		
TÍTULO	AUTOR	VARIABLES ESTUDIADAS
Minimum temperature mapping augments Australian grain farmers' knowledge of frost (2021).	David L. Gobbett, Uday Nidumolu, Huidong Jin, Peter Hayman, John Gallant	Temperatura mínima, velocidad del viento, elevación, relación de radiación solar de onda corta de junio y pendiente
Frost Forecast using Machine Learning from association to causality (2019)	Liya Ding, Kosuke Noborio, Kazuki Shibuya,	temperatura, humedad relativa, radiación neta y velocidad del viento
Modelling and learning cause-effect – application in frost forecast (2020)	Liya Ding, Kosuke Noborio, Kazuki Shibuya	la temperatura, la humedad, la radiacion y la velocidad del viento.
Statistical characterization of frost zones: Case of tea freeze damage in the Kenyan highlands (2021)	Susan M. Kotikot, Africa Flores, Robert E. Griffin, James Nyaga, Jonathan L. Case, Robinson Mugo, Absae Sedah, Emily Adams, Ashutosh Limaye, Daniel E. Irwin	Convexidad de la temperatura de la superficie terrestre, Longitud de la ruta de flujo, Elevación, Aspecto, Humedad relativa del suelo, Humedad específica, Velocidad del viento, Distancia a la fuente de agua la temperatura de la superficie, la humedad específica, la humedad relativa del suelo

Zonificación de peligro por temperaturas mínimas extremas mediante geoprocesamiento en la Cuenca Illpa en la región Puno (2020)	Sullca	Temperatura Mínima, Zona de vida, Pendiente DEM y Humedad Relativ
Forecasting frost risk in forest plantations by the combination of spatial data and machine learning algorithms (2021)	Écio Souza Diniz, Alexandre Simões Lorenzon, Nero Lemos Martins de Castro, Gustavo Eduardo Marcatti, Osmarino Pires dos Santos, José Carlos de Deus Júnior, Rosane Barbosa Lopes Cavalcante, Elpídio Inácio Fernandes-Filho, Cibele Hummeldo Amaral,	longitud, latitud, elevación, altitud relativa, orientación del relieve y distancia euclidiana de la hidrografía.
Evaluation of the Weather Research and Forecasting model for two frost events (2008)	Thara Prabha, Gerrit Hoogenboom	la temperatura del aire, la humedad relativa, la temperatura del punto de rocío, temperatura del bulbo húmedo, velocidad del viento
Application of artificial neural networks to frost detection in central Chile using the next day minimum air temperature forecast (2018).	Fuentes	Temperatura, ° C, humedad relativa, % Radiación,, Velocidad del viento, Dirección del viento, Precipitación y Punto de rocío
Mapping Statistical Characteristics of Frosts in Iran (2014)	Mahmoudi, Peyman.	el día juliano medio de la primera helada, el día juliano medio de la última helada, el número medio de días helados, la duración media del período de heladas y la duración media de la temporada
Frost risk mapping derived from satellite and	C. François , R. Bosseno , J.J. Vacher , B. Seguin	Temperature minima pendiente.

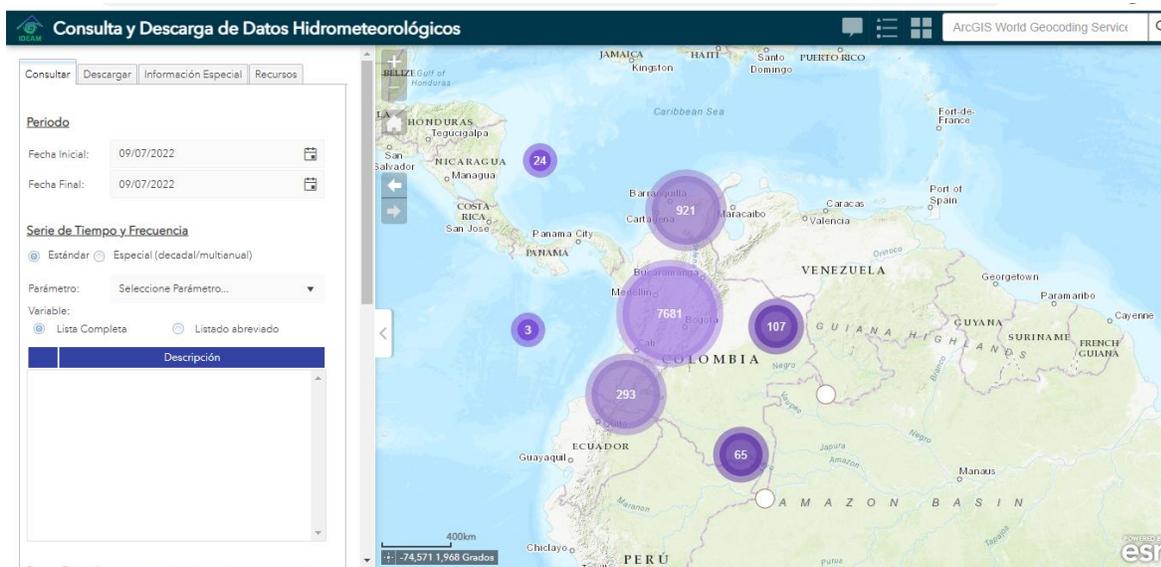
surface data over the Bolivian Altiplano		
ACTUALIZACIÓN NOTA TÉCNICA HELADAS 2012	IDEAM De acuerdo con Hurtado, G. (1996) y Artunduaga S., R. (1980, 1982)	El vapor de agua, el suelo y la vegetación, el viento, topografía, nubosidad, temperatura
PLANTEAMIENTO DE UN MODELO DE PREDICCIÓN DE HELADAS EN CULTIVOS DE ROSA EN LA SABANA DE BOGOTÁ	David Felipe González Botero	Temperatura del aire durante el día, humedad durante el día, velocidad del aire, temperatura máxima del día, temperatura mínima del día, temperatura de punto de rocío, nubosidad (cobertura de nubes/nubosidad), temperatura del aire a medianoche, humedad relativa a media noche.

Una vez culminada la revisión bibliográfica se procedió a determinar las variables a estudiar según la capacidad instalada y la disponibilidad de información para la zona, por estas razones se seleccionaron la Temperatura mínima, la Velocidad del viento, la Nubosidad y la Humedad relativa como variables climatológicas; así mismo se optó por estudiar la cobertura, pendiente y la elevación sobre el nivel del mar como las variables físicas que tienen incidencia en las heladas.

7.2 Obtención de información

Una vez seleccionadas las variables con las que se estudiará el fenómeno el siguiente paso fue la obtención de los datos de cada una de ellas.

Figura 7. Plataforma IDHIME



A partir del geoportal del IDEAM y de la identificación previa de las estaciones disponibles en la zona de estudio se solicitaron los datos disponibles por la entidad de los últimos 20 años, obteniendo así información de las estaciones descritas en las tablas 1,2,3 y 4 distribuidas en la zona de estudio y los municipios aledaños a la misma, se calcularon los promedios mensuales multianuales para cada variable como se indica a continuación.

Figura 8. Estaciones velocidad del viento

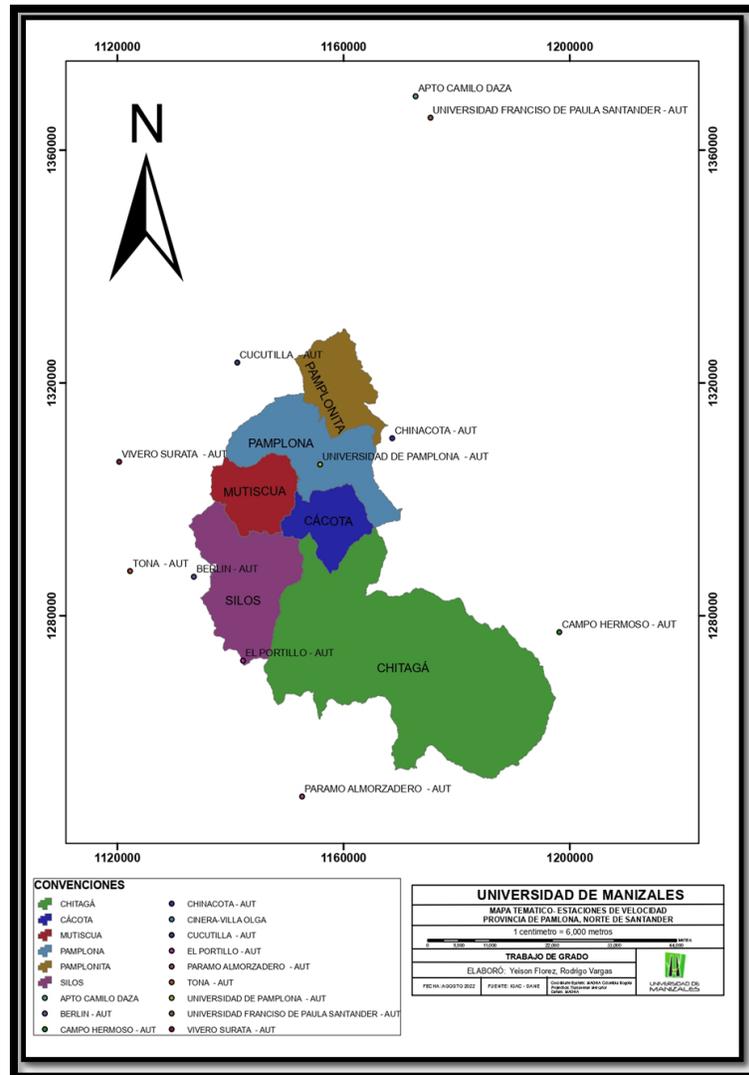


Tabla 6. Promedios mensuales multianuales velocidad del viento (m/s)

NOMBRE ESTACION	CODIGO ESTACION	MUNICIPIO	prom_1	prom_2	prom_3	prom_4	prom_5	prom_6	prom_7	prom_8	prom_9	prom_10	prom_11	prom_12
UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER - AUT	16015110	CUCUTA	1,06867871	1,13186629	1,11449891	1,17381645	1,50222263	1,86525075	1,88672273	1,80103029	1,6435797	1,28483646	1,08249843	1,12129187
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA - AUT	16015120	PAMPLONA	1,97312772	1,51855452	1,70335607	2,03677911	2,16194012	2,3140525	2,21728124	1,94178598	1,78139466	1,70661181	1,72056142	1,75113256
APTO CAMILO DAZA	16015501	CUCUTA	3,27545622	2,77807988	3,68192088	4,77725554	6,06303445	5,87203892	5,73007171	4,81268098	3,17250739	2,72076792	2,90105104	2,71135188
CINERA-VILLA OLGA	16025040	CUCUTA	1,0909379	1,15333008	1,30671882	1,53081691	1,60282972	1,44581606	1,33605741	1,39315032	1,25200765	1,14533423	1,15511945	1,11520166
CUCUTILLA - AUT	16025501	CUCUTILLA	0,71478445	0,56024484	0,43068774	0,4517734	0,50544366	0,49686165	0,32139083	0,27048244	0,38501205	0,30449027	0,71388803	0,86224203
TONA - AUT	23190130	TONA	1,28014252	1,10832279	1,1229266	1,28149048	1,3548719	1,36231071	1,30731055	1,07777155	1,13124026	1,231117	1,38057425	1,53879453
VIVERO SURATA - AUT	23195090	SURATA	1,05374093	0,95424372	0,97029026	1,08249357	1,1193802	1,03105883	0,94573613	0,94775118	1,00142534	1,141556	1,1895371	1,11888779
BERLIN - AUT	37015030	TONA	4,79059121	4,22901923	4,65380059	5,15574631	6,01654111	7,03169019	6,83081662	5,47460159	4,8665144	4,56568496	4,65986842	4,96450167
EL PORTILLO - AUT	3701500117	SILOS	3,72917922	3,46567164	3,38846561	3,63620392	3,5670284	4,61768336	4,74519342	4,20784384	4,18941074	3,41882142	3,44718278	3,88051165
CAMPO HERMOSO - AUT	3702500113	TOLEDO	1,31154565	1,29018174	1,27268124	1,26682656	1,2662656	1,46055596	1,36403477	1,36561846	1,39645984	1,3499257	1,32683485	1,32544475
CHINACOTA - AUT	3701500114	TOLEDO	1,35854124	1,38625365	1,36291623	1,38678042	1,40258925	1,27842638	1,36404405	1,37167786	1,37220699	1,3481841	1,35073666	1,35638803
PARAMO ALMORZADERO - AUT	24035390	CERRITO	3,68079489	3,68070546	3,68057982	3,67706256	3,67650213	3,6741553	3,67788819	3,67718698	3,67685433	3,67471917	3,67578122	3,67916925

Figura 9. Estaciones humedad relativa

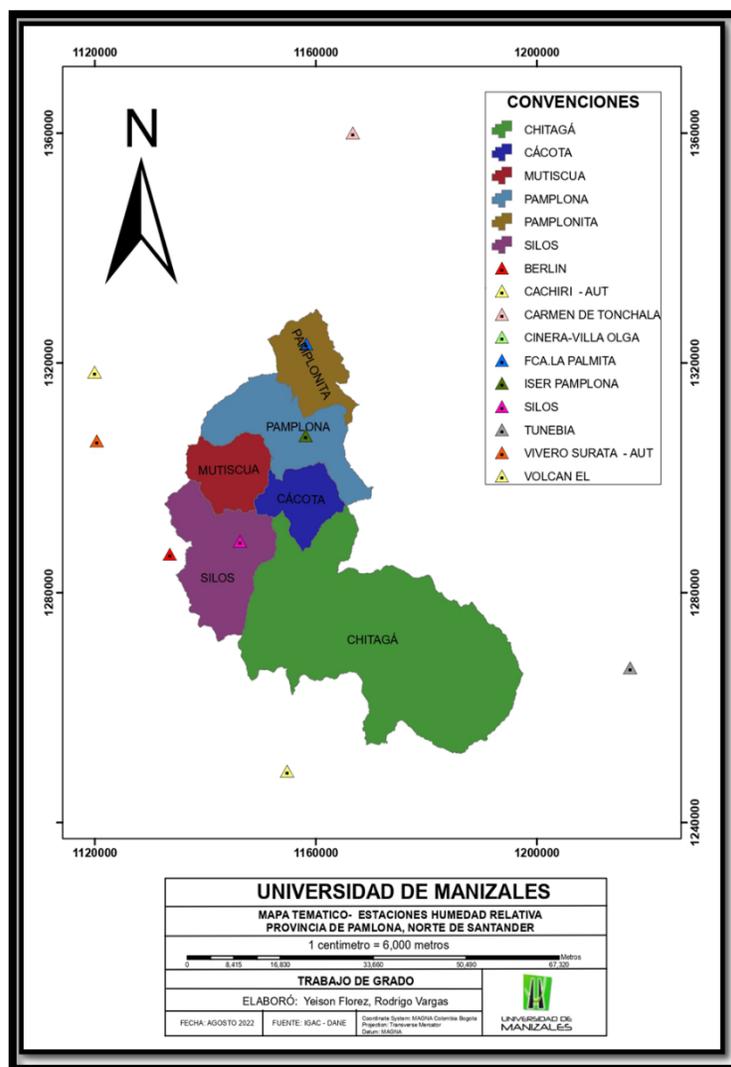


Tabla 7. Promedios mensuales multianuales humedad relativa (%)

NombreEstacion	CodigoEstacion	Municipio	prom_1	prom_2	prom_3	prom_4	prom_5	prom_6	prom_7	prom_8	prom_9	prom_10	prom_11	prom_12
VOLCAN EL [24035400]	24035400	Cerrito	51,38272	50,39796	58,50151	63,57413	64,81682	62,08176	61,44343	62,40663	63,48113	66,05298	68,31679	57,49632
CINERA-VILLA OLGA [16025040]	16025040	Cucuta	65,9434	64,26712	65,55692	66,49679	63,92879	60,6246	58,9784	56,80745	58,22756	64,0378	68,69097	68,15385
CARMEN DE TONCHALA [16025010]	16025010	Cucuta	54,28247	52,80935	58,01534	55,1526	49,01208	45,45141	43,21958	40,78443	41,74922	49,03636	61,07443	58,5342
ISER PAMPLONA [16015020]	16015020	Pamplona	62,10847	60,68559	66,34286	65,77143	61,35889	61,43728	59,29097	56,86149	56,40461	60,01299	69,11481	63,44758
BERLIN [37015020]	37015020	Tona	61,92308	62,79791	66,57012	72,06452	72,97879	74,49063	74,38253	69,9142	70,22118	70,95252	71,62587	65,68627
FCA.LA PALMITA [16015140]	16015140	Pamplonita	68,14124	65,81935	72,8773	67,74691	65,44162	68,15761	65,2807	61,82317	63,69388	67,11565	75,31538	67,51613
SILOS [37015010]	37015010	Silos	45,54878	50,39506	65,05435	70,64444	71,63855	71,9	70,4	66,66129	68,58333	66,77419	68,9322	64,77049
CACHIRI - AUT [23195200]	23195200	Surata	66,94071	66,54212	70,72632	74,24436	73,79805	73,08303	70,75789	73,55631	74,4841	76,65909	77,35857	70,95
VIVERO SURATA - AUT [23195090]	23195090	Surata	57,18548	56,264	60,45196	67,1358	68,10037	64,63019	61,30522	62,69967	62,66779	68,21306	69,70635	63,61194
TUNEUBIA [37035010]	37035010	Toledo	68,73246	66,00397	67,976	70,75319	72,91209	75,54709	73,73643	73,94881	70,34413	68,16535	70,66728	69,97095

