# FORMULACIÓN DE UN MÉTODO DE CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA POR MEDIO DEL USO DE LÓGICA DIFUSA EN COLOMBIA

JHOAN MANUEL LONDOÑO ROJAS Estudiante Ingeniería Ambiental HEIMER DARÍO LÓPEZ MINA Estudiante Ingeniería Ambiental

UNIDAD CENTRAL DEL VALLE DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL
TULUÁ
2021



# FORMULACIÓN DE UN MÉTODO DE CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA POR MEDIO DEL USO DE LÓGICA DIFUSA EN COLOMBIA

JHOAN MANUEL LONDOÑO ROJAS Estudiante Ingeniería Ambiental HEIMER DARÍO LÓPEZ MINA Estudiante Ingeniería Ambiental

Trabajo de grado para optar al título de: INGENIERO AMBIENTAL

Director:
JUAN GUILLERMO POPAYÁN HERNÁNDEZ
Ingeniero Ambiental. B, Sc, M. Sc, PhD

UNIDAD CENTRAL DEL VALLE DEL CAUCA FACULTAD DE INGENIERÍA INGENIERÍA AMBIENTAL TULUÁ 2021



Nota de aceptación		
_		_
-		_
-		_
- -		_
_		
	Firma del presidente del jurado	
_		
	Firma del jurado	
_	Firma del jurado	_
Tuluá (Valle del Cauca). Fecha. (día, mes,	año)	



## **DEDICATORIA**

"Dedicado a mi madre, a	a mi padre y a toda	mi familia por si	u paciencia y apoyo	incondicional
durante esta etapa de mi vid	da"			

Jhoan Manuel

"Dedicado principalmente a mis padres, familiares, y amigos que siempre me han brindado su apoyo incondicional, por la completa confiabilidad en mis capacidades y sus constantes oraciones que han venido bendiciendo cada paso en mi proyecto de vida"

Heimer Darío



#### **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero agradecer a mi profesor, Ingeniero. Juan Guillermo Popayán Hernández, quien con sus conocimientos y apoyo me guio a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba.

También quiero agradecer a mis profesores de la Academia Militar Carlos Julio Gil Colorado por brindarme todos los conocimientos y herramientas para escoger esta carrera en especial el profesor José Mauricio Ahumada González quien siempre creyó en mí y en mi conocimiento. No hubiese podido arribar a estos resultados de no haber sido por su incondicional ayuda.

Por último, quiero agradecer a todo el equipo administrativo y docente de la UCEVA por facilitar el buen desarrollo del proceso educativo y a mi familia, por apoyarme aun cuando mis ánimos decaían. En especial, quiero hacer mención de mis padres, Hector Fabio y Mayely y mi tía Diana Lorena, los que siempre estuvieron ahí para darme palabras de apoyo.

Muchas gracias a todos.

Jhoan Manuel

Inicialmente, quiero agradecerle a Dios que siempre me fortaleció para no decaer en esas situaciones difíciles que me generaron inestabilidad emocional, y por sus bendiciones que han convertido mis esfuerzos en logros. Agradecido enormemente con el profesor e ingeniero Juan Guillermo Popayán Hernández, por sus constantes aportes y seguimiento en cada etapa de este proyecto para un alcance exitoso.

En segundo lugar, quiero agradecerles a mis padres por brindarme la oportunidad de avanzar en esta importante etapa de mi vida confiando plenamente en mis capacidades para sacarle el mayor provecho, a mis familiares, al profesor Andrés Mauricio Caicedo por el gran apoyo, y en especial, a los docentes de la I.E Santa Cecilia por mis conocimientos básicos adquiridos para elegir cualquier carrera profesional.

También, quiero agradecerle al señor Durley Ortiz y su esposa Claudia Rendón quienes me brindaron su apoyo incondicional al llegar por primera vez al Municipio de Buga, y que a pesar de ser una persona desconocida para ellos me recibieron como un miembro más de su familia bajo ningún interés económico, y un agradecimiento especial al Ingeniero Andrés Felipe Castiblanco por orientarme con sus conocimientos cada vez que lo solicité.

Por último, quiero agradecerle a todos los directivos docentes y docentes de la UCEVA por la notable entrega y dedicación para educarnos de la mejor manera posible como profesionales éticos con amplios conocimientos. En especial, le agradezco al profesor e ingeniero German Cobo Mejía, por brindarme su apoyo cuando lo necesité, por sus buenas recomendaciones y su continua disposición a nuestras consultas.

Infinitas gracias a todos ustedes.