Figura 10. Estaciones nubosidad

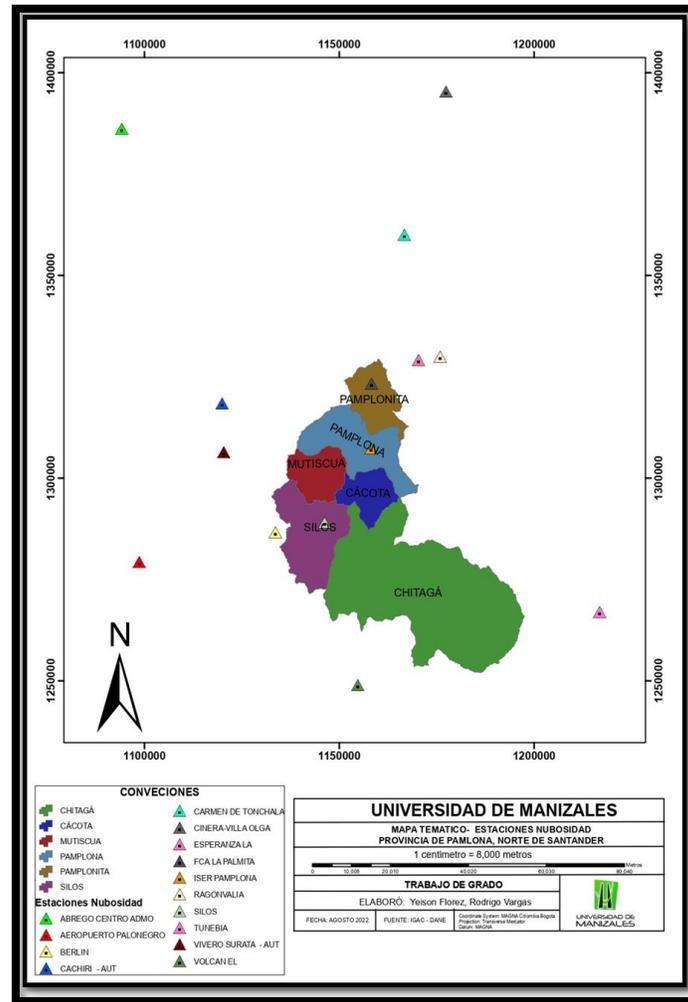


Tabla 8. Promedios mensuales multianuales nubosidad

NombreEstacion	CodigoEstacion	Municipio	prom_1	prom_2	prom_3	prom_4	prom_5	prom_6	prom_7	prom_8	prom_9	prom_10	prom_11	prom_12
ABREGO CENTRO ADMO [16055040]	16055040	Abrego	2,00974026	2,07806691	2,39655172	2,42760943	2,4512987	2,28571429	2,15107914	2,12546125	2,30699088	2,49394426	2,38666667	2,05844156
TUNEBA [37035010]	37035010	Toledo	3,01136364	3,08090615	3,1465798	3,04054054	2,9941349	2,93571429	2,96815287	2,8119403	2,70138889	2,72027972	2,75298805	2,81756757
CARMEN DE TONCHALA [16025010]	16025010	Cucuta	1,86217009	1,94498382	1,99112426	1,96330275	1,90615836	1,88181818	1,86764706	1,83577713	1,78484848	1,87419355	1,9037037	1,89568345
CINERA-VILLA OLGÁ [16025040]	16025040	Cucuta	1,7991453	1,8285078	1,88211382	1,875	1,84759916	1,81302521	1,80864198	1,73963134	1,74369748	1,83140878	1,85194175	1,83870968
ISER PAMPLONA [16015020]	16015020	Pamplona	1,76527331	1,80363636	2,05696203	2,24333333	2,19402985	2,30670927	2,17924528	2	1,94314381	2,08416149	1,92882562	1,74744027
FCA LA PALMITA [16015140]	16015140	Pamplonita	1,90521327	1,88020833	2,34299517	2,32446809	2,27884615	2,27536232	2,11961722	2,12962963	2,1920904	2,26966292	2,13157895	1,89903846
SILOS [37015010]	37015010	Silos	1,74193548	2,07058824	2,84946237	2,93333333	2,91860465	3,1	2,75806452	2,35483871	2,46666667	2,35483871	2,2	2,32258065
VOLCAN EL [24035400]	24035400	Cerrito	1,76246334	1,87459807	2,17008798	2,39209726	2,50442478	2,51212121	2,48235294	2,41470588	2,43465046	2,38834951	2,25378788	1,86084142
AEROPUERTO PALONEGRO [23195502]	23195502	Lebrija	2,03225806	2,45238095	2,64137991	2,66666667	2,61538462	2,36949153	2,30033003	2,29090909	2,4212766	2,61510791	2,56779661	2,1352459
ESPERANZA LA [16015030]	16015030	Ragonvalia	2,04411765	2,20065789	2,70278638	2,65757576	2,71005917	2,62727273	2,47647059	2,25958702	2,3088685	2,43529412	2,44981413	2,0615942
RAGONVALIA [16015100]	16015100	Ragonvalia	1,809375	1,92833876	2,27810651	2,14589666	2,18208955	2,3100304	2,19174041	1,94690265	1,86890244	2,00977199	1,97744361	1,81456954
CACHIRI - AUT [23195200]	23195200	Surata	1,40453074	1,4966443	1,75625	1,87296417	1,92814371	1,91558442	1,8585209	1,75232198	1,86774194	1,96551724	1,73913043	1,45318352
VIVERO SURATA - AUT [23195090]	23195090	Surata	1,93726937	2,02238806	2,21710526	2,3229572	2,32989691	2,24482759	2,15878378	2,2172524	2,33546326	2,42962963	2,31034483	2,13240418
BERLIN [37015020]	37015020	Tona	1,98826979	2,13870968	2,42941176	2,51671733	2,63049853	2,66060606	2,68328446	2,43529412	2,38719512	2,41470588	2,30769231	2,06148867

Figura 11. Estaciones Temperatura

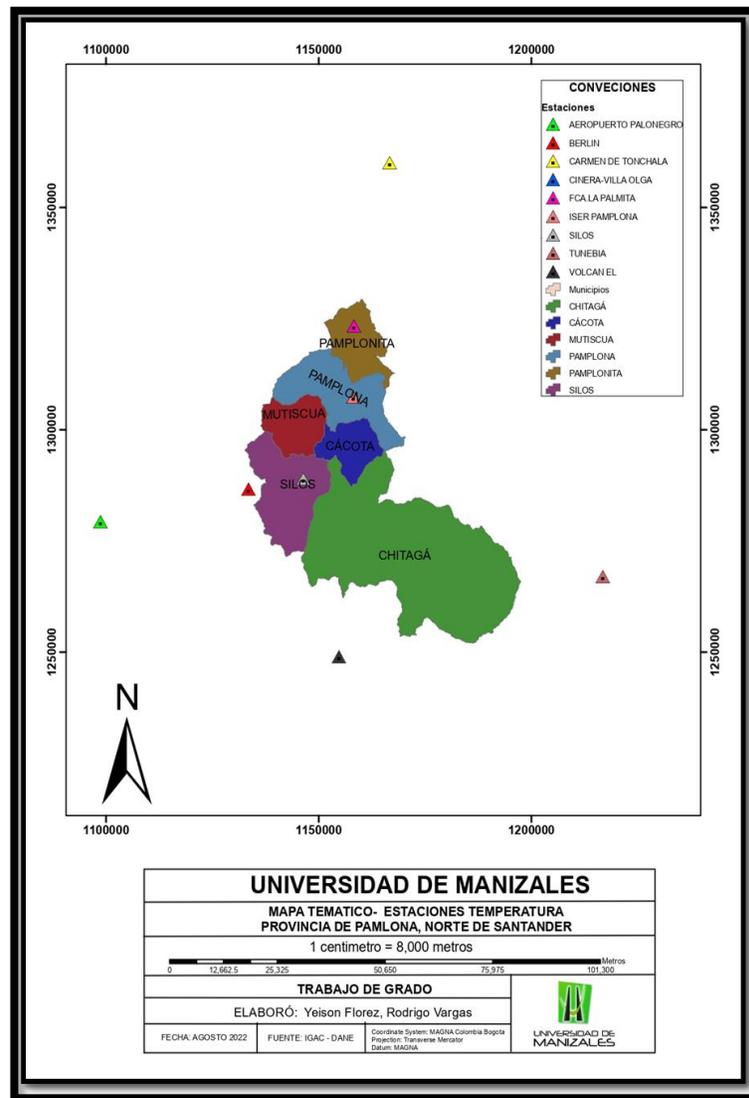


Tabla 9. Promedios mensuales multianuales temperatura (°C)

Nombre Estación	Código Estación	Municipio	prom_1	prom_2	prom_3	prom_4	prom_5	prom_6	prom_7	prom_8	prom_9	prom_10	prom_11	prom_12
BERLIN [37015020]	37015020	Tona	2,68627451	2,87755102	4,57692308	6,18309859	6,46969697	6,11594203	5,62686567	5,9125	5,6119403	5,82258065	5,03921569	3,63291139
FCA LA PALMITA [16015140]	16015140	Pamplonita	14,9333333	14,84615385	16,2424242	16,5	16,7560976	15,9333333	15,7241379	15,8125	15,8333333	16,4827586	16,1818182	14,5909091
ISER PAMPLONA [16015020]	16015020	Pamplona	8,04166667	8,66666667	10,3382353	11,2258065	11,8333333	11,8181818	11,64	10,9852941	11,0933333	10,7464789	10,8545455	8,73333333
CINERA-VILLA OLGA [16025040]	16025040	Cucuta	22,4175824	23,14814815	23,7974684	24,0842105	24,0136986	23,85	23,5116279	23,862069	23,3333333	23,4084507	23,4512195	23
CARMEN DE TONCHALA [16025010]	16025010	Cucuta	20,5246914	21,13636364	21,5855263	22,1315789	22,1810345	21,8359375	21,6358025	21,9626866	22,0352113	21,9178082	22,064	20,9230769
AEROPUERTO PALONEGRO [23195502]	23195502	Lebrija	18,75	18,72093023	19,1666667	19,173913	18,8043478	18,7419355	18,525	18,5128205	18,2708333	18,1481481	18,375	18,275
SILOS [37015010]	37015010	Silos	6,2247191	6,46031746	7,80263158	8,76623377	8,7654321	8,23376623	8,1875	8,04109589	8,11940299	8,20895522	7,77142857	7,10958904
VOLCAN EL [24035400]	24035400	Cerrito	10,1681416	10,59259259	11,3303571	11,9183673	12,09	11,8969072	11,4725275	11,2604167	11,2358491	11,3333333	11,2427184	10,9191919
TUNEBA [37035010]	37035010	Toledo	19,5258621	20,08035714	21,0107527	21,3611111	21,5045045	20,8058252	20,6960784	20,8828829	20,9891304	20,8444444	21,045977	20,3055556

Figura 12. Modelo Digital de Elevación

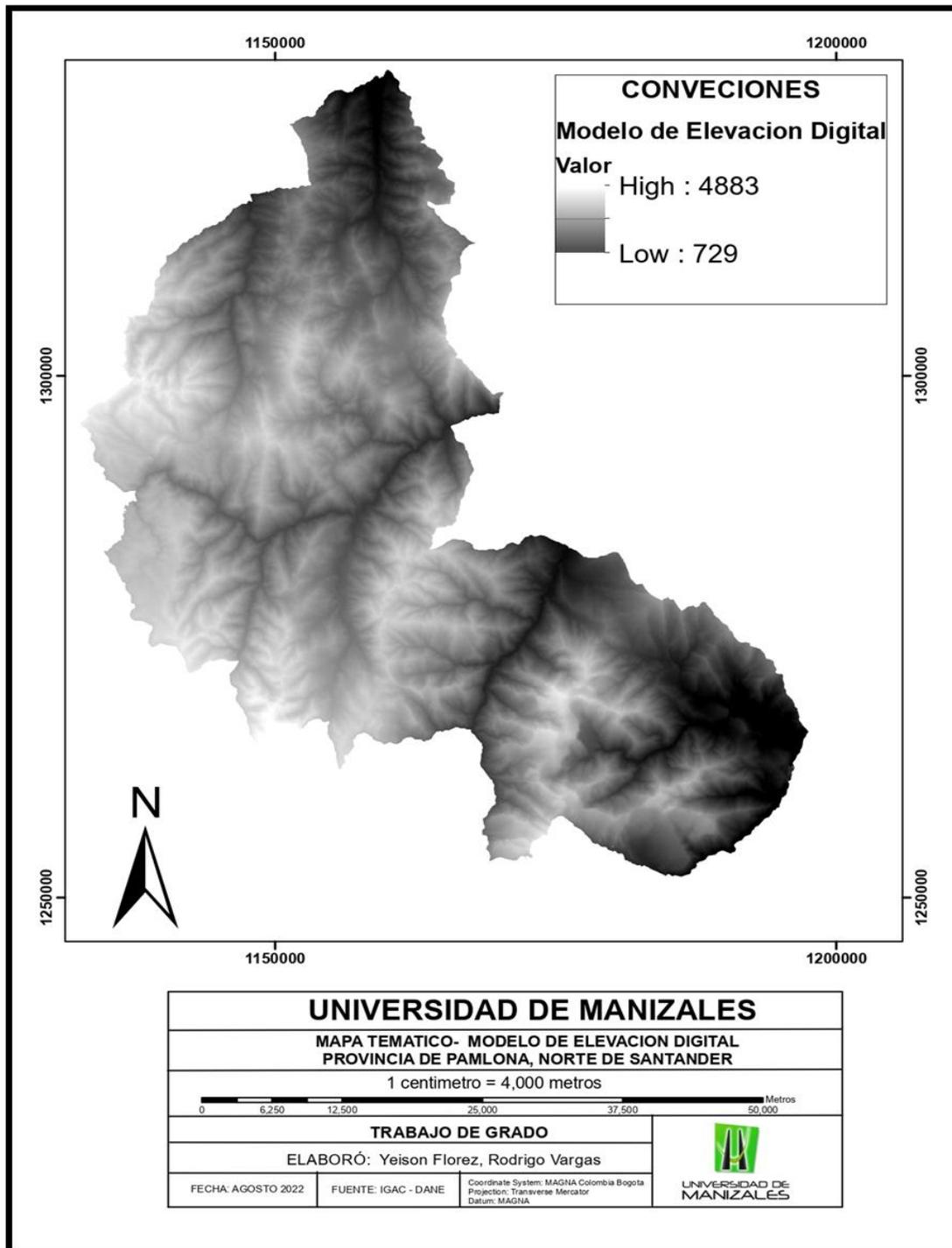
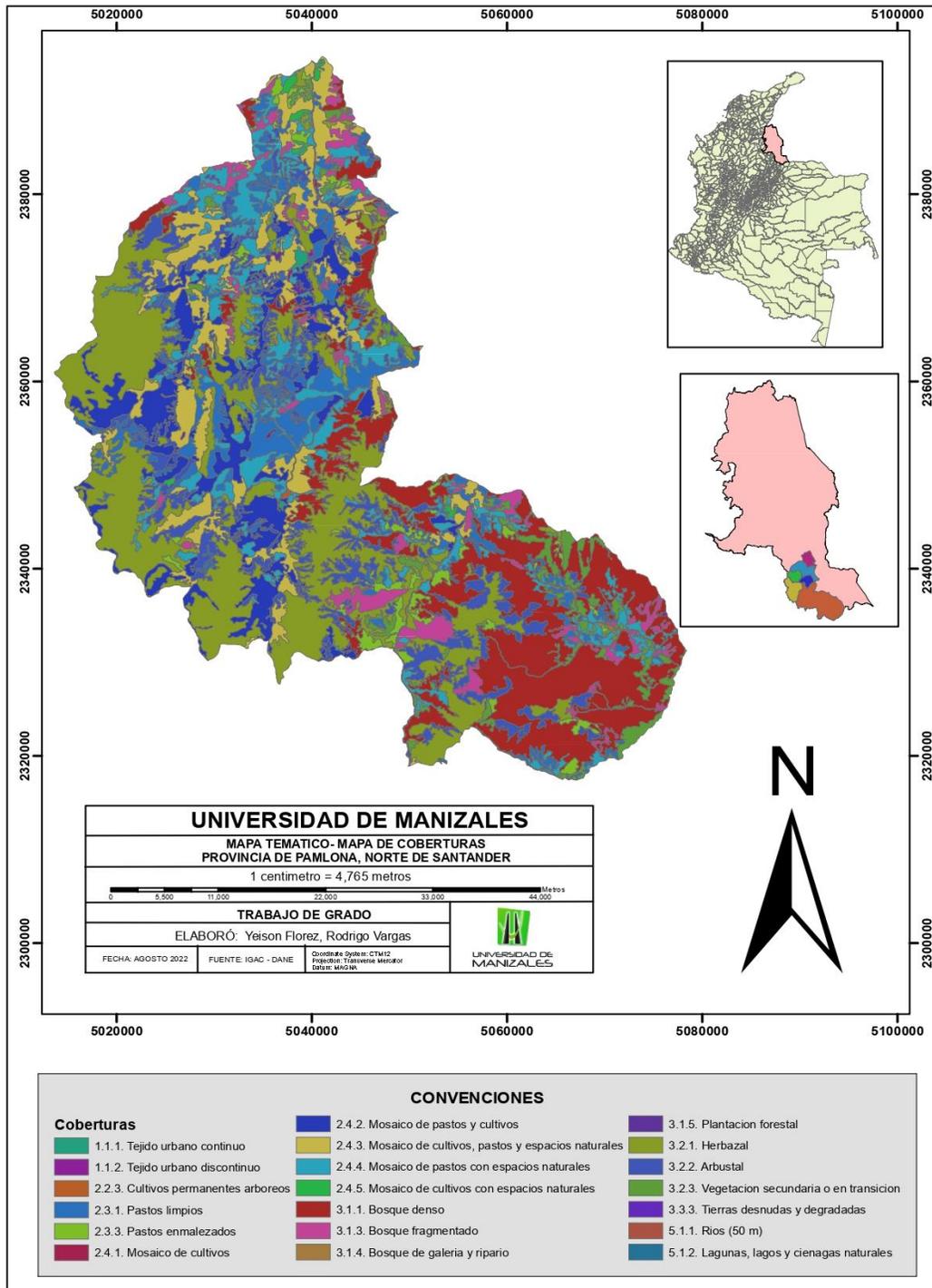


Figura 13. Coberturas Área de estudio



7.3 Determinación de la relación y ponderación de cada una de las variables analizadas en la influencia de ocurrencia de una helada.

Para determinar el peso que tendría cada variable dentro del análisis se recolectó información a través de un panel de expertos principalmente compuesto por la población directamente afectada, esto se ejecutó a partir de una encuesta en la que se estableció a través de la percepción de los campesinos las variables con mayor importancia dentro de la ocurrencia del fenómeno y los meses del año en el que se ven mas afectados, esto con el fin de tener un insumo de validación de los resultados obtenidos a partir del modelo generado por el software. Se tomaron muestras de todos los municipios que hacen parte de la provincia de Pamplona y se obtuvieron los siguientes resultados.

Figura 14. Distribución de respuestas por municipios

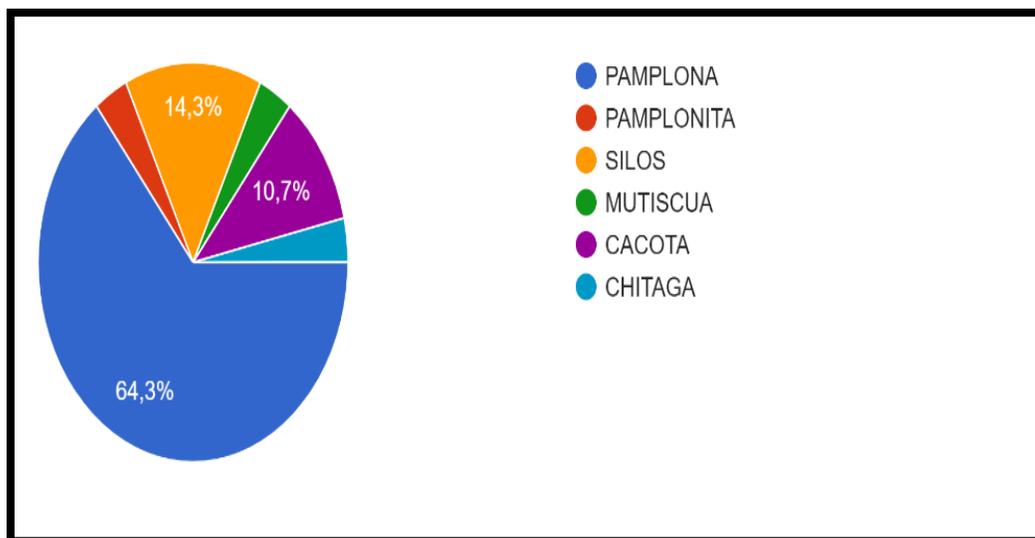


Figura 15. Mes más afectado por heladas

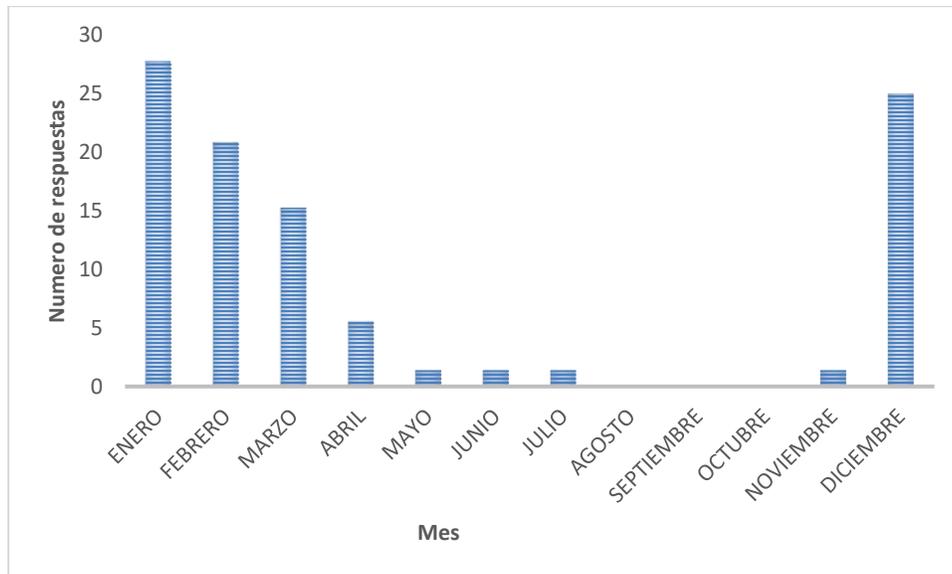
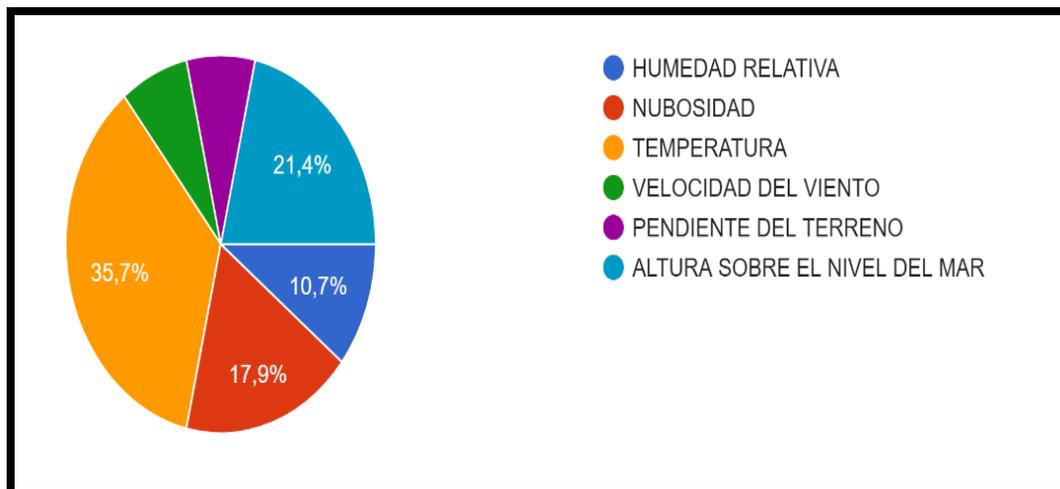


Figura 16. Variables con mayor importancia en la ocurrencia de las heladas



Como se evidencia en la figura 15 el fenómeno de las heladas tiene un comportamiento marcado, apareciendo principalmente en los meses de enero, febrero y diciembre, y con menor intensidad en los meses de marzo y abril adicionalmente según la población encuestada los meses restantes correspondientes a los meses entre mayo y noviembre las heladas son de escasa o casi nula ocurrencia. Según la población encuestada el fenómeno de las heladas se ve influenciado principalmente por la temperatura, seguido por la altura sobre el nivel del mar y la nubosidad, finalmente se ubican variables como la pendiente, la velocidad del viento y la humedad relativa, resultados muy acordes a lo consultado bibliográficamente coincidiendo con autores como (Ding, Frost Forecast using Machine Learning from association to causality, 2019) quien determino que la temperatura es el factor clave para la ocurrencia de las heladas y con (Kotikot, 2021) quien menciona que la velocidad del viento y la dirección no están tan fuertemente relacionados con el fenómeno.

Con el fin de identificar una metodología aplicable al fenómeno de las heladas se consultaron diferentes métodos para el cálculo de amenaza ante los diversos fenómenos naturales: como el método propuesto por Mora-Vahrson para el cálculo de amenaza a deslizamientos, propuestas del IDEAM para el cálculo de amenaza a inundaciones, o la propuesta que igualmente plantea el IDEAM para el cálculo de amenaza ante incendios como se evidencia en la siguiente tabla.

Tabla 10. Rangos y calificación Altura

INUNDACIONES	INCENDIOS	DESLIZAMIENTOS
VARIABLES UTILIZADAS: <ul style="list-style-type: none"> • VELOCIDAD DEL AGUA • PROFUNDIDAD DE LA LAMINA DE AGUA • TOPOGRAFIA(DEM) • PRECIPITACION 	VARIABLES UTILIZADAS: <ul style="list-style-type: none"> • SUCEPTIBILIDAD DE LA VEGETACION • PRECIPITACION • TEMPERATURA • PENDIENTE • FRECUENCIA • ACCESIBILIDAD 	VARIABLES UTILIZADAS: <ul style="list-style-type: none"> • RELIEVE • LITOLOGIA • HUMEDAD DEL SUELO • ACTIVIDAD SISMICA • PRECIPITACION
FUENTE: IDEAM	FUENTE: IDEAM	FUENTE: MORA-VAHRSON

De las metodologías consultadas se tomó como referencia la metodología planteada por el (IDEAM, 2011) en el protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos de incendios de la cobertura vegetal en el que se hace un análisis multicriterio a través de la ponderación de variables meteorológicas, de terreno y se tiene en cuenta un factor determinante para la selección de este método que es la inclusión del factor coberturas, este método se rige según la fórmula para amenaza descrita en la figura 17. se evidencia una semejanza en el comportamiento de ambos fenómenos al afectar directamente las coberturas vegetales presentes e incluir variables de terreno y variables climatológicas como detonantes en la ocurrencia de un evento.

Figura 17. Formula modelo de incendios

$$\text{Amenaza} = \text{susceptibilidad de la vegetación} \times (0,17) + \text{precipitación} \times (0,25) + \text{temperatura} \times (0,25) + \text{pendientes} \times (0,03) + \text{frecuencia} \times (0,05) + \text{accesibilidad} \times (0,03)$$

Dicha metodología se adaptó para el fenómeno de las heladas según las variables seleccionadas y los porcentajes resultantes de la opinión del panel de expertos, obteniendo los siguientes valores.

VARIABLES BIOFISICAS100%// COBERTURA 0%	
TEMPERATURA	35,7
NUBOSIDAD	17,9
HUMEDAD RELATIVA	10,7
VELOCIDAD DEL VIENTO	7,1
PENDIENTE DEL TERRENO	7,1
ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR	21,4
COBERTURA	0

Teniendo en cuenta que en resultados de la encuesta se dividió el 100% dentro de las variables meteorológicas y las variables orográficas como se observa en la tabla anterior, se recalculo el porcentaje para cada variable dándole un valor de importancia a la cobertura vegetal del 20% siendo esta una de las de mayor importancia dentro del análisis del fenómeno y dividiendo el 80% restante en las demás variables obteniendo los porcentajes definitivos descritos a continuación.

VARIABLES BIOFISICAS80%// COBERTURA 20%	
TEMPERATURA	28,56
NUBOSIDAD	14,4
HUMEDAD RELATIVA	8,56
VELOCIDAD DEL VIENTO	5,68
PENDIENTE DEL TERRENO	5,68
ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR	17,12
COBERTURA	20

Obteniendo así la siguiente fórmula para el cálculo de la amenaza:

$$\begin{aligned} \text{AMENAZA} = & \text{Susceptibilidad de la vegetación} * (0.2) + \text{Temperatura} * (0.2856) + \text{Nubosidad} * \\ & (0.144) + \text{Humedad relativa} * (0.0856) + \text{Velocidad del viento} * (0.0568) + \text{Pendiente} * (0.0568) \\ & + \text{Altura} * (0.1712) \end{aligned}$$

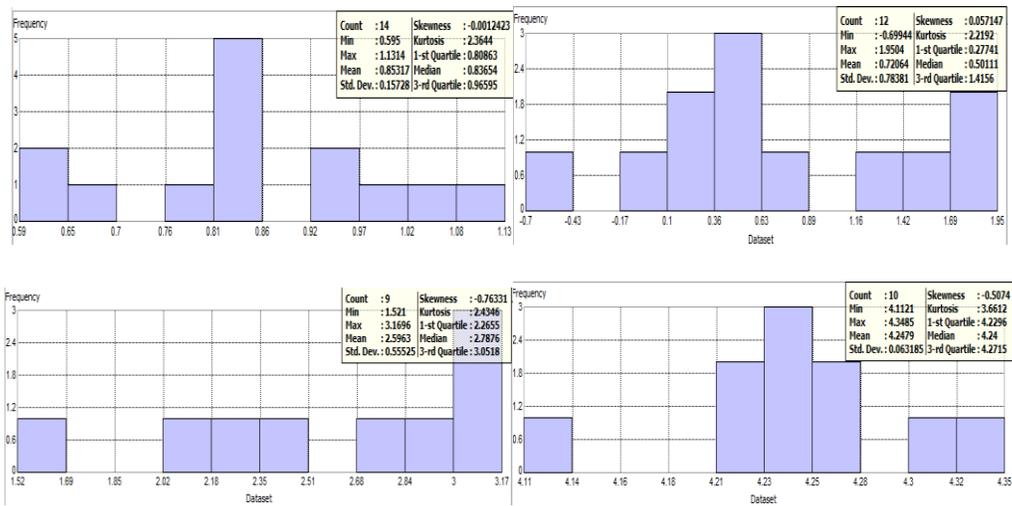
7.4 Identificación de las áreas de la provincia de Pamplona más susceptibles a la ocurrencia de heladas durante las diferentes épocas del año mediante una evaluación espacio temporal.

Mediante la implementación de la metodología propuesta, la ponderación y fórmula propuesta para el análisis de las variables se muestra la cartografía resultante para la zonificación de la amenaza de heladas en la provincia de Pamplona.

Análisis de los datos

Una vez consolidada la base de datos a estudiar se empleó la herramienta Geostatistical Analysis De Arcmap para hacer el análisis previo de los datos, verificar su comportamiento, distribución y tendencia de los datos de cada variable según el siguiente procedimiento.

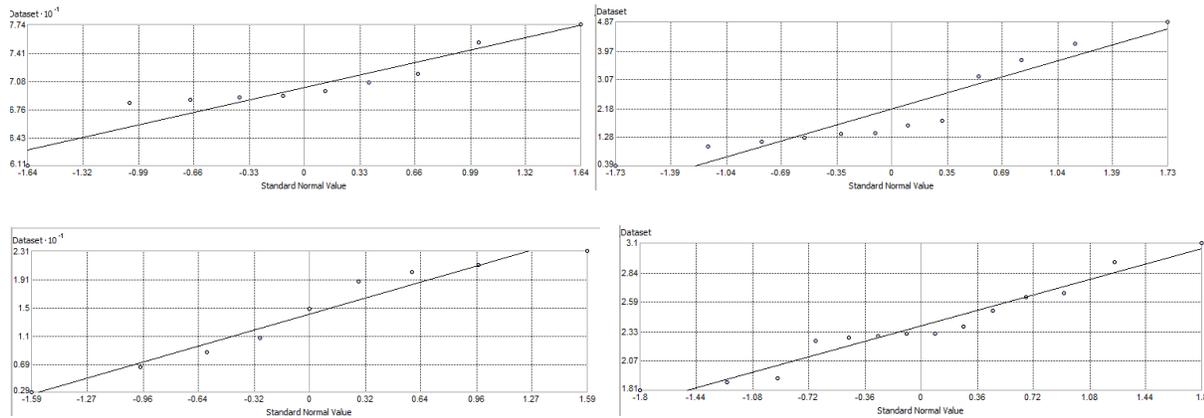
Figura 18. Histograma datos estaciones (humedad, nubosidad, Temperatura, Velocidad del viento)



Mediante el histograma se observó la distribución de los datos la cual se evidencia es una distribución normal, con valores de Kurtosis de entre 2.2 y 3.6 y Skewness entre -0.5 y 0.05 y Mean/Median entre 0.93 y 1.4 valores cercanos a los ideales de $K=3$, $SK=0$ $M/m=1$ buscados en la distribución normal.

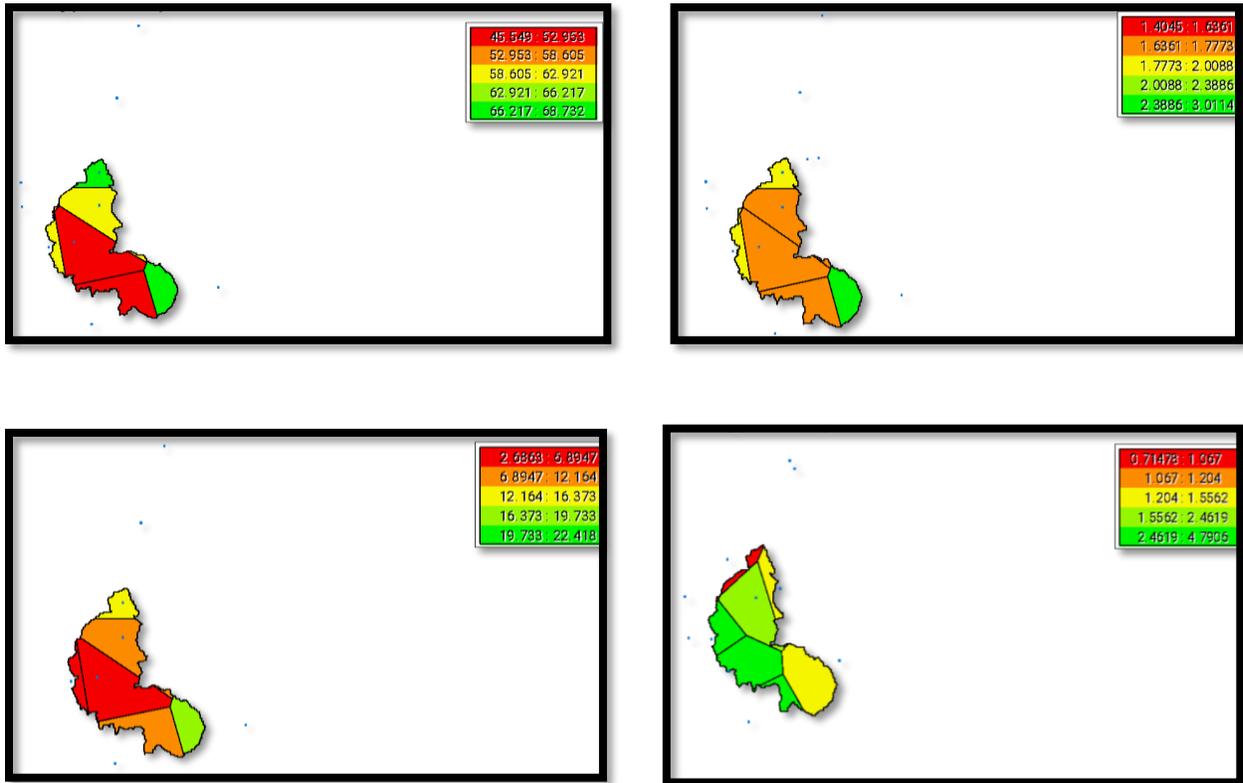
Así mismo se continuo con el análisis a partir de las demás herramientas.

Figura 19. Normal QQ Plot variables (humedad, nubosidad, Temperatura, Velocidad del viento)



A partir del grafico del QQ plot se pudo observar como los valores se acercan a la línea de tendencia del modelo lo que confirma nuevamente la distribución normal de los datos analizados.

Figura 20. Diagrama de Voronoi variables (humedad, nubosidad, Temperatura, Velocidad del viento)



Empleando el diagrama de Voronoi se hizo una observación previa del comportamiento de los valores de cada variable identificando las zonas donde se concentrados valores más altos y los valores más bajos para cada caso específico.