Heimer Darío



# TABLA DE CONTENIDO

1. GLOSARIO	12
2. RESUMEN	14
3. ABSTRACT	15
4. INTRODUCCIÓN	16
5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
5.1 Antecedentes	18
5.1.1 Internacional	18
5.1.2 Nacional	19
5.2 Lógica difusa	25
5.3 Formulación del problema	27
6. JUSTIFICACIÓN	29
7. OBJETIVOS	32
7.1. Objetivo general	32
7.2. Objetivo específico	32
8. MARCO REFERENCIAL	33
8.1 Marco teórico	33
8.1.1 El clima	33
8.1.2 Clasificación climática	35
8.1.3 Lógica difusa.	50



8.2	Marco conceptual	54
8.3	Marco legal	56
9. N	METODOLOGÍA	59
9.1	Área de estudio	59
9.2	Estructura de Mamdani	61
9.3	Recolección de datos	63
9.4	organización de datos	64
9.5	Análisis de datos por lógica difusa	64
9.5	5.1 Normalización y fusión de datos	65
9.5	5.2 Análisis de salida difusa	66
9.5	5.3 Creación de mapas	66
10. F	POSIBLES COLABORADORES	68
11. F	RECURSOS DISPONIBLES	69
12. F	RESULTADOS	71
12.1	Índice climático de Lang para Colombia	71
12.2	Rango de caracterización de salida difusa	79
12.3	Funciones de pertenencia	80
12.4	Resultados difusos	83
12.5	Prueba t Student para muestras pareadas	92
13. (	CONCLUSIONES	94



14.	RECOMENDACIONES	95
REF	TERENCIAS	96



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Colombia según la clasificación climática de CaldasLang	22
Figura 2. Mapa de Colombia según la clasificación climática de Holdridge	. 24
Figura 3. Lógica difusa frente a la lógica clásica en el ejemplo de Lofti A. Zadeh	. 26
Figura 4. Clasificación climática de Köppen para Colombia 1981–2010	. 38
Figura 5. Clasificación climática de Thornthwaite en Colombia, 2010	. 45
Figura 6. Clasificación climática de Caldas – Lang para Colombia, 2014	.49
Figura 7. Estructura interna de un controlador difuso	. 52
Figura 8. Área de estudio	.60
Figura 9. Estructura de Mamdani para lógica difusa	.61
Figura 10. Estructura de Mamdani usada para el sistema de clasificación climática	. 62
Figura 11. Mapa del Índice de Lang obtenido según análisis de datos satelitales	.78
Figura 12. Pesos asignados a cada parámetro índice biológico según estructura de Mamdani	.83
Figura 13. Pesos asignados a cada parámetro del índice físico según estructura de Mamdani	.84
Figura 14. Pesos asignados a cada parámetro del índice químico según estructura de Mamdani	.84
Figura 15. Pesos asignados a cada índice según estructura de Mamdani	. 84
Figura 16. Mapa del índice difuso obtenido según análisis por lógica difusa	.91



# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sistema de clasificación de Caldas
Tabla 2. Sistema de clasificación de Lang por medio del índice de precipitación y temperatura. 20
Tabla 3. Tipos de climas según el sistema de clasificación de Caldas Lang
Tabla 4. Climas de Colombia en relación a la zona que representa34
Tabla 5. Pisos térmicos en Colombia
Tabla 6. Distribución climática general según Köppen
Tabla 7. Distribución climática según Köppen en Colombia
Tabla 8. Rangos para definir el tipo de clima según la humedad
Tabla 9. Rangos de la variación estacional de la humedad
Tabla 10. Rangos para definir la evapotranspiración potencial o eficacia térmica42
Tabla 11. Tipos de concentración estival
Tabla 12. Tipos de clima según índice de humedad
Tabla 13. Tipos de clima según el método de Caldas – Lang
Tabla 14. Climas existentes en Colombia según Caldas-Lang
Tabla 15. Facetas de la lógica difusa
Tabla 16. Recursos humanos
Tabla 17. Recursos financieros
Tabla 18. Rangos para clasificación del clima según el Índice de Lang72
Tabla 19. Resultado del cálculo del Índice de Lang
Tabla 20. Tabla de rangos de caracterización para datos de salida difusa
Tabla 21. Funciones de pertenencia por cada parámetro y el índice de Lang81



Tabla 22. Comparación de la cantidad de puntos por cada clima entre el índice de Lang y el	
índice difuso	85
Tabla 23. Resultado del cálculo del índice difuso	86
Tabla 24. Resultados de la prueba t Student para muestras empareiadas	92



### 1. GLOSARIO

**ALGORITMOS:** los algoritmos son secuencias de instrucciones que representan un modelo de solución para un determinado tipo de problema o también, como un conjunto de instrucciones que al ser realizadas en orden, conducen a obtener la solución del problema.