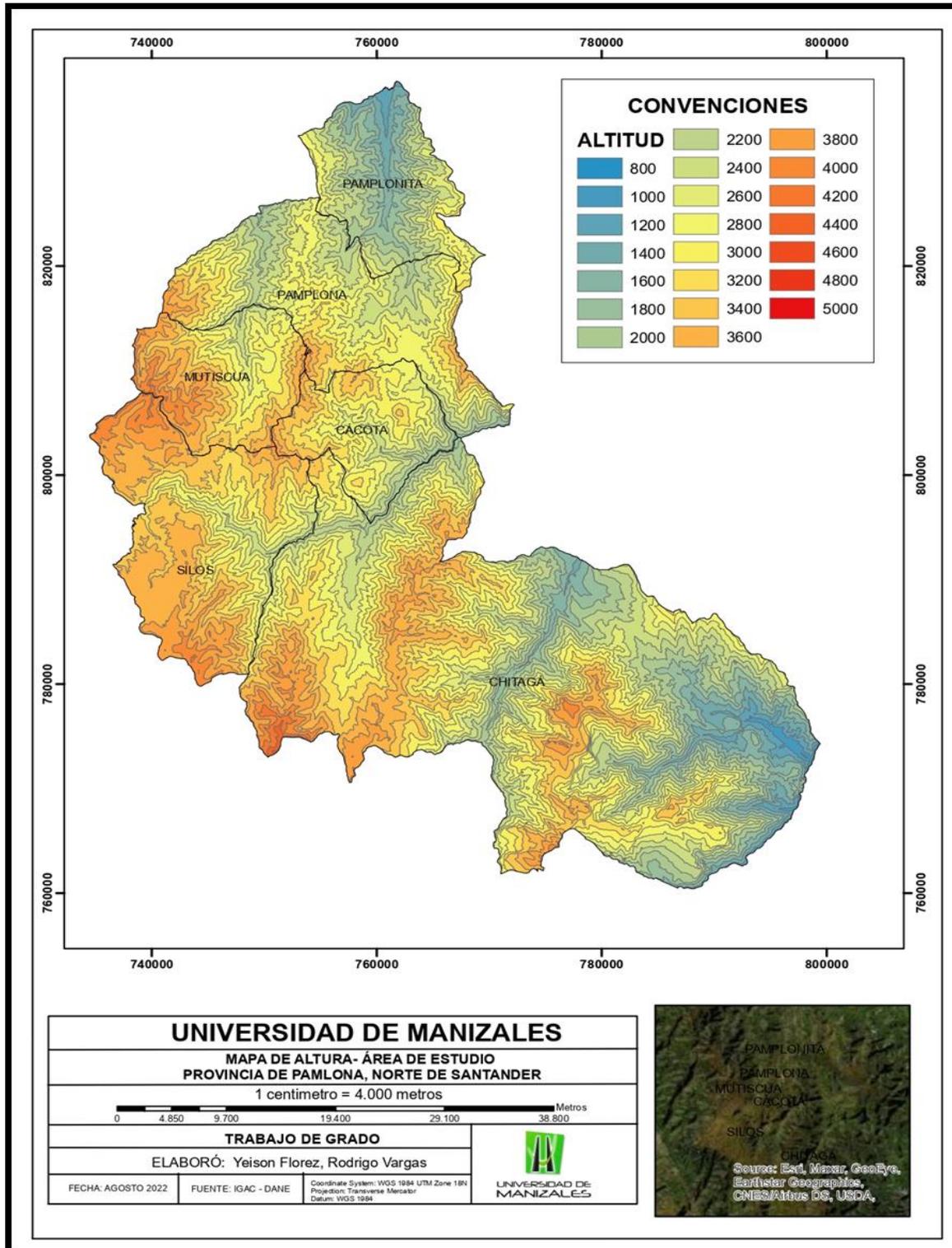
7.5 Obtención de cartografía temática

Realizando la adecuación de la información recopilada adaptándola a la zona de estudio se obtienen los insumos para la cartografía final de amenaza a helada.

Mapa de alturas

Una vez obtenido el modelo digital de elevación de 12.5 m (insumo1) suministrado por la página de la NASA, se utilizó el software ArcMap en su versión 10.5 y sus respectivas curvas de nivel con el que se obtuvo el mapa de altura sobre el nivel del mar de la zona de estudio la cual oscila entre valores de 800 y 5000 teniendo los valores más altos en la zona de páramo que comprenden los municipios de Silos, Mutiscua, Cécota, Pamplona y Chitagá.

Figura 21. Mapa de Alturas

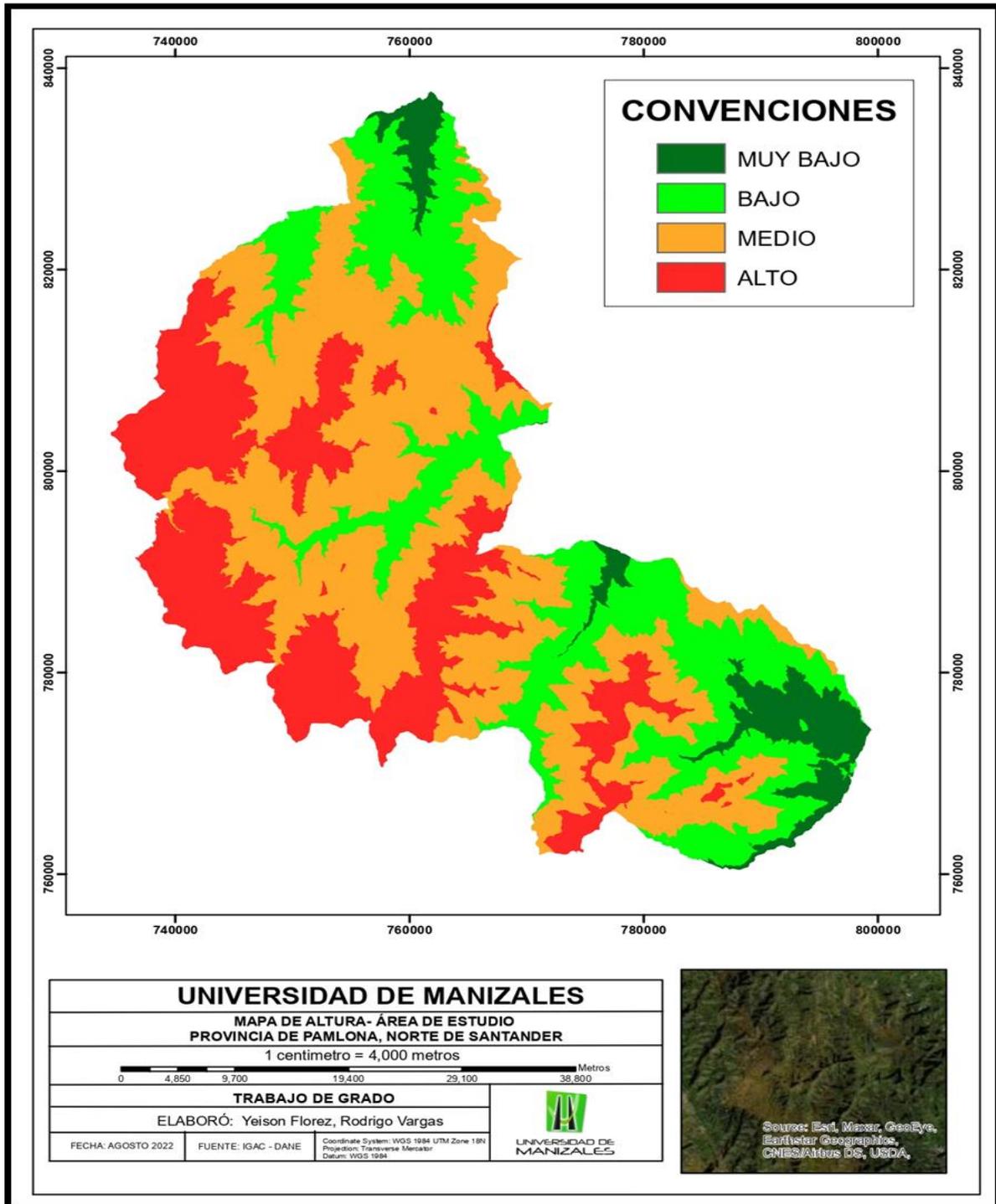


Para la homogenización de los criterios es necesario disminuir el rango de valores a un número menor; para ello se categorizo en 4 clases tomando la más baja como amenaza muy baja y llegando hasta amenaza alta como se observa en la siguiente tabla. Se evidencia una presencia predominante de la clase tres correspondiente a alturas entre los 29000 m y los 3950 m nivel de amenaza medio con un conteo de 8304027 pixeles de resolución espacial de 30m*30m.

Tabla 11.Rangos y calificación Altura

NUEVOS RANGOS		CALIFICACION	
800	1850	1	MUY BAJA
1850	2900	2	BAJA
2900	3950	3	MEDIA
3950	5000	4	ALTA

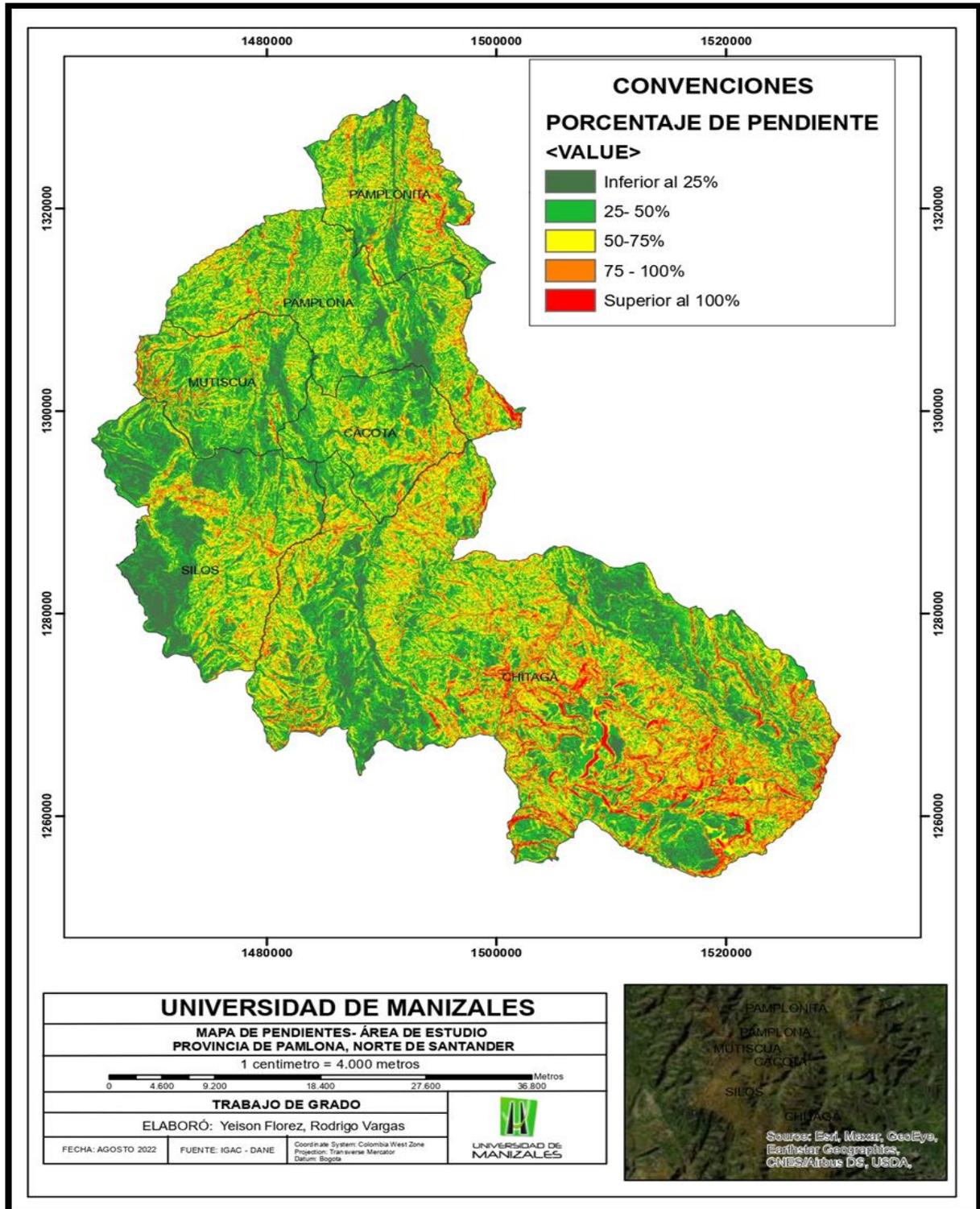
Figura 22. Mapa Alturas reclasificado



Mapa de Pendientes

A partir del insumo 1 y de la utilización del software Arcmap mediante el comando Slope se obtuvo el mapa de pendientes de la zona de estudio como se observa en la imagen, se evidencia una distribución de valores inferiores al 25% y mayor de 100 %; predominando las zonas con pendiente baja en los altiplanos de páramo y subpáramo y las zonas más escarpadas en las regiones montañosas que son la de mayor presencia en el área de estudio.

Figura 23. Mapas pendientes



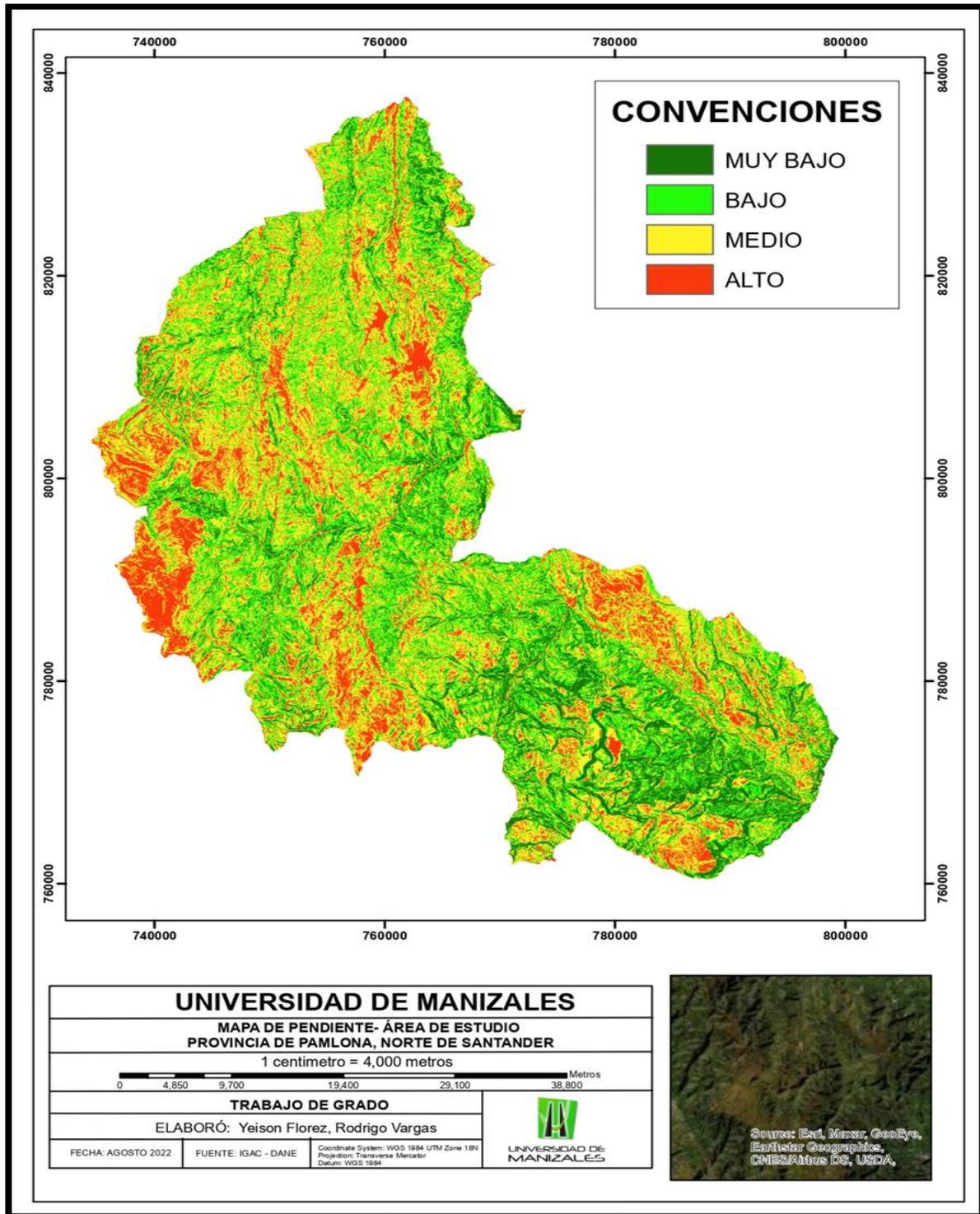
Se categorizaron los valores de la pendiente en 4 clases correspondientes a amenaza muy baja > 75 %, baja 50% a 75% , media 25% a 50% y amenaza alta 0 a 25% según la siguiente tabla.

Se evidencia una presencia predominante de la clase tres correspondiente a pendientes entre 25% y 50% nivel de amenaza medio con un conteo de 5770321 pixeles de resolución espacial de 30m*30m.

Tabla 12.Rangos y calificación Pendiente

NUEVOS RANGOS		CALIFICACION	
0	25	4	ALTA
25	50	3	MEDIA
50	75	2	BAJA
>75		1	MUY BAJA

Figura 24. Mapa Pendientes reclasificado



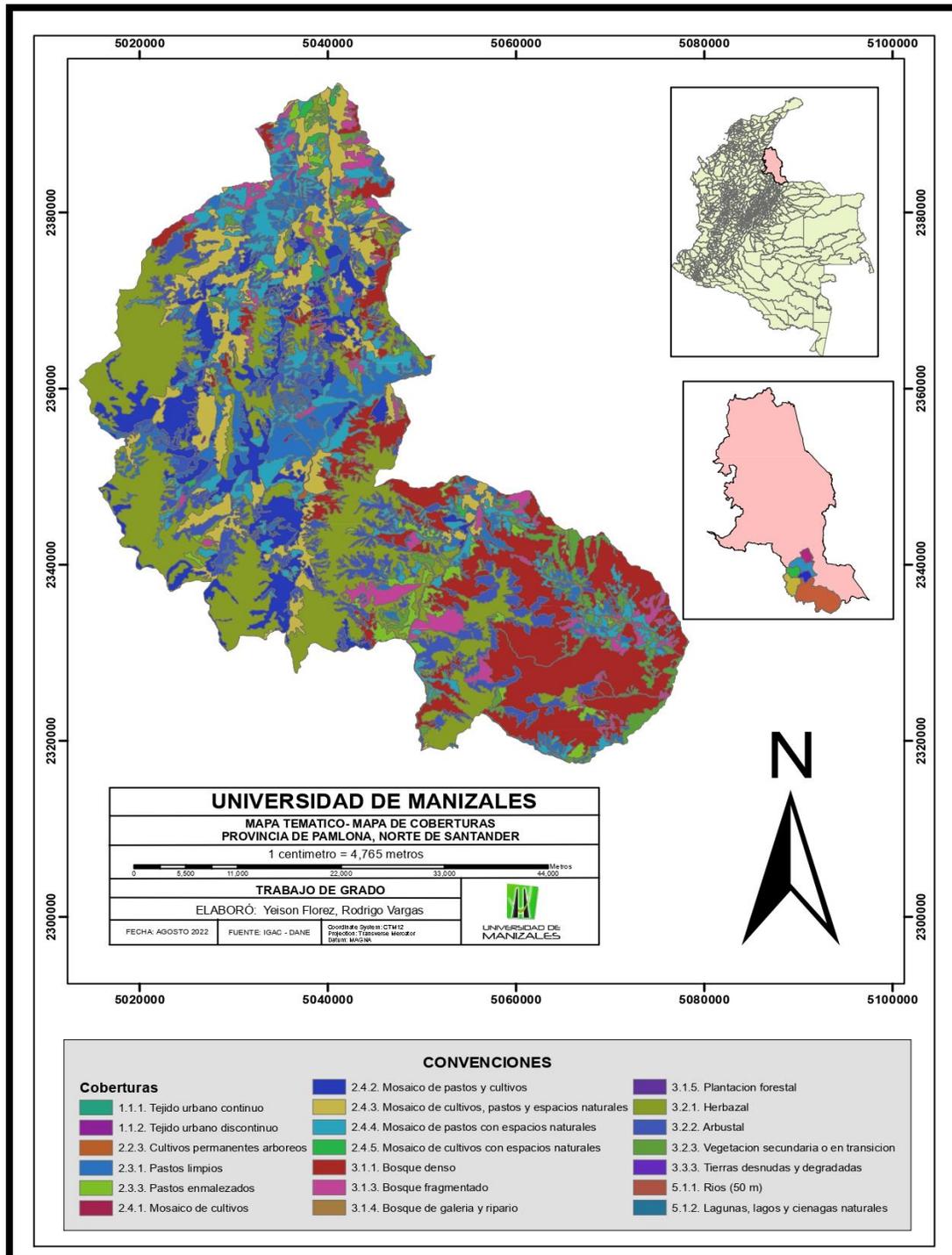
Mapa de susceptibilidad de la vegetación

Se tomo como insumo el Mapa de coberturas de la tierra periodo (2010-2012) IDEAM, y con el uso del geoproceto Clip de Arcmap se delimito y se obtuvieron las siguientes coberturas para el área de estudio.

Tabla 13. Coberturas área de estudio

COBERTURA
1.1.1. Tejido urbano continuo
1.1.2. Tejido urbano discontinuo
2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos
2.3.1. Pastos limpios
2.3.3. Pastos enmalezados
2.4.1. Mosaico de cultivos
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales
3.1.1. Bosque denso
3.1.3. Bosque fragmentado
3.1.4. Bosque de galería y ripario
3.1.5. Plantación forestal
3.2.1. Herbazal
3.2.2. Arbustal
3.2.3. Vegetación secundaria o en transición
3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
5.1.1. Ríos (50 m)
5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales

Figura 25. Mapa de coberturas

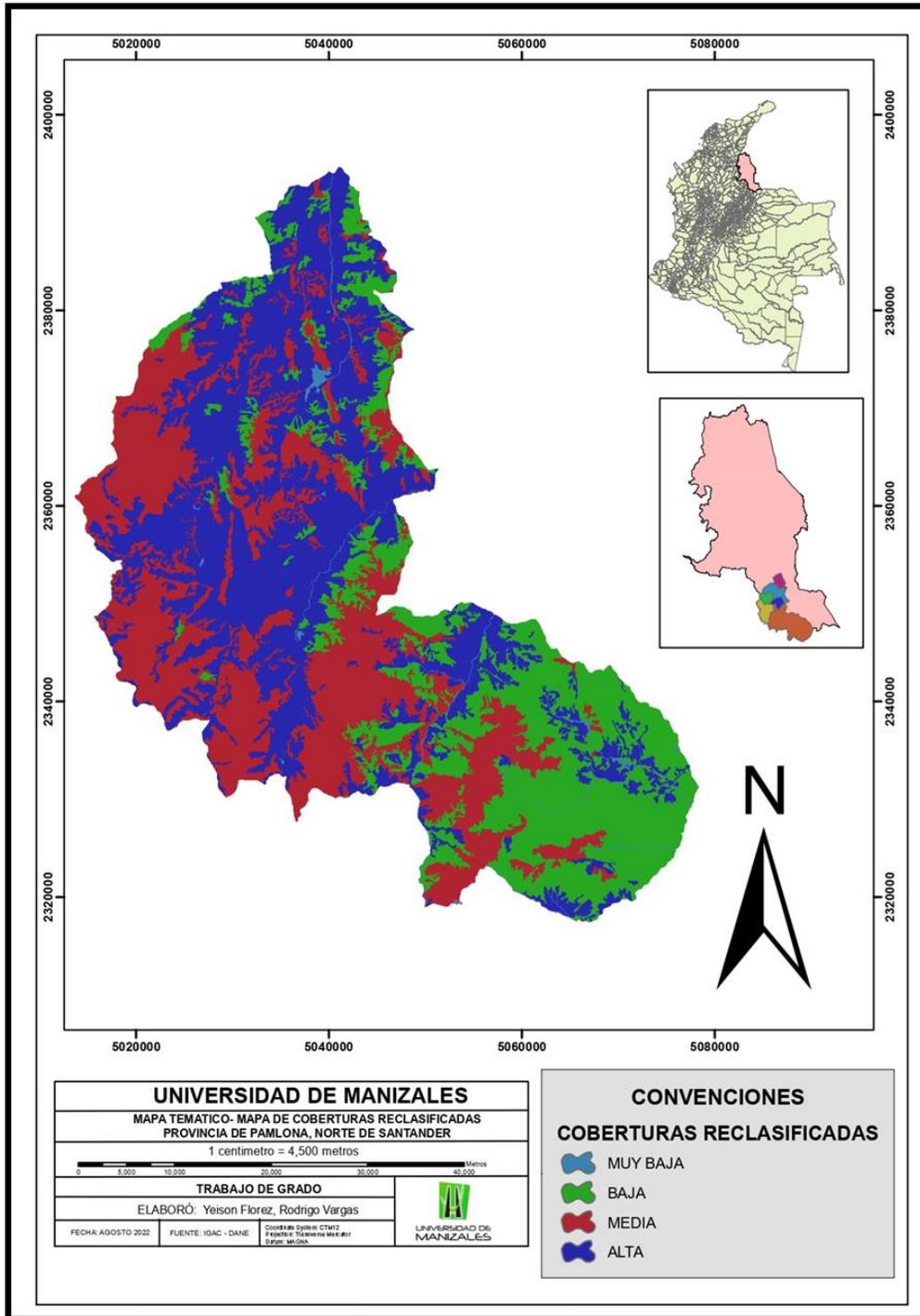


Tomando como referencia el protocolo para la realización de mapas de zonificación de riesgos a incendios de la cobertura vegetal (IDEAM, 2011), donde se categoriza la susceptibilidad de la vegetación en 5 clases según el tipo de cobertura. Se homologó y adapto dicha metodología aplicándolo al caso de interés obteniendo igualmente 5 clases clasificadas desde amenaza muy baja hasta muy alta.

Tabla 14. Rangos y calificación Coberturas

CATEGORIA DE AMENAZA	CALIFICACION
MUY BAJA	1
BAJA	2
MEDIA	3
ALTA	4
MUY ALTA	5

Figura 26. Mapa coberturas reclasificado



Mapa de velocidad del viento mensual

A partir de los datos expuestos en la tabla 6 se realizó la interpolación de los valores promedios mensuales de cada estación a través de la herramienta de Geostatistical Analyst de Arcmap.

y obteniendo los siguientes resultados

Figura 27. Menú Geostatistical Analyst (interpolación Velocidad del viento)

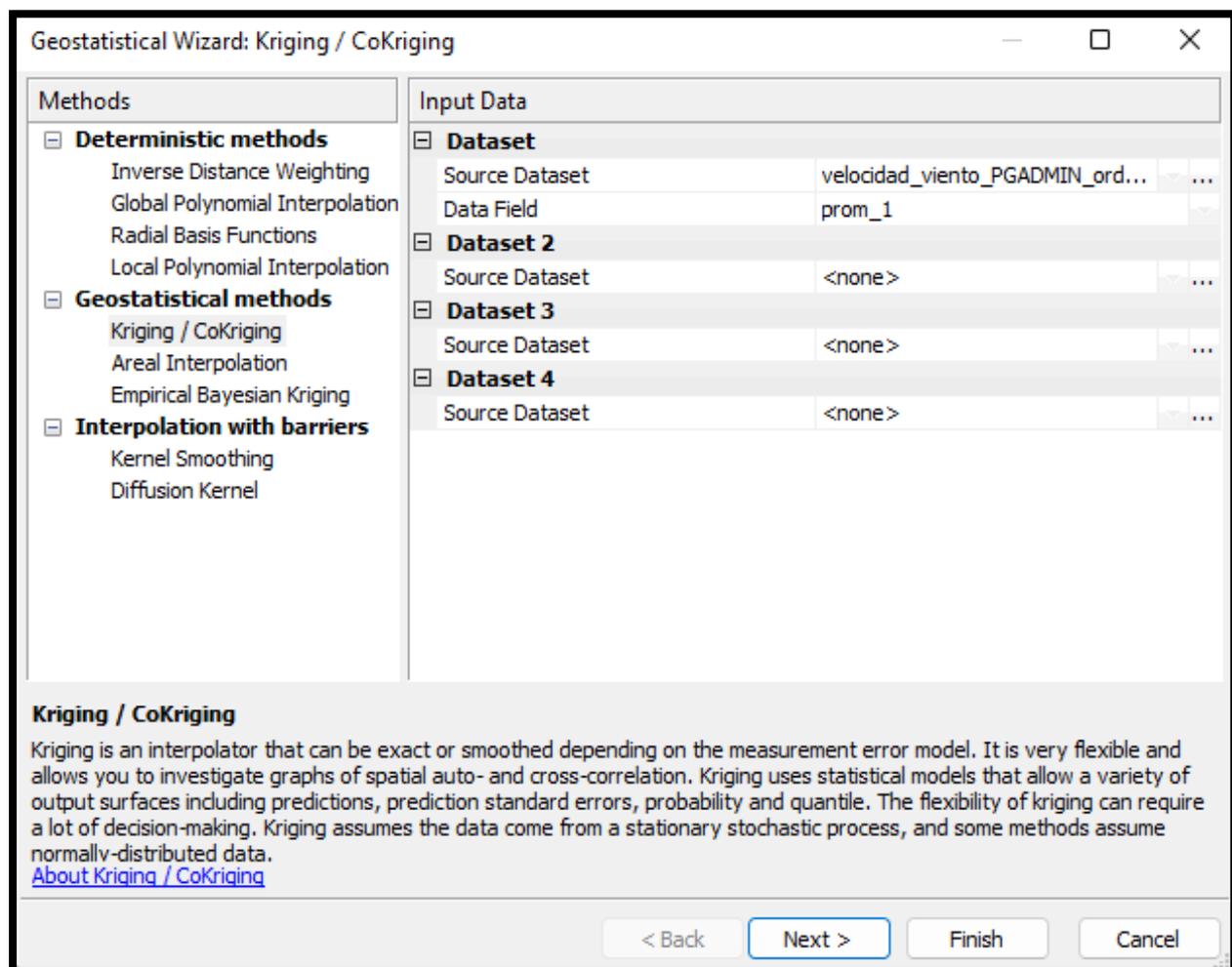
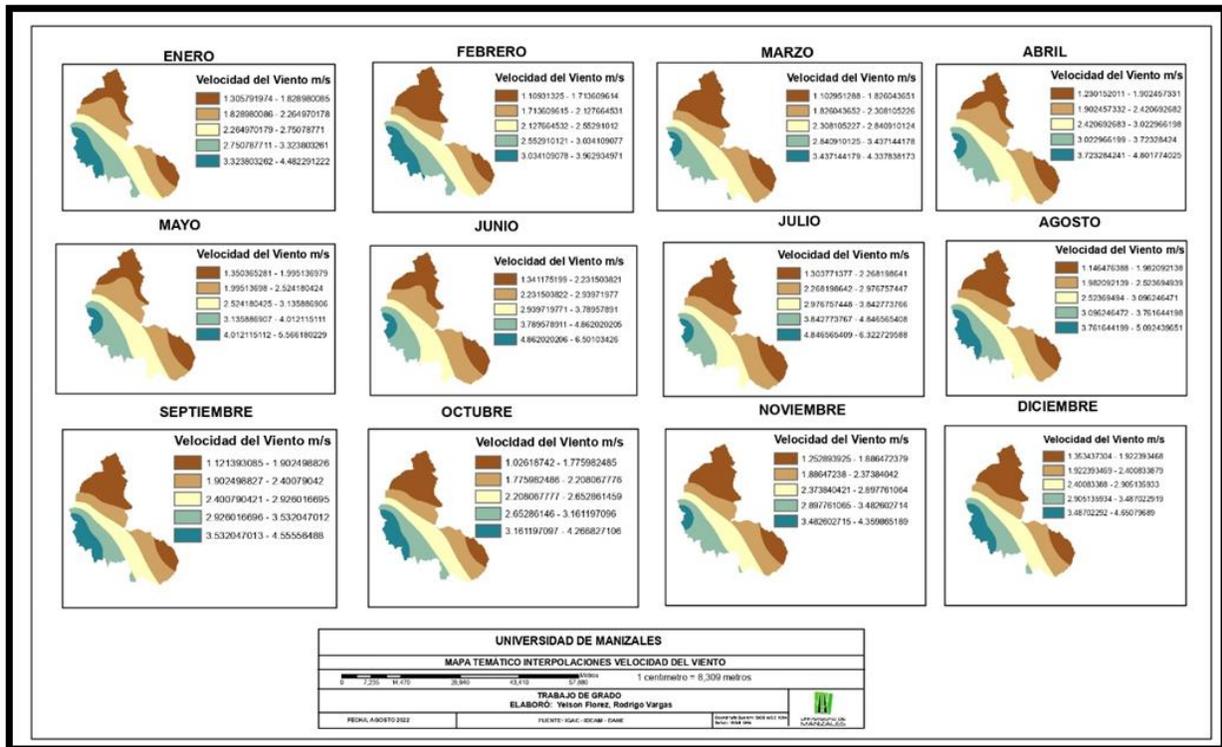


Figura 28. Mapas Velocidad del Viento



Se evidencian valores entre 1,02618742 m/s y 6,50103426 m/s encontrándose el valor mínimo en el mes de octubre y el valor máximo en el mes de junio, según el análisis realizado y la homologación del método del IDEAM para incendios se determinaron 4 clases distribuidas entre amenaza muy baja y alta según la siguiente tabla.

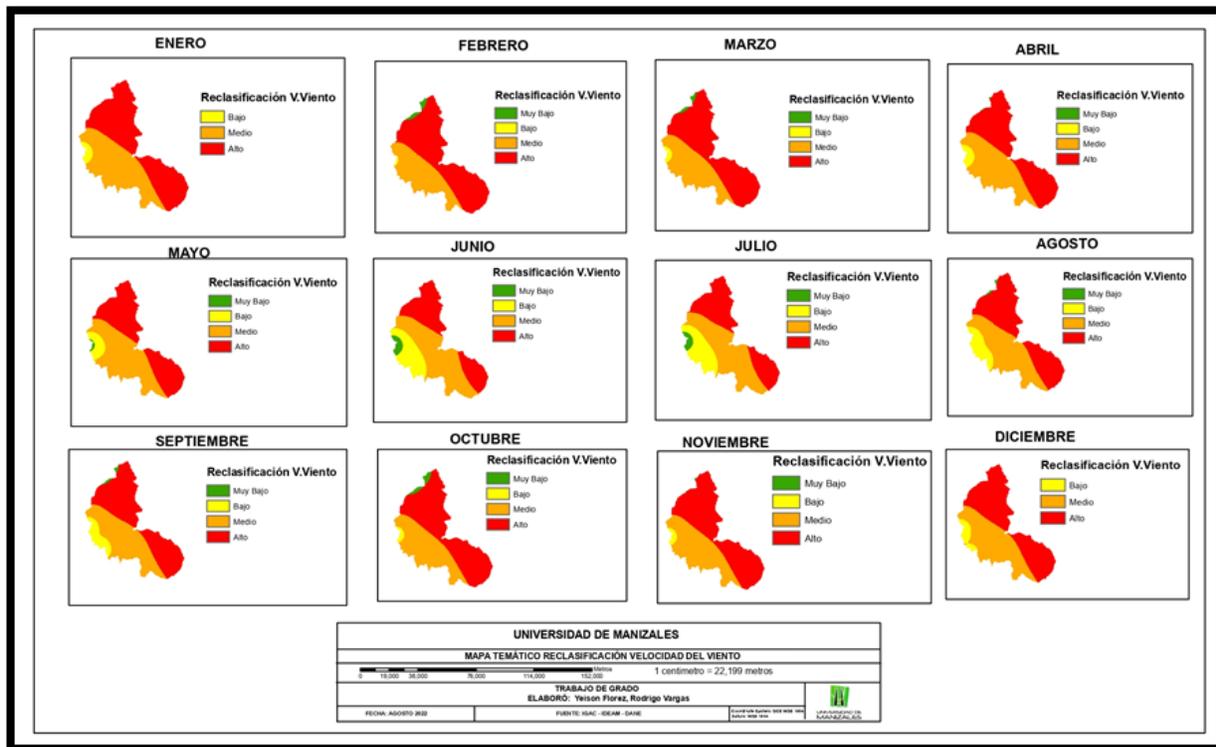
Tabla 15. Rangos y calificación Velocidad del Viento

NUEVOS RANGOS		CALIFICACION	
1,02618742	2,39489913	4	ALTA
2,39489913	3,76361084	3	MEDIA
3,76361084	5,13232255	2	BAJA

5,13232255 | 6,50103426 | 1 | MUY BAJA

Una vez determinada la distribución de frecuencia y calculados los nuevos rangos de valores para las cuatro nuevas clases a través del comando Reclass de Arcmap se recategorizaron los valores obteniendo así las siguientes salidas.

Figura 29. Mapas Velocidad del viento Reclasificado



Se puede observar la distribución espacial del comportamiento de la variable velocidad del viento a lo largo de la zona de estudio, concentrándose los valores más bajos en la región del municipio de Pamplona, Cacota, parte de Pamplonita y Chitaga durante la mayor parte de los meses del año y los valores más altos en la zona de silos y la parte alta de chitaga. Según el (IDEAM, 2012) la ausencia de vientos propicia la aparición de las heladas, sin embargo, las zonas históricamente más golpeadas por el fenómeno reflejan el resultado contrario a la causalidad negativa de la variable y el fenómeno. Razón que refuerza la hipótesis anteriormente planteada por (Kotikot, 2021) y que se obtuvo a partir de los resultados de los encuestados :“la velocidad del viento no es un factor determinante en la ocurrencia de las heladas”.

Mapa de humedad relativa mensual

Según las estaciones meteorológicas disponibles con datos de humedad relativa expuestas en la tabla 7 y la figura 9 se realizó la interpolación de los valores promedios mensuales de cada una de ellas con el uso de la herramienta del software Geostatistical Analyst Arcmap, a partir del cual se obtuvieron los resultados.