**DIFUSO:** difuso es aquello que carece de claridad o precisión o por lo menos se percibe de esta forma. En general, esto ocurre por complejidad, lejanía o por ser extenso.

**EVAPORACIÓN:** la evaporación no es más que el resultado del proceso físico por el cual el agua cambia de estado, precisamente del líquido al gaseoso, retomando de manera directa a la atmósfera en forma de vapor. También lo hace del estado sólido directamente a la atmósfera por medio del fenómeno conocido como sublimación.

**EVAPOTRANSPIRACIÓN:** la evapotranspiración es el resultado del proceso por medio del cual el agua cambia del estado líquido al gaseoso a través de las plantas, volviendo a la atmósfera en forma de vapor.

**EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL:** la evapotranspiración potencial hace referencia a la máxima evapotranspiración posible bajo las condiciones climáticas existentes cuando el suelo está a capacidad de campo y también cubierto de cobertura vegetal.

**HUMEDAD:** la humedad es una propiedad que indica el contenido de vapor de agua en un gas, el cual se define en términos de diferentes magnitudes. Muchas de estas se pueden medir de manera directa y otras se pueden hallar a partir de magnitudes medidas.

MEMBRESÍA: es el grado de pertinencia o rangos establecidos para posteriores análisis.

**PRECIPITACIÓN:** el IDEAM lo define como un fenómeno meteorológico por el cual el vapor de agua se condensa en el aire y cae en el suelo en forma de nieve, granizo, rocío y principalmente agua lluvia.



**PRESIÓN:** la presión es una magnitud física escalar que indica proyecciones de fuerza ejercida de manera perpendicular sobre una superficie, por unidad de superficie.

**PRECISIÓN:** la precisión es el reflejo cualitativo del grado con que la exactitud satisface las exigencias de rigor de una medición.

RADIACIÓN SOLAR: la radiación solar es la energía del sol que llega a la tierra con una determinada longitud de onda. Esta radiación tiene tres componentes: 1) radiación directa; procedente en línea recta desde el sol, 2) radiación difusa; procedente de todas las direcciones y 3) albedo; radiación reflejada por la superficie terrestre. Evidentemente, varía de manera geográfica según las condiciones climáticas

**TEMPERATURA:** el concepto de temperatura deriva del objetivo de medir el grado de caliente o frío relativo y del hecho de que las variaciones de calor sobre un cuerpo generan una variación de su temperatura, mientras no se produzca la fusión o ebullición.

**VIENTO:** el IDEAM lo define como el movimiento del aire ocasionado por el calentamiento diferencial de la superficie terrestre y la atmósfera, que tiene variaciones importantes en el tiempo y en el espacio.

**VEGETACIÓN:** la vegetación se refiere a ciertos aspectos cuantitativos de la arquitectura vegetal, es decir su distribución vertical y horizontal sobre la superficie.



#### 2. RESUMEN

La clasificación de climas ha sido una herramienta fundamental para predecir el comportamiento climático, analizar la adaptación de un determinado cultivo y proyectos de infraestructura en diferentes regiones del mundo. En relación, el objetivo de este proyecto fue formular un método de clasificación climática por medio del uso de la lógica difusa incluyendo otras variables climáticas que también condicionan el clima (factores bióticos, abióticos y químicos) para garantizar mayor precisión en los resultados. Antes de analizar los datos sobre cada uno de los parámetros e indicadores climáticos por medio de la lógica difusa fue necesario ordenarlos de acuerdo a la estructura de Mamdani que los divide en tres secciones; sección de parámetros, sección de indicadores y la salida difusa. Cabe resaltar que los datos fueron recolectados por medio de imágenes satélites obtenidas de la página Giovanni administrada por la NASA y se ordenaron para su uso en el software GeoFis que analizó los datos con un rango comprendido entre 0 y 1, estos datos también fueron analizados bajo el método o índice de Lang para clasificación climática, el cual permitió clasificar los climas en superhúmedo, húmedo, semihúmedo, semiárido, árido y desértico y fueron representados en un mapa al igual que los datos obtenidos por el índice difuso. En general, la lógica difusa resultó ser una herramienta capaz de manejar datos vagos e incompletos dando resultados con sentido lógico, por otro lado, para clasificar con el índice de Lang bastó con considerar los datos de temperatura y precipitación.

Palabras claves: clima, clasificación, lógica difusa, analizar, regiones, factores, datos, precisión.



15

3. ABSTRACT

The climate classification has been a fundamental tool for predicting climate behavior,

analyzing the adaptation of a given crop and infrastructure projects in different regions of the

world. In relation, the purpose of this project was to formulate a climate classification method

through the use of fuzzy logic including other climatic variables that also condition the climate

(biotic, abiotic and chemical factors) to guarantee greater precision in the results. Before analyzing

the data on each of the climatic parameters and indicators through fuzzy logic, it was necessary to

order them according to the Mamdani structure that divides them into three sections; parameters

section, indicators section and the fuzzy output. It should be noted that the data were collected

through satellite images obtained from the Giovanni page managed by NASA and were ordered

for use in the GeoFis software that analyzed the data with a range between 0 and 1, these data were

also analyzed under Lang's method or index for climate classification, which allowed to classify

the climates as super-humid, humid, semi-humid, semi-arid, arid and desert and were represented

on a map as well as the data obtained by the fuzzy index. In general, the fuzzy logic tool is a tool

capable of handling vague and incomplete data, giving results with logical sense, on the other

hand, to classify with the Lang index, it was enough to consider the temperature and precipitation

data.

**Keyword:** climate, classification, fuzzy logic, analyze, regions, factors, data, precision.



## 4. INTRODUCCIÓN

En el año 1884 el climatólogo alemán Wladimir Koppen creó la clasificación climática que hasta la actualidad es la más utilizada alrededor del mundo por su generalidad y facilidad de aplicación. Esta clasificación fue revisada también por Rudolf Geiger, en él se describió los diferentes tipos de climas con una serie de letras que indican el comportamiento de las precipitaciones y temperaturas (Meteo Navarra, s.f.). Divide los climas del mundo en cinco (5) grupos principales; templado, continental, tropical, polar y seco. Por otro lado, la lógica difusa fue investigada por primera vez en los años sesenta por el ingeniero Lofti Asker Zadeh mediante la idea de complejidad del sistema, ya que el sistema de la lógica tradicional era considerablemente complejo y muy impreciso debido a la toma de una única decisión sin manejar un rango, a diferencia de la lógica difusa que entró en la ciencia representando el pensamiento humano frente al análisis de datos considerando todos estos aspectos (Leff, 2012).

Todos los métodos de clasificación climática tienen el fin de conocer los diferentes tipos de climas que corresponden a cada región de un determinado lugar en general, diferenciando por medio de siglas el comportamiento del mismo. Cuando se clasifica el clima en una zona se puede tener conocimiento de cómo se comporta éste en el lugar sin tener que percibir de cerca el estado de éste. En este estudio se formuló un método para clasificarlo por medio de la lógica difusa que es una herramienta de la inteligencia artificial que tiene la capacidad de analizar datos incompletos, vagos e imprecisos intentando dar soluciones a estos de la misma forma como piensa un ser humano.

El objetivo de este proyecto fue formular un método de clasificación climática por medio del uso de lógica difusa en Colombia, para este fin; (1) se recolectaron datos disponibles de imágenes satelitales sobre parámetros climáticos en la página Giovanni administrada por la NASA, (2) se



organizaron los datos en una plantilla de Excel para ser analizados mediante software de lógica difusa FISPro, GeoFIS y para mayor certeza también se analizaron los datos por medio del índice de Lang y (3) se definió la salida difusa por rangos (entre 0 y 1) para la clasificación climática y los resultados del índice de Lang también se realizó la respectiva clasificación de acuerdo a sus rangos establecidos.

Se pretende que los resultados de este proyecto sirvan de evidencia en el momento de precisar métodos de clasificación climática utilizados hasta la actualidad en el país, teniendo en cuenta que en esta innovación se incluyeron más variables que condicionan el clima, bajo la posibilidad de tener mayor exactitud. Más allá de que por este método se obtienen resultados de forma fácil, rápida y económica manejando datos vagos e incompletos y por ende promueve a la accesibilidad del mismo. Sin embargo, este método de clasificación no podría ser útil para pequeñas regiones debido a la falta de datos o información de todos los indicadores ambientales que se requieren; normalmente los datos que se consiguen con facilidad en un gran lazo tiempo son los de precipitación y temperatura.