Figura 30. Menu Geostatistical Analyst (interpolación Humedad Relativa)

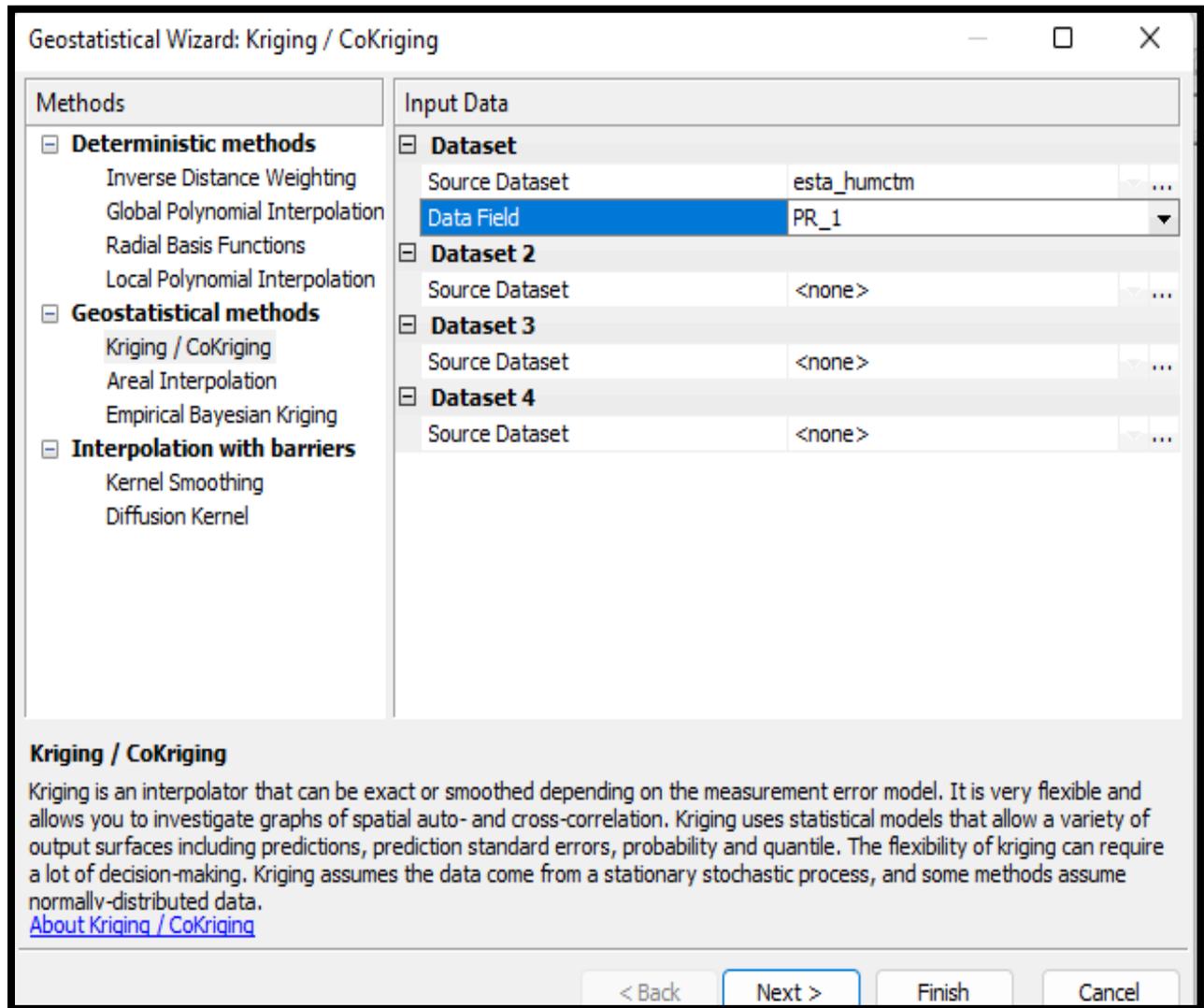
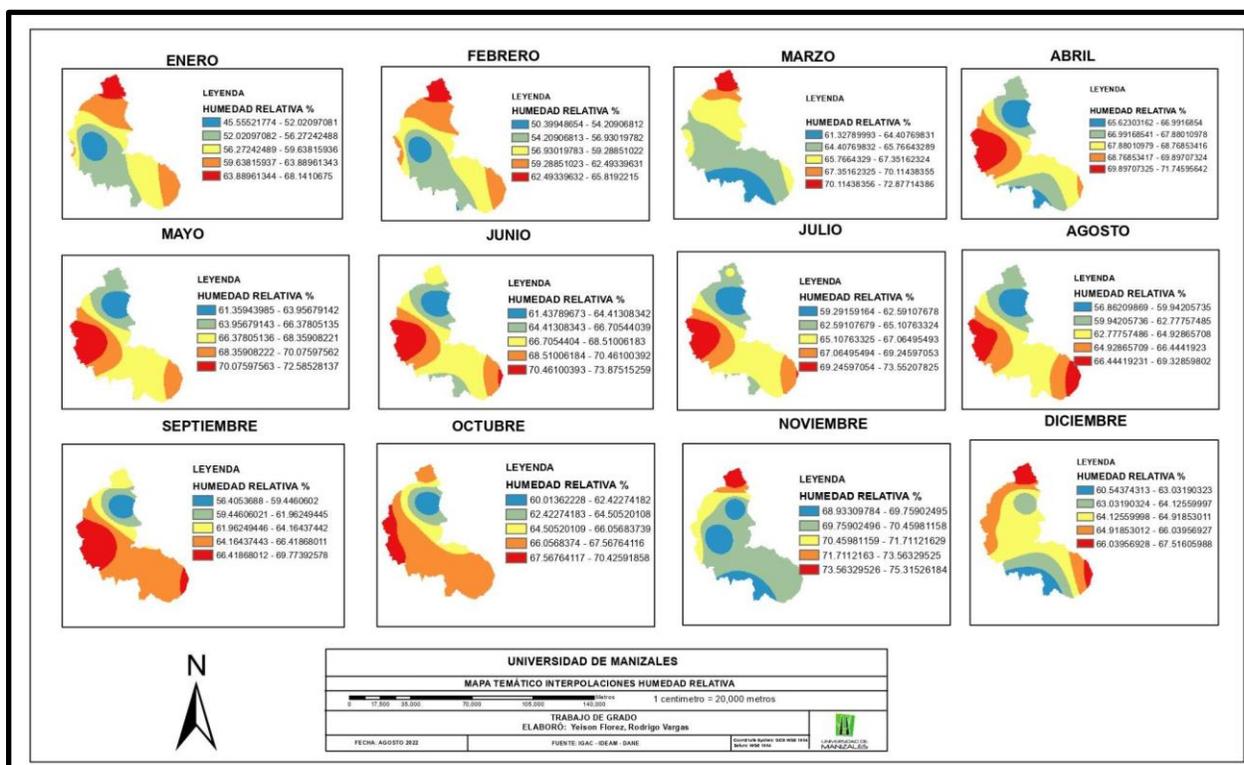


Figura 31. Mapas Humedad relativa



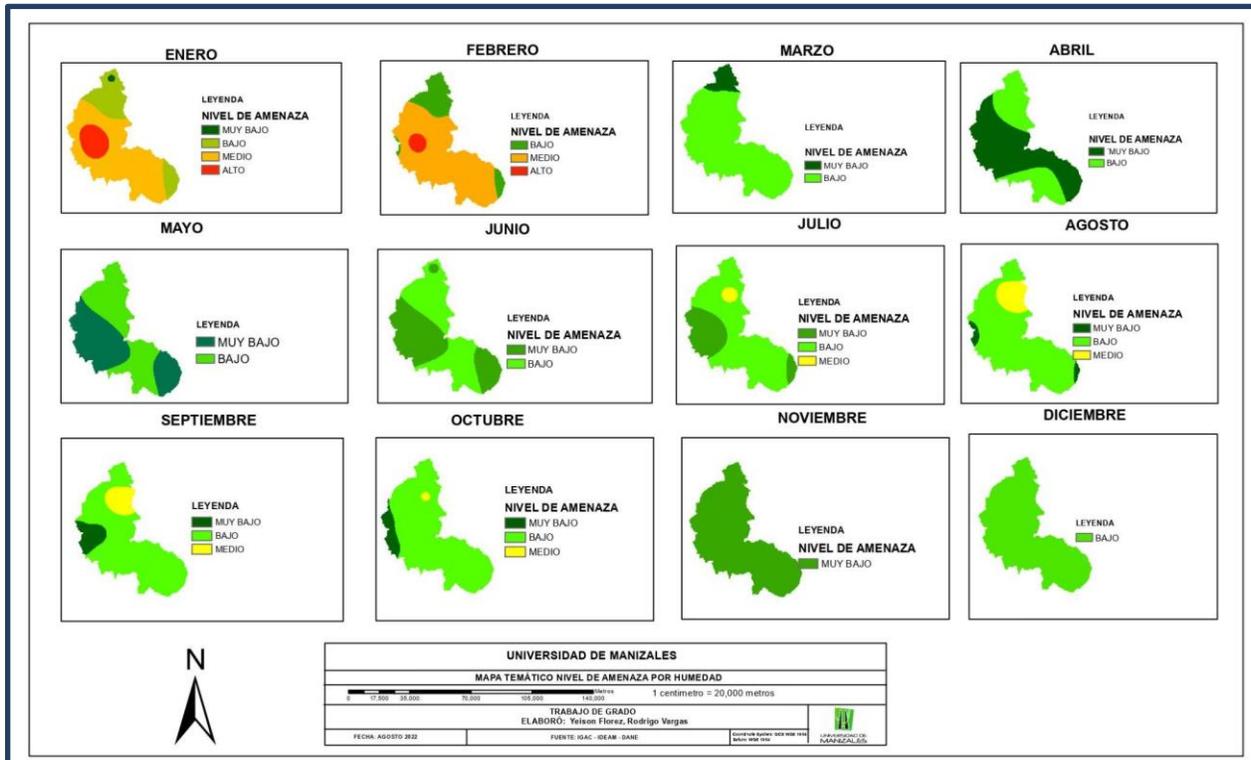
Se evidencian valores entre 45,5521774 % y 75,31526184 % encontrándose el valor mínimo en el mes de Enero y el valor máximo en el mes de Noviembre, se calcularon 4 clases a partir del método de rangos fijos a través de la distribución de frecuencia obteniendo los nuevos rangos desde amenaza muy baja y hasta amenaza alta según la siguiente tabla.

Tabla 16. Rangos y calificación Humedad Relativa

NUEVOS RANGOS		CALIFICACION	
45,552177	52,9952288	4	ALTA
52,9952288	60,4352398	3	MEDIA
60,4352398	67,8752508	2	BAJA
67,8752508	75,3152618	1	MUY BAJA

Según los nuevos rangos de la tabla anterior se calcularon las 4 clases con la aplicación del comando Reclass de Arcmap obteniendo las siguientes salidas para cada mes del año.

Figura 32. Mapas Humedad relativa reclasificado



Se puede observar como predomina en la mayoría de los meses del año la clasificación 2 correspondiente a nivel de amenaza bajo, sin embargo, en la zona del municipio de Silos, parte de Mutiscua, Cacota se observa nivel de amenaza alta, en el mes de enero, igualmente en el municipio de Pamplona y Chitaga predominan el nivel de amenaza media durante el mes de febrero, llegando a tener zonas con amenaza alta durante el mes de enero. Estos resultados tienen una correlación alta con lo descrito por los encuestados donde se evidencio que los meses con mayor presencia de heladas son los meses de enero, febrero y diciembre.

Mapa de Nubosidad

Una vez consolidados los promedios mensuales de las estaciones disponibles para la zona de estudio según lo expuesto en la tabla 8, se procedió a interpolar los valores promedios mensuales de cada una de ellas con el uso de la herramienta del software Geostatistical Analyst Arcmap.

Obteniendo el siguiente resultado

Figura 33. Menú Geostatistical Analyst (interpolación Nubosidad)

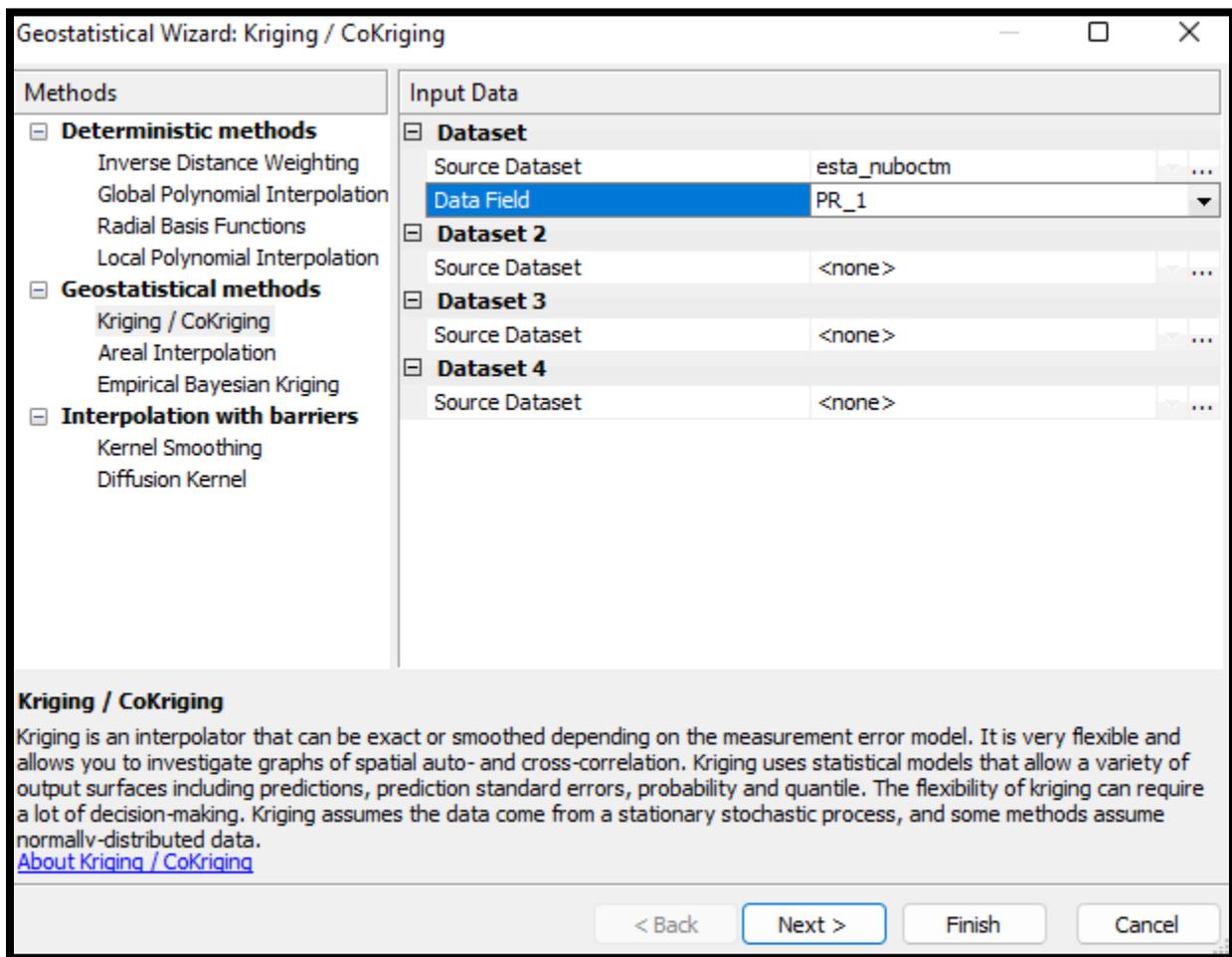
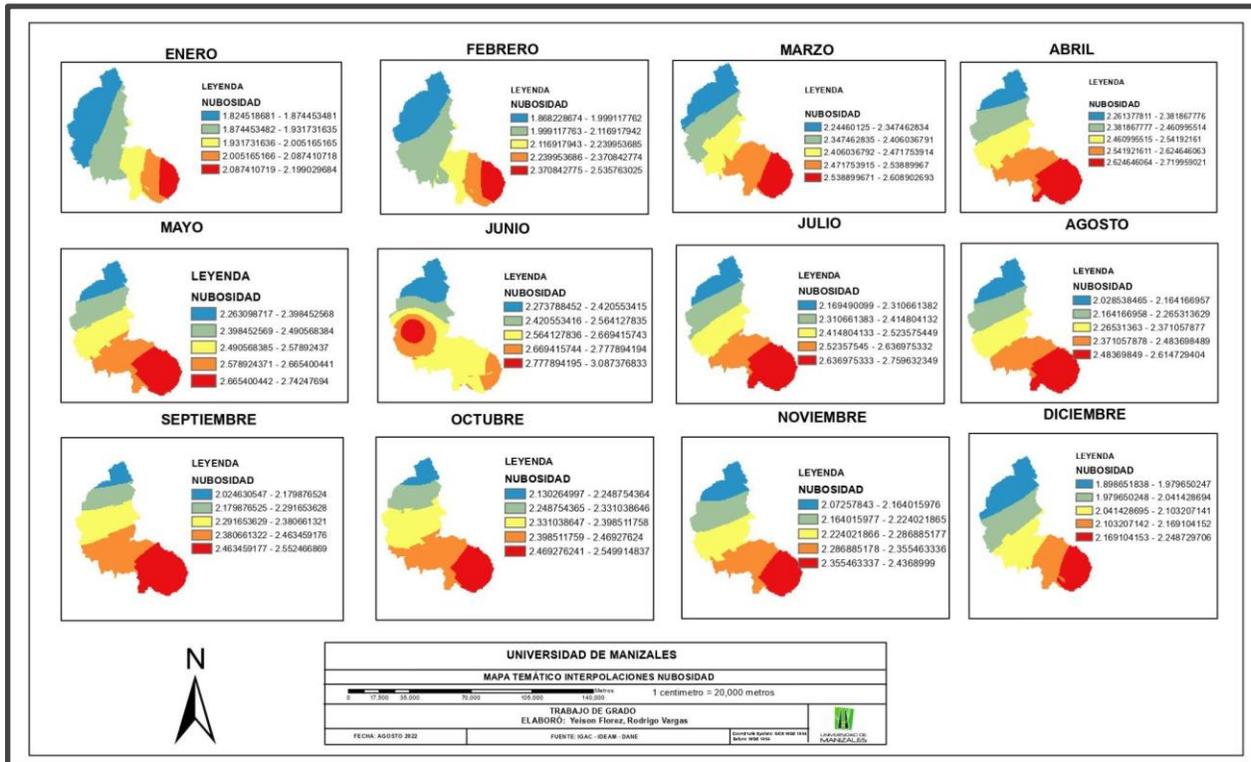


Figura 34. Mapas Nubosidad



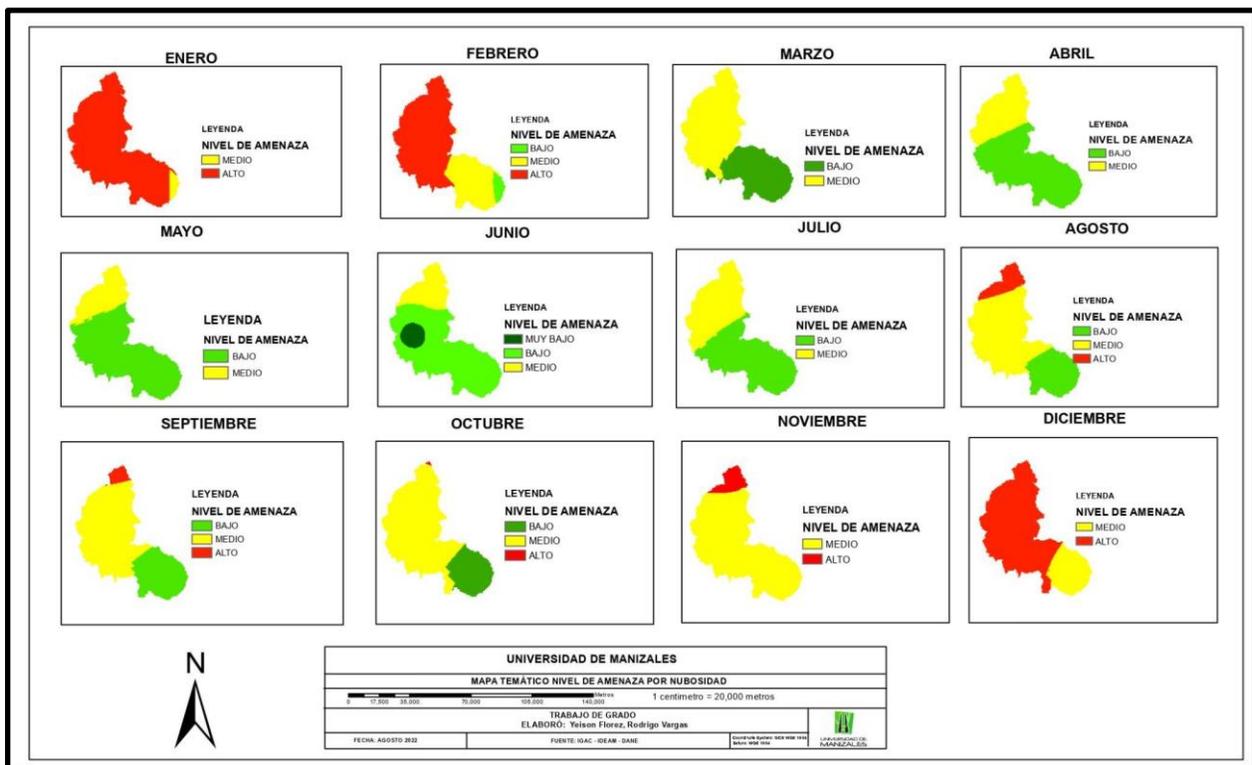
Se observaron valores entre 1.824518681 y 3.087376833 encontrándose el valor mínimo en el mes de Enero y el valor máximo en el mes de junio, se calcularon 4 clases a partir del método de rangos fijos a través de la distribución de frecuencia obteniendo los nuevos rangos desde amenaza muy baja y hasta amenaza alta según la siguiente tabla.

Tabla 17. Rangos y calificación Nubosidad

NUEVOS RANGOS		CALIFICACION	
1.82451868	2.14023322	4	ALTA
2.14023322	2.45594776	3	MEDIA
2.45594776	2.7716623	2	BAJA
2.7716623	3.08737683	1	MUY BAJA

A partir de los nuevos rangos expuestos en la tabla anterior se calcularon las 4 clases para las capas de cada mesa través del comando Reclass de Arcmap obteniendo las siguientes salidas para cada mes del año.

Figura 35.. Mapas Nubosidad reclasificado



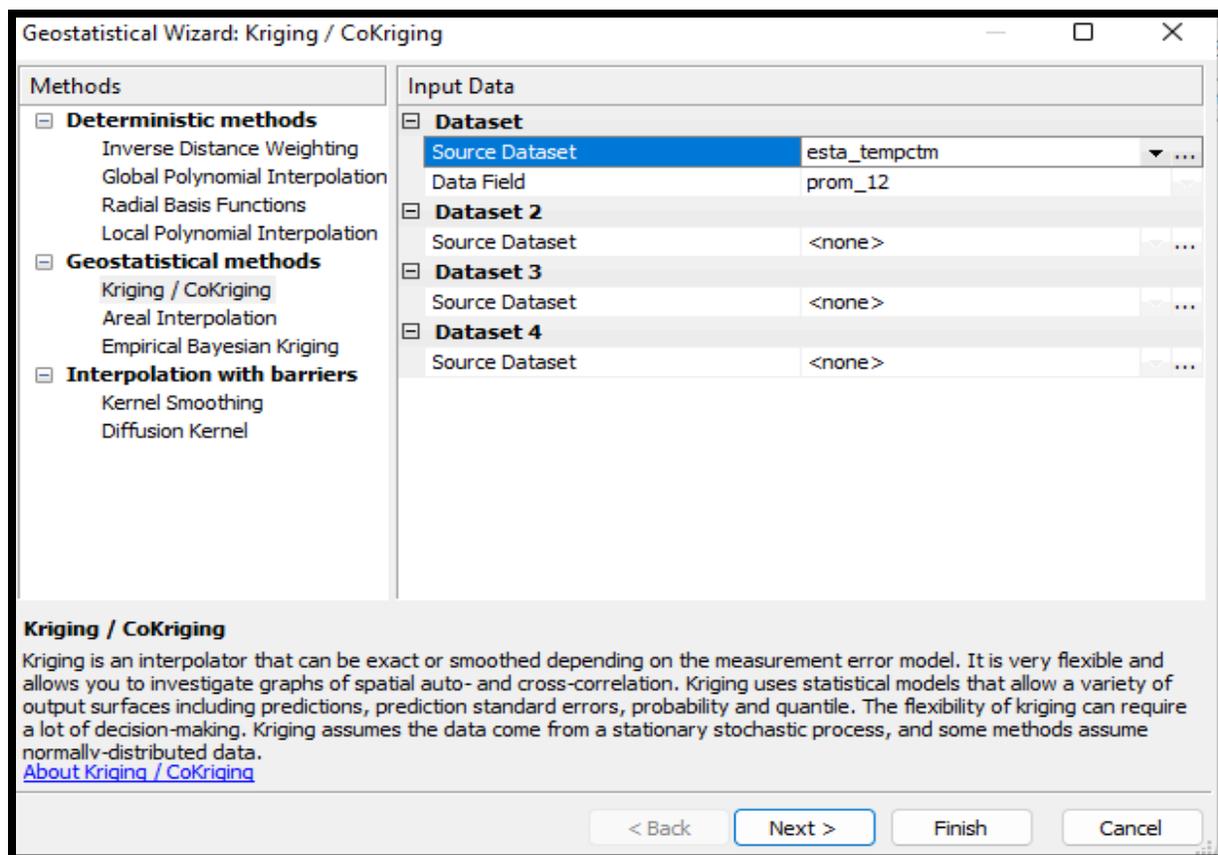
Se evidencia un comportamiento Bimodal para los valores altos de la variable nubosidad teniendo la primera aparición en los meses de Enero y Febrero cubriendo la mayoría de la provincia el valor de calificación 4, posteriormente en los meses de marzo A julio se puede observar como el comportamiento de la nubosidad esta entre el Rango de calificación 1 y 3 dando a entender que un nivel medio de amenaza para dichos meses del año, finalmente el segundo momento de niveles altos se da en los meses de agosto, septiembre, octubre , noviembre y diciembre sin embargo en

los primeros 4 meses de este periodo el porcentaje de cobertura para la calificación 4 es relativamente baja predominando la calificación 3, siendo diferenciado el mes de Diciembre por tener un gran porcentaje de la superficie de la provincia con el nivel de calificación más alto.

Mapa de Temperatura

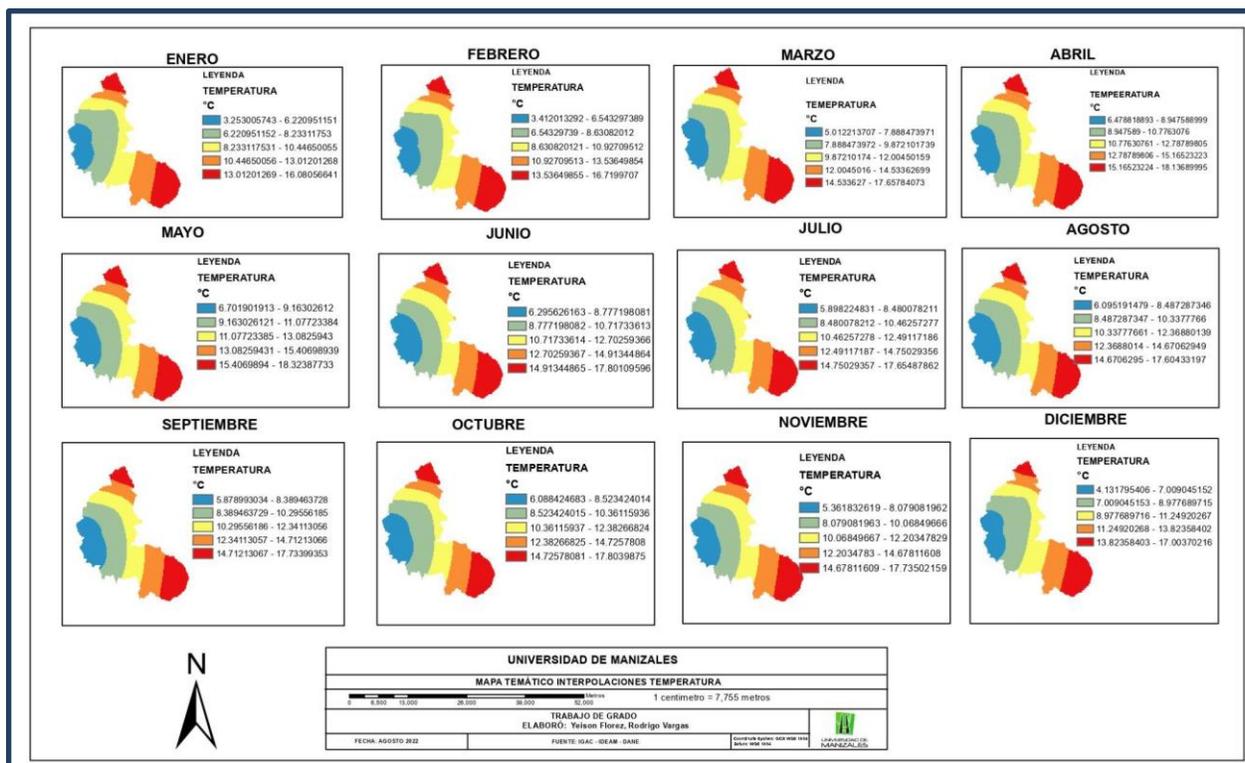
A partir de los datos relacionados en la tabla 9, se hizo la interpolación de los valores promedios mensuales de las estaciones correspondientes a la zona de estudio, para ello se empleó la herramienta de Geostatistical Analyst Arcmap.

Figura 36. Menú Geostatistical Analyst (interpolación Nubosidad)



Con lo que se obtuvo la siguiente salida.

Figura 37. Mapas Temperatura



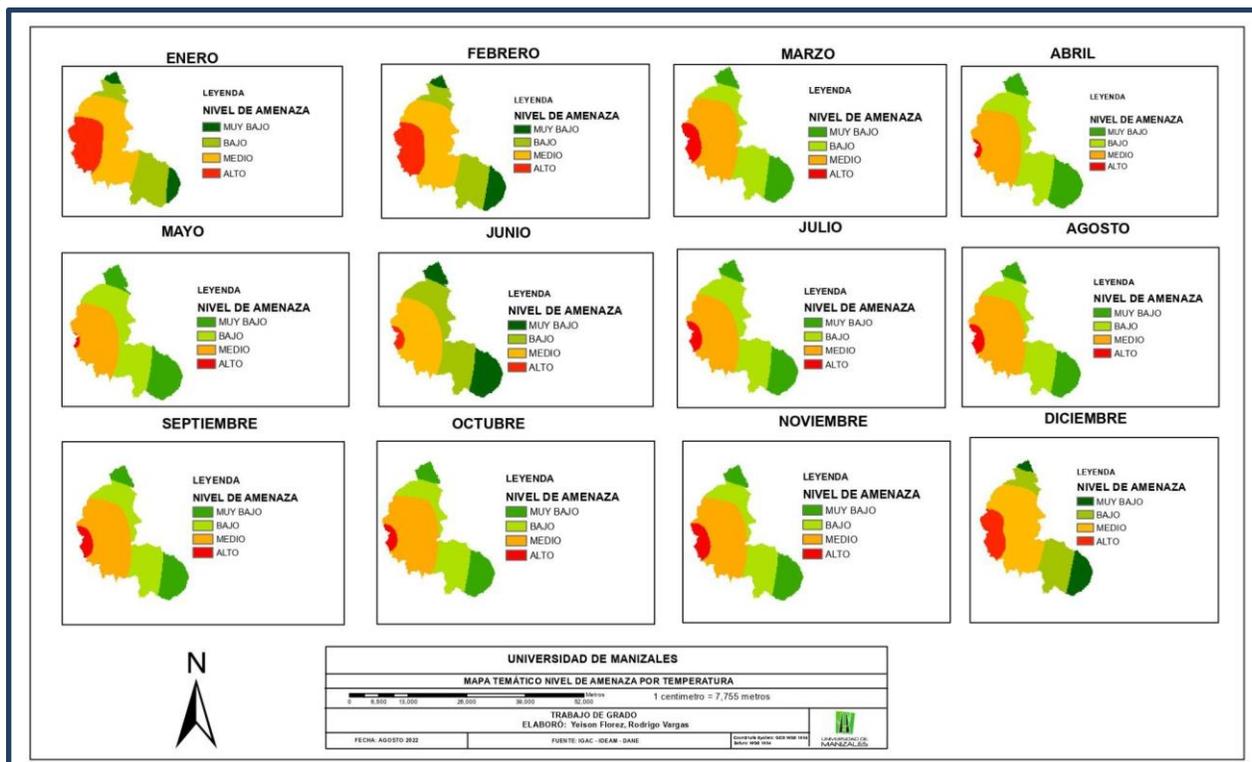
Se evidencio un rango de valores para la temperatura partiendo desde el valor mínimo de 3.253005743°C hasta el valor máximo de 18.32387733 °C correspondientes a los meses de enero y mayo respectivamente. A partir del método utilizado de Rangos fijos se obtuvieron 4 clases con un nivel de calificación de amenaza según la variable de 1 hasta 4 según la siguiente tabla.

Tabla 18. Rangos y calificación temperatura

NUEVOS RANGOS		CALIFICACION	
3.25300574	7.02072364	4	ALTA
7.02072364	10.7884415	3	MEDIA
10.7884415	14.5561594	2	BAJA
14.5561594	18.3238773	1	MUY BAJA

Según los rangos calculados y con la aplicación del comando Reclass de Arcmap se clasificaron las capas correspondientes a cada mes dando como resultado las siguientes salidas.

Figura 38. Mapas Temperatura reclasificado



Se puede observar la presencia de las 4 calificaciones de amenaza para la variable temperatura durante los 12 meses del año, predominando la calificación 3, seguidamente de la calificación 2 correspondientes a amenaza Media y Baja respectivamente, en la zona del municipio de Silos, parte de Mutiscua, Cacota y Chitaga se evidencia un aumento representativo de la cobertura de la calificación 4 amenaza Alta, en los meses de Enero, Febrero y Diciembre, así mismo en el municipio de Pamplona el nivel de amenaza aumenta de Bajo a Medio para estos mismos meses.

Resultados muy acordes a lo descrito por las encuestas y los resultados de los meses en los que se ven las mayores afectaciones por Heladas en la provincia.

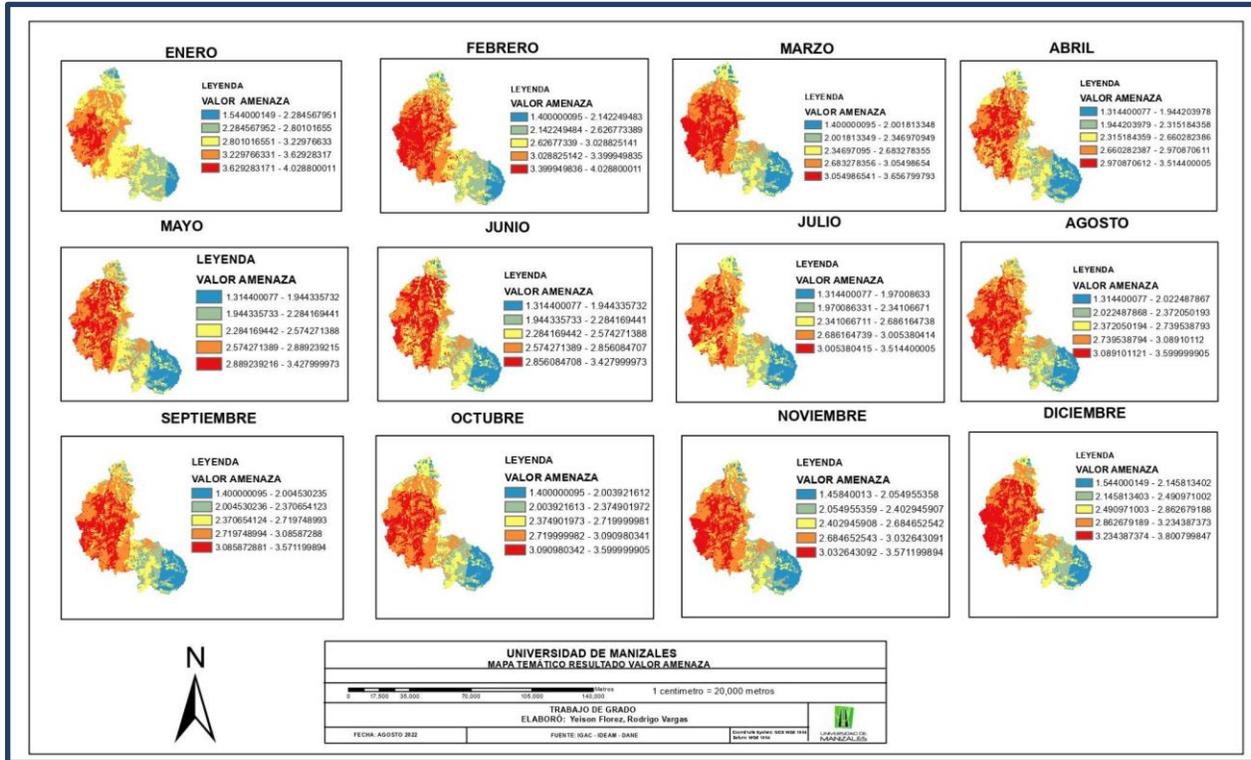
7.6 Zonificación de la amenaza a Heladas

Una vez obtenidos todos los insumos descritos en el numeral anterior y la fórmula para el cálculo de la amenaza relacionada en el numeral 7.3

$$\begin{aligned} \text{AMENAZA} = & \text{Susceptibilidad de la vegetación} * (0.2) + \text{Temperatura} * (0.2856) + \text{Nubosidad} * \\ & (0.144) + \text{Humedad relativa} * (0.0856) + \text{Velocidad del viento} * (0.0568) + \text{Pendiente} * (0.0568) \\ & + \text{Altura} * (0.1712) \end{aligned}$$

Se utilizó la herramienta de Map Algebra _ Raster Calculator del Software Arc map para aplicar la fórmula para cada uno de los meses del año, obteniendo la Amenaza resultante descrita en la siguiente figura.