#### 5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### **5.1** Antecedentes

#### 5.1.1 Internacional

Actualmente existe una gran cantidad de índices de clasificación climática, algunos más aceptados que otros, debido a su facilidad de uso y relativamente buena precisión, estos se pueden dividir en dos, los modelos de circulación global y los modelos regionales, los primeros normalmente tienen una resolución de grilla entre 100 y 200 km por unidad en la grilla y funcionan perfectamente para tomar decisiones internacionales como estudios de cambio climático, los segundos tienen más detalle en la zonificación de los climas por lo que son usados para la toma de decisiones o estudios a escala Nacional, su resolución puede llegar a unidades de grilla de 50 km o menos y se alimentan con datos especialmente relacionados con las condiciones del entorno (MeteoSim, 2020), pero ninguno toma en cuenta la totalidad de indicadores que condicionan la atmósfera los cuales se dividen principalmente en tres grupos que son bióticos, abióticos y físicos (Strahler & Strahler, 1994) a lo que se puede sumar un índice químico (Lozano, 2018) debido a los cambios químicos generados en la atmósfera por la acción humana (Knutson, Kossin, Mears, Perwitz, & Wehner, 2017) el cual no es considerado en ningún sistema de clasificación, entre los cuales se puede encontrar:

 Sistema de clasificación de Köppen: Es un sistema sencillo que usa valores medios mensuales y anuales de temperatura y precipitación para clasificar los grupos y subgrupos, con este sistema se clasifican los climas del mundo en cinco grupos siendo este la primera



letra mayúscula, seguido de la subclasificación de estos en subgrupos que a su vez lo hacen en tipos (Köppen, 1948).

Actualmente existen modificaciones hechas en base al sistema de clasificación de Köppen que ayudan a encajar los diferentes tipos y subtipos de clima en países con mayor diversidad de climas y a una mayor resolución (García E., 1964).

- Sistema de clasificación de Warren Thornthwaite: Es un sistema que refleja el estado de humedad del suelo por lo que se necesitan de cuatro índices para su clasificación, el índice de humedad, la variación estacional, la eficiencia térmica y la concentración de la eficacia térmica durante el verano (Thornthwaite, 1948), este sistema actualmente se emplea especialmente para la toma de decisiones en cuanto a la agricultura y los ciclos de siembra y cosecha teniendo en cuenta que presenta mayores detalles que el método de Köppen (dos Santos, Lima, & Leal, 2018).
- Sistema de clasificación de Rivas-Martínez (Worldwide bioclimatic Classification System): Este sistema se basa en la relación de los datos del clima y la distribución de especies vegetales representativos de cada clima, teniendo en cuenta las especies con distribución climática estrecha y en el caso de datos climáticos, este se basa en los promedios mensuales de precipitación y temperaturas máximas y mínimas (Hernández, Ordoñez, & Giménez de Azcárate, 2018).

#### 5.1.2 Nacional

En Colombia los índices más usados son el de Köppen, Thornthwaite, Caldas-Lang, Martonne y el de Holdridge, siendo el de Caldas-Lang la conjunción de los índices de clasificación de Francisco José de Caldas (1802) que clasifica los climas en 6 como se puede ver en la tabla 1 y



Richard Lang (1915) el cual también logra 6 tipos de clima como se puede ver en la tabla 2, hecha por el geólogo suizo Paul Schaufelberguer en 1962 obteniendo 25 tipos de clima en los cuales se usan factores climáticos de temperatura y humedad (IDEAM, 2015), esto debido a que ninguno de los índices de clasificación tienen aplicabilidad aceptable, ya que el Sistema de Caldas toma en cuenta la temperatura con respecto a la altitud dejando de lado la información latitudinal, y el sistema de Lang se basa en un simple índice que relaciona la precipitación y la temperatura (Castañeda, 2014).

**Tabla 1.**Sistema de clasificación de Caldas

PISO TÉRMICO	RANGO ELEVACIÓN	RANGO TEMPERATURAS
CÁLIDO	0 a 800	T>=24°C
TEMPLADO	800 a 1800	24°C>T>18°C
FRÍO	1800 a 2800	18°C>T>12°C
MUY FRÍO	2800 a 3700	12°C>T>6°C
EXTREMADAMENTE FRÍO	3700 a 4700	6°C>T>0°C
NIVAL	>4700	T<0°C

Nota: Extraído de las bases de datos del clima del IDEAM.

**Tabla 2.**Sistema de clasificación de Lang por medio del índice de precipitación y temperatura

FACTOR HUMEDAD	FACTOR DE LANG (P/T)
DESÉRTICO	0 A 20
ÁRIDO	20.1 A 40.0
SEMIÁRIDO	40.1 A 60.1
SEMIHÚMEDO	60.1 A 100
HÚMEDO	100 A 160
SUPERHÚMEDO	>160

Nota: Extraído de las bases de datos del clima del IDEAM.



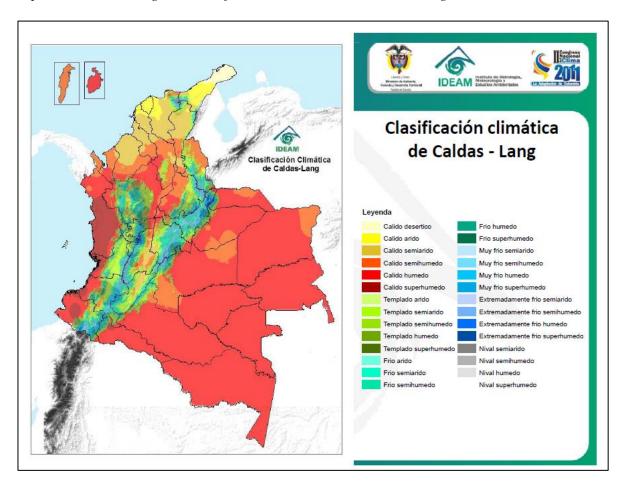
**Tabla 3.**Tipos de climas según el sistema de clasificación de Caldas-Lang

TIPOS DE CLIMA SEGÚN CALDAS – LANG
CÁLIDO SUPERHÚMEDO
CÁLIDO HÚMEDO
CÁLIDO SEMIHÚMEDO
CÁLIDO SEMIÁRIDO
CÁLIDO ÁRIDO
TEMPLADO SUPERHÚMEDO
TEMPLADO HÚMEDO
TEMPLADO SEMIHÚMEDO
TEMPLADO SEMIÁRIDO
TEMPLADO ÁRIDO
FRÍO SUPERHÚMEDO
FRÍO HÚMEDO
FRÍO SEMIHÚMEDO
FRÍO SEMIÁRIDO
FRÍO ÁRIDO
MUY FRÍO BAJO SUPERHÚMEDO
MUY FRÍO BAJO HÚMEDO
MUY FRÍO BAJO SEMIHÚMEDO
MUY FRÍO BAJO SEMIÁRIDO
MUY FRÍO BAJO ÁRIDO
EXTREMADAMENTE FRÍO SUPERHÚMEDO
EXTREMADAMENTE FRÍO HÚMEDO
EXTREMADAMENTE FRÍO SEMIHÚMEDO
EXTREMADAMENTE FRÍO SEMIÁRIDO
EXTREMADAMENTE FRÍO ÁRIDO
NIVAL SUPERHÚMEDO
NIVAL HÚMEDO
NIVAL SEMIHÚMEDO
NIVAL SEMIÁRIDO
NIVAL ÁRIDO

Nota: Extraído de las bases de datos del clima del IDEAM.



**Figura 1.**Mapa de Colombia según la clasificación climática de Caldas-Lang.



Nota: Extraído de documentos del Grupo de Climatología y Agrometeorología, Subdirección de Meteorología, IDEAM

El sistema de clasificación de Caldas-Lang, es uno de los más usados en Colombia, debido a su facilidad de implementación y que representa la mayoría de los distintos tipos de clima que se pueden encontrar en el país como se puede ver en la tabla 3 y la figura 1, esto sucede debido a la ubicación geográfica de Colombia entre los trópicos, en el cual los elementos climáticos pueden variar en cortas distancias debido a condiciones que no se pueden tener en cuenta por métodos comunes (Castañeda, 2014).



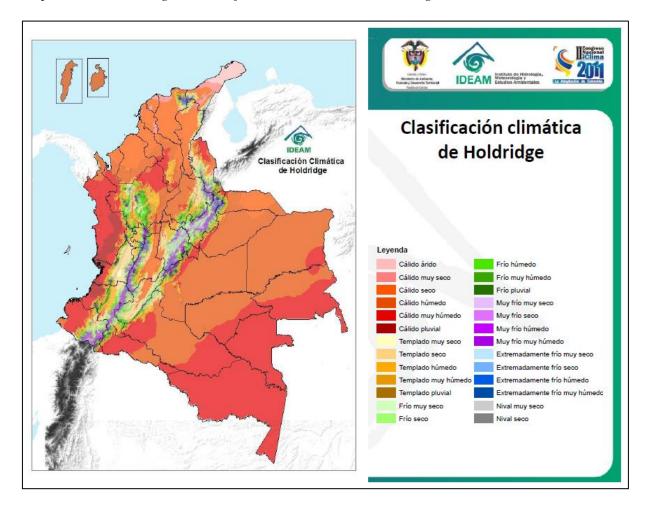
El modelo de Köppen y el de Thornthwaite son también muy empleados en Colombia aun con la poca fiabilidad que confiere el segundo, debido a la reducida variabilidad de la eficiencia térmica entre los trópicos, lo que puede desembocar en una sobredimensión del clima, igualmente ninguno de los dos tiene presente al momento de la evaluación de los datos el factor de distribución de la vegetación, situación que recae principalmente en el modelo original de Köppen utilizado en Colombia que no tiene alguna adecuación o modificación como es el caso del sistema de clasificación de Köppen modificado por García, donde se usan datos de distribución de especies vegetales (García E., 1964), logrando una mayor precisión en la delimitación de los climas.