Figura 39. Resultado Amenaza Algebra de Mapas



Se obtuvieron valores entre 1 y 4.2 siendo necesario Clasificar estos valores en 4 niveles de amenaza con el fin de facilitar su análisis y parametrizar el método aplicado para ello se utilizó nuevamente el método de Rangos fijos a través de la distribución de una frecuencia constante calculada.

Tabla 19. Rangos y calificación Amenaza

RANGO		CALIFICACION	
1	1.8	1	MUY BAJA
1.8	2.6	2	BAJA
2.6	3.4	3	MEDIA
3.4	4.2	4	ALTA

A partir de las nuevas clases calculadas se reclasificaron los resultados del Algebra de mapas de la figura 39 dando como resultado la salida final y la zonificación definitiva de la amenaza a Heladas en la provincia de Pamplona para cada uno de los meses del año.

Figura 40. Amenaza Mensual Provincia de Pamplona

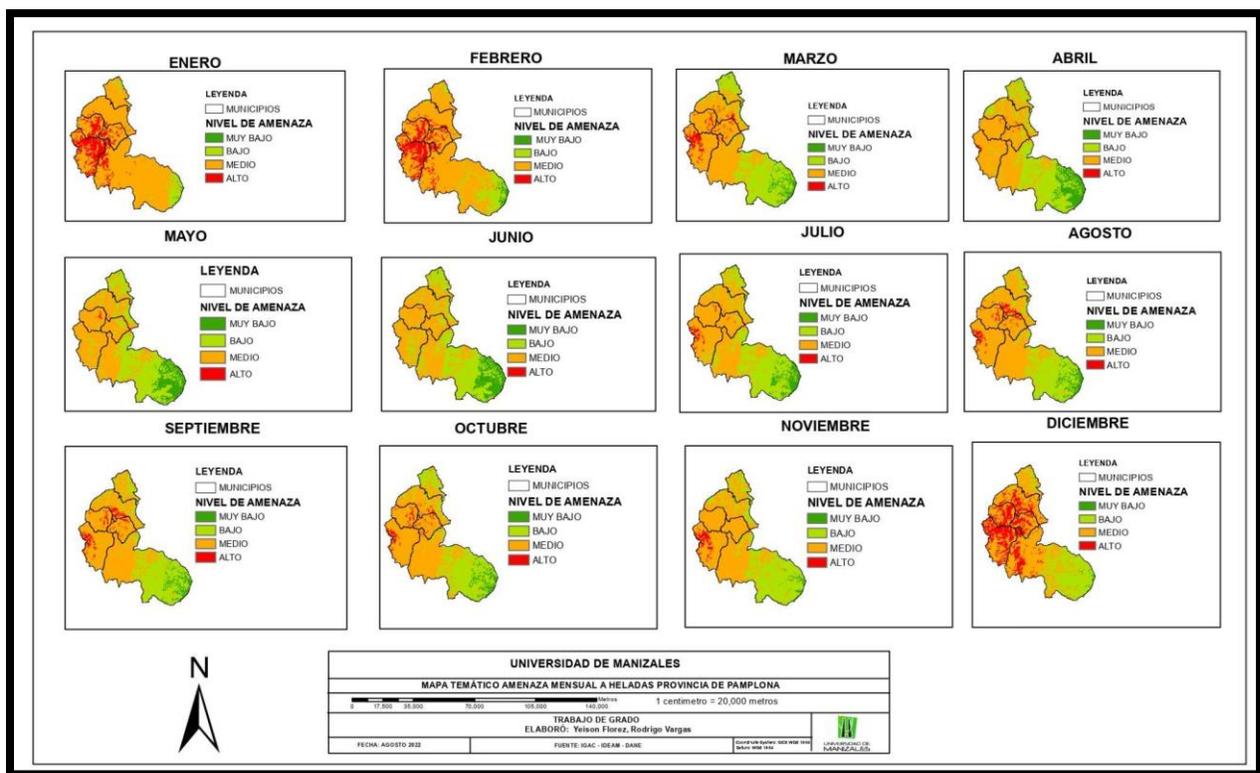


Tabla 20. Nivel de Amenaza mensual porcentual

ENERO				JULIO			
Calificacion	Nivel Amenaza	Area	Porcentaje	Calificacion	Nivel Amenaza	Area	Porcentaje
1	Muy baja	6265705.02	0.3%	1	Muy baja	119902118	5.4%
2	Baja	121966842	15.5%	2	Baja	823229092	37.0%
3	Media	1801428812	81.0%	3	Media	1254565695	56.4%
4	Alta	295589962	13.3%	4	Alta	26744607.2	1.2%
FEBRERO				AGOSTO			
Calificacion	Nivel Amenaza	Area	PORCENTAJE	Calificacion	Nivel Amenaza	Area	Porcentaje
1	Muy baja	31950769.2	1.4%	1	Muy baja	82690701.3	3.7%
2	Baja	247916829	11.1%	2	Baja	657128111	29.5%
3	Media	1666746476	74.9%	3	Media	1413545455	63.5%
4	Alta	277988459	12.5%	4	Alta	70764325.3	3.2%
MARZO				SEPTIEMBRE			
Calificacion	Nivel Amenaza	Area	Porcentaje	Calificacion	Nivel Amenaza	Area	Porcentaje
1	Muy baja	80095491.4	3.6%	1	Muy baja	78980145.8	3.5%
2	Baja	766637096	34.5%	2	Baja	702182703	31.6%
3	Media	1292058471	58.1%	3	Media	1370922521	61.6%
4	Alta	84754282.2	3.8%	4	Alta	71629966.6	3.2%
ABRIL				OCTUBRE			
Calificacion	Nivel Amenaza	Area	Porcentaje	Calificacion	Nivel Amenaza	Area	Porcentaje
1	Muy baja	200657185	9.0%	1	Muy baja	77088329.2	3.5%
2	Baja	810684533	36.4%	2	Baja	721541597	32.4%
3	Media	1205720027	54.2%	3	Media	1375013245	61.8%
4	Alta	7724808.61	0.3%	4	Alta	50322021.2	2.3%
MAYO				NOVIEMBRE			
Calificacion	Nivel Amenaza	Area	Porcentaje	Calificacion	Nivel Amenaza	Area	PORCENTAJE
1	Muy baja	211023154	9.5%	1	Muy baja	25635642.2	1.2%
2	Baja	827879419	37.2%	2	Baja	796012183	35.8%
3	Media	1181593346	53.1%	3	Media	1352843376	60.8%
4	Alta	4054740.77	0.2%	4	Alta	49654279	2.2%
JUNIO				DICIEMBRE			
Calificacion	Nivel Amenaza	Area	Porcentaje	Calificacion	Nivel Amenaza	Area	Porcentaje
1	Muy baja	212894399	9.6%	1	Muy baja	8830840	0.4%
2	Baja	838368580	37.7%	2	Baja	527126000	23.7%
3	Media	1171848374	52.7%	3	Media	1257350000	56.5%
4	Alta	980334.264	0.0%	4	Alta	431319000	19.4%

Como se observa en la figura 40 y se evidencia en los datos expuestos en la tabla 13 el nivel de amenaza muy bajo tiene presencia estable dentro del área de estudio a lo largo del año teniendo un valor mínimo de 0.3% correspondiente al mes de Enero y un valor máximo de 9.6 % correspondiente al mes de Junio, estos valores se presentan principalmente en las zonas donde se consideró no hay coberturas que puedan ser afectadas cuantiosamente por las heladas como lo son los bosques densos o las zonas urbanas y que sus condiciones de relieve y meteorológicas no sean tan extremas. Como lo es el límite sur de Chitaga y la parte central del municipio de Pamplonita. El nivel de amenaza bajo tiene un espectro más amplio partiendo desde su valor mínimo de 5.5% hasta su valor más alto de 37.7 % para los meses de Enero Y Junio respectivamente, corresponden principalmente a zonas de los municipios de Chitaga y Pamplonita con alturas por debajo de los 1500 m.s.n.m razón por la que su nivel de amenaza es bajo, predomina el nivel de Amenaza Medio para los 12 meses del año, obteniendo los valores más altos para todo el año cubriendo desde el 52.7 % hasta el 81 % de la zona, el valor mínimo para este nivel de amenaza corresponde al mes de Junio y recae espacialmente sobre los municipios de Silos, Mutiscua, Cacota, Pamplona y una pequeña Parte de Chitaga y Pamplonita, el valor máximo que toma este nivel de amenaza corresponde al mes de enero y recae espacialmente sobre todos los municipios de la provincia. Finalmente el nivel de amenaza alto cuyos valores se encuentran entre 0% y 19.4% para los meses de Junio y Diciembre Respectivamente, se puede observar un comportamiento estable en gran parte de los meses del año con valores muy bajos y cercanos a 0 % sin embargo se evidencia un aumento significativo en los meses de Enero, Febrero y Diciembre superando el 10% y concentrándose principalmente en las zonas altas de los municipios de Pamplona, Chitaga y Cacota y cubriendo gran porcentaje de los municipios de Silos y Mutiscua. Según lo anterior se

puede clasificar el año en dos temporadas principalmente: libre de heladas los meses de marzo, Abril, Mayo, Junio, Julio, Agosto, Septiembre, Octubre, Noviembre y con Amenaza alta a Heladas los meses de Diciembre, Enero y Febrero. El resultado obtenido por el método planteado tiene una gran similitud con los resultados obtenidos por las respuestas de los encuestados.

8. Conclusiones

A partir de la revisión bibliográfica se lograron identificar las variables de influencia del fenómeno de las heladas, los cuales según los autores consultados han tenido mayor incidencia en el modelado de las heladas; se determinó que la temperatura, la nubosidad, la altura sobre el nivel del mar son las variables más importantes dentro del análisis de las heladas, así mismo la humedad relativa, la pendiente y la velocidad del viento tiene influencia dentro del fenómeno siendo menos determinantes que las mencionadas inicialmente, así mismo esto se confirmó con los resultados obtenidos a través del panel de expertos quienes identificaron la temperatura como la variable más importante a tener en cuenta en las heladas.

En base al presente estudio y los resultados obtenidos se plantea una propuesta metodológica para el cálculo de amenaza ante heladas, según la investigación realizada se logró establecer la ponderación de la influencia que tiene cada una de las variables estudiadas dentro del fenómeno; así mismo se validaron los resultados del modelo planteado con las experiencias vividas por los actores directamente afectados teniendo resultados acordes en cuanto a los meses más afectados por las heladas y a las zonas que históricamente se han visto afectadas por las mismas, por lo que se evidencia la optimidad del modelo para el cálculo de amenaza en la zona.

La provincia de Pamplona presenta un comportamiento monomodal en cuanto a la ocurrencia de las heladas, identificándose el mayor valor de amenaza ante la ocurrencia del fenómeno en el periodo comprendido entre los meses de Diciembre, Enero, Febrero y un periodo normalmente libre de heladas en los meses comprendidos entre Marzo y Noviembre, así mismo se ubicó espacialmente el nivel de amenaza de los tres meses con mayor impacto dando como resultado que los municipios de Silos y Mutiscua son los más afectados en cuanto a porcentaje de área total, sin

embargo las zonas de los municipios de Pamplona, Chitaga y Cacota con características de altura sobre el nivel del mar elevada y poca pendiente también presentan un alto nivel de amenaza en el periodo mencionado.

Cómo se pudo evidenciar en los resultados expuestos existe un periodo con alto grado de amenaza a la ocurrencia de una helada comprendido por los meses de diciembre, enero y febrero a partir de esta información se plantean las siguientes recomendaciones a tener en cuenta especialmente en el periodo mencionado:

evitar la labranza dentro del periodo con alto grado de amenaza a heladas ya que esto permite que la pérdida de temperatura del suelo durante horas de la noche sea la menor posible.

aplicar prácticas de riego como la micro aspersión o sistemas de riego dirigido que permitan crear una capa sobre el cultivo con el fin de simular un microclima dentro del mismo evitando la pérdida de temperatura y generando una barrera que protege del daño vegetal al cultivo.

seleccionar especies vegetales con mayor resistencia a fenómenos de bajas temperaturas, así mismo programar los procesos de siembra con el objetivo de que las etapas de crecimiento y establecimiento final de la planta sea lo más alejado posible al periodo de amenaza alta.

9. Recomendaciones

la información es un factor fundamental para la investigación climática en cualquier fenómeno estudiado, por eso se recomienda el mejoramiento en la red de estaciones meteorológicas por parte de las entidades competentes, que en el caso de Colombia es el IDEAM, así mismo mejorar el acceso a los datos tomados por las estaciones existentes.

Con el objetivo de seguir validando la metodología propuesta se recomienda la aplicación de esta en zonas con mayor acceso a información y con registros y antecedentes de la presencia del fenómeno.

si bien la presente investigación se realizó con base a los promedios diarios para cada una de las variables meteorológicas se recomienda la aplicación de la metodología planteada analizando comportamientos horarios especialmente en horas de la noche y madrugada para los meses identificados con mayor grado de amenaza, esto con el fin de identificar la temporalidad y los patrones de comportamiento del fenómeno dentro de dicho periodo.

10. Referencias

- Alcántara Carrió, J. (2008). LOS RIESGOS NATURALES EN EL LITORAL: LA AMENAZA CRECIENTE. *Lección magistral leída en el solemne acto de apertura del curso académico.*
- Artunduaga, R. (1982). PRINCIPIOS BASICOS DE OCURRENCIA DE HELADAS Y SU CONTROL. *ICA BOLETIN TECNICO 97, 1.*
- Bojorquez, A. (2021). *A landscape assessment of frost damage in the northmost Neotropical dry forest.* obregon: Agricultural and Forest Meteorology.
- C. François, R. B. (1999). *Frost risk mapping derived from satellite and surface data over the Bolivian Altiplano.* Agricultural and Forest Meteorology,.
- CAR, C. A. (2020). *INFORME DEL REGISTRO E IMPACTOS DE HELADAS EN EL TERRITORIO CAR DURANTE ENERO 2020.* Bogota, Colombia.
- Ding, L. (2019). *Frost Forecast using Machine Learning ³/₄ from association to causality.*
meiji: 23rd International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering systems.
- Ding, L. (2020). *Modelling and learning cause-effect – application in frost forecast.*
meiji: 24th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering systems.

-
- Diniz, E. S. (2021). *Forecasting frost risk in forest plantations by the combination of spatial data and machine learning algorithms* . Belem: Agricultural and Forest Meteorology.
- ESRI. (13 de 04 de 2022). *ESRI*. Obtenido de ESRI:
<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>
- Fuentes, M. (2018). *Application of artificial neural networks to frost detection in central Chile using the next day minimum air temperature forecast*. chillan: CHILEAN JOURNAL OF AGRICULTURAL RESEARCH 78(3) JULY-SEPTEMBER 2018.
- Giovanni Sgubin, D. S.-A. (2018). *The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate*. Agricultural and Forest Meteorology.
- Giraldo, R. (2002). *INTRODUCCION A LA GEOESTADISTICA* . BOGOTA.
- Gobbett, D. L. (2021). *Minimum temperature mapping augments Australian grain farmers' knowledge of frost* . urrbrae: Agricultural and Forest Meteorology.
- IDEAM. (2011). *PROTOCOLO PARA LA REALIZACIÓN DE MAPAS DE ZONIFICACIÓN DE RIESGOS A INCENDIOS DE LA COBERTURA VEGETAL*. BOGOTA.

IDEAM. (2012). *ACTUALIZACION NOTA TECNICA HELADAS 2012*. bogota.

Kotikot, S. M. (2021). *Statistical characterization of frost zones: Case of tea freeze damage in the Kenyan highlands*. Huntsville: Int J Appl Earth Obs Geoinformation .

La Opinion. (8 de enero de 2020). Heladas afectan cultivos en Norte de Santander. *La Opinion* , pág. 1.

LA OPINION. (17 de 1 de 2022). Heladas han dejado pérdidas por \$1.500 millones. *LA OPINION*, pág. 1.

Lillesand, T., & Kiefer, R. (1994). *remote sensing and image interpretation* . toronto.

Mahmoudi, P. (2015). *Mapping Statistical Characteristics of Frosts in Iran*. tehran: The 1st ISPRS International Conference on Geospatial Information Research, 15–17 November 2014, Tehran, Iran.

Mancebo Quintana, S., Ortega Perez, E., Valentin Cirado, A., MArtin Ramos, B., & Martin Fernandez, L. (2008). *aprendiento a manejar los SIG en la gestión ambiental*. Madrid, España.

Martori, J. C., & Hoberg, K. (2007). INMIGRANTE, NUEVAS TÉCNICAS DE ESTADÍSTICA ESPACIAL PARA LA DETECCIÓN DE CLUSTERS RESIDENCIALES DE POBLACIÓN. *Scripta Nova*.

-
- Monetealegre, J. E. (2000). *La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña-Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia.*
- Prabha, T. (2008). *Evaluation of the Weather Research and Forecasting model for two frost events.* georgia: computers and electronics in agriculture 64.
- Rojas Vilches, O., & Martínez Reyes, C. (2011). Riesgos naturales: evolución y modelos conceptuales. *Revista Universitaria de Geografía.*
- Rojas, E. O. (2011). *Evaluación del desarrollo del cultivo de papa bajo escenarios de variabilidad climática interanual y cambio climático, en el sur oeste de la Sabana de Bogotá.*
- Sullca Flores, A. O. (2020). *Zonificación de peligro por temperaturas mínimas extremas mediante geoprocésamiento en la Cuenca Illpa en la región Puno – 2020.* juliaca.
- UNGDR. (25 de 03 de 2022). *Unidad Nacional para la Gestión.* Obtenido de <http://gestiondelriesgo.gov.co/snigrd/pagina.aspx?id=141>
- UNGRD. (2017). terminología sobre gestión del riesgo y fenómenos amenazantes.

Yann Vitasse, L. S. (2018). *Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades.*

Agricultural and Forest Meteorology.

Zhao, L. (2020). *Normalized NDVI valley area index (NNVAI)-based framework for quantitative and timely monitoring of winter wheat frost damage on the*

Huang-Huai-Hai Plain, China. Beijing: Agriculture, Ecosystems and Environment.

Anexos