Otro método utilizado para este tipo de clasificación son las redes neuronales que al igual que la lógica difusa tienen la capacidad de procesar datos (entrada) y generar salidas las cuales se pueden procesar para la solución del problema o la obtención de datos esperados (Rebato, 2020), aunque a diferencia de la lógica difusa, este requiere de una gran cantidad de datos para que realice la identificación de una manera adecuada y en el estudio hecho en Colombia se tomó un área de estudio pequeña siendo esta la cuenca del Río Risaralda, Además, y en semejanza a la lógica difusa la red proporciona por sí misma una salida, un número, que no se puede interpretar directamente (Zurada, 2013).

También se ha usado el método de clasificación de Holdridge como se puede ver en la figura 2, para generar mapas climáticos del país por parte del IDEAM, el Instituto de Investigación Alexander von Humboldt y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi; este sistema se basa en la biotemperatura media anual, precipitación media anual y la relación de evapotranspiración potencial (Yue, 2001), y clasifica los climas en treinta y ocho (38) zonas de vida, los cuales en su mayoría se pueden encontrar semejanzas con zonas de distribución vegetal y animal.



**Figura 2.**Mapa de Colombia según la clasificación climática de Holdridge.



Nota: Extraído de documentos del Grupo de Climatología y Agrometeorología, Subdirección de Meteorología, IDEAM



### 5.2 Lógica difusa

Este método de análisis de datos representa una de las variadas ramas de estudio que comprenden la Inteligencia Artificial, se basa en el análisis de datos incompletos, vagos o imprecisos intentando dar una solución a estos de la misma forma como piensa un ser humano, según esta idea la lógica difusa funciona de manera distinta a la lógica tradicional dándole variabilidad al sistema.

La lógica difusa fue investigada por primera vez en los años sesenta por el ingeniero Lofti Asker Zadeh mediante la idea de complejidad del sistema, afirmando que mientras más complejo sea el sistema menos precisos son los resultados alcanzando en algún punto tal imprecisión que todos los resultados sean excluidos de los requisitos con los cuales se está analizando el sistema, por esta razón, no es posible el uso de la lógica tradicional en el ámbito natural debido a su extrema complejidad la cual no se limita al conocimiento de las relaciones bióticas o abióticas del ecosistema sino de los efectos generados por el cambio o la continuidad de algún parámetro en el aspecto abiótico o físico y la variabilidad de los seres vivos tanto en su finalidad biológica como en la toma de decisiones simples (Leff, 2012), todo esto junto en un gran sistema que cambia constantemente genera una cantidad ingente de datos los cuales no siguen necesariamente un modelo tradicional debido a los cambios bruscos y la sensibilidad de otros factores que tengan relación.

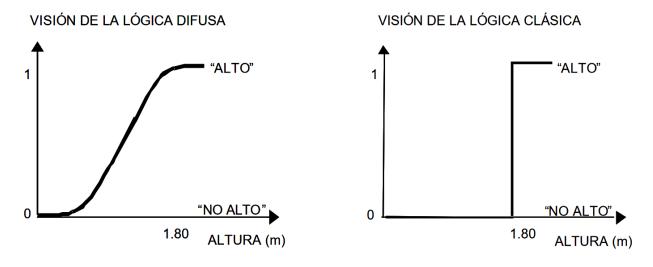
De esta forma la lógica difusa logra su entrada en la ciencia, pudiendo con esta representar el pensamiento humano frente al análisis por medio de etiquetas lingüísticas las cuales pueden aportar en algunas ocasiones más información útil para el razonamiento humano que un número, según logra justificar Lofti Zadeh en su primer ejemplo de ilustración del funcionamiento de la lógica



difusa donde se determina un conjunto llamado "Hombres altos" con la característica "todos los hombres con una estatura igual o mayor a 1.80 m son altos" la cual determina quienes están dentro del conjunto, de esta forma y usando la lógica tradicional una persona de 1.79 m de estatura es considerada "Hombre bajo" solo por estar fuera de las características con una diferencia de 1 cm o menos, en el caso de la lógica difusa, se crearía un conjunto llamado "Hombres altos" el cual no posee una frontera clara para pertenecer o no a él y en cambio la pertenencia o no a esta se daría por una función que define una transición entre "alto" y "bajo" por lo cual se le asigna un valor entre 0 a 1 a cada altura siendo 1 los existentes en o sobre 1.80 m de altura y 0 los más alejados del conjunto de muestra tomado, por lo cual, una persona de 1.79 m de altura puede ser considerado alto con un valor dado de 0.87 y una persona de 1.50 m de altura se considera baja con una valor de 0.1 así como se muestra en la figura 3.

Figura 3.

Lógica difusa frente a la lógica clásica en el ejemplo de Lofti A. Zadeh



Nota: extraído de Raman spectra enhancement with a fuzzy logic approach (Soneira, Perez-Pueyo, & Ruiz-Moreno, 2002)



De esta forma se le puede dar una comprensión a los datos de una manera más acercada al cerebro humano entendiendo que todas las decisiones que toma el ser humano por medio de su razonar se basan en los elementos que se conocen, de igual forma se le da los valores en la lógica difusa acercándose siempre el dato más bajo o más alejado de los requisitos de pertenencia del conjunto al valor de cero por lo que si se añaden más datos alejados a los requisitos el que se tenía anteriormente el valor más bajo cederá este valor por el más bajo que se añadió.

#### 5.3 Formulación del problema

Teniendo en cuenta la amplia variedad de índices de clasificación climática existentes y los limitados datos que son empleados para clasificar las áreas de estudio, se plantea usar la mayor cantidad de variables condicionantes del clima disponibles en los sistemas de información geográfica actuales para ser analizados por medio de la lógica difusa y así mejorar la clasificación del clima dándole complejidad al sistema debido a los atributos de la inteligencia artificial que no se pueden proporcionar por métodos rudimentarios, siendo un atributo único de la lógica difusa su modelo de funcionamiento que tiende a ser semejante a la de los seres humanos, logrando dar distintos resultados con pequeños cambios en los datos ingresados de una gran cantidad de variables, de esta forma se tendrá en cuenta los aspectos físicos, abióticos y químicos que condicionan la atmósfera y con ello el clima, analizándolos por medio de la lógica difusa.

Por lo tanto, sería uno de los pocos hechos hasta el momento en lo que a clasificación de clima e inteligencia artificial se refiere, y el único en términos de lógica difusa para clasificar el clima en Colombia, basado en lo anterior, se plantea la siguiente pregunta:



¿Cómo es posible formular un método de clasificación climática incluyendo otros parámetros que condicionan el clima por medio de la lógica difusa?



## 6. JUSTIFICACIÓN

Las herramientas utilizadas para clasificar el clima son fundamentales cuando se trata de conocer el estado actual del clima y estimar futuros cambios del mismo, esto por medio de diferentes indicadores que condicionan la atmósfera. El método de clasificación aquí descrito tiene la ventaja de considerar indicadores (bióticos, físicos y químicos) que hasta la actualidad no han sido analizados de manera conjunta, esto podría garantizar resultados más precisos. Comparar los datos obtenidos por este método, con respecto a los arrojados por los métodos comúnmente utilizados en Colombia; como el de Koppen, Caldas-Lang y Thornthwaite, puede definir qué tan significativos son los cambios en la clasificación al incluir otras variables climáticas.

Como se mencionó anteriormente, en este método se pretende considerar un conjunto de parámetros que condicionan en clima. Por tal razón, se selecciona la lógica difusa ya que se caracteriza por su extensa aplicabilidad en la concepción de conjuntos, además es muy precisa y permite manejar información vaga (Duarte O. G., 2000). Existen otras herramientas que tienen funciones similares, pero por lo general, arrojan dos resultados para analizar; 0 o 1, la lógica difusa maneja un rango entre 0 y 1 considerando valores intermediados que permiten destacar en este caso diferentes tipos de climas.

Cabe resaltar que la clasificación climática le facilita al ser humano conocer las condiciones que experimenta una región durante todo el año. Un esquema de clasificación puede permitir observar las condiciones futuras usando tan sólo dos o tres variables en la mayoría de casos. Este conocimiento puede resultar muy importante en el momento de seleccionar materiales de construcción para su protección y durabilidad en el caso de proyectos de infraestructura, también se usa para determinar si algún cultivo prosperara o no en esta zona y también saber cuál podría ser el más apto para ese tipo de clima (dos Santos, Lima, & Leal, 2018); Incluso, gracias a la



clasificación climática es posible que las personas con ánimo de turismo se preparen para el clima de la zona objetivo (Science & Information for a Climate-Smart Nation, 2014).

Es evidente que el clima controla de manera directa la ecología, las diferentes especies de plantas y animales nativos que habitan en una zona determinada. Por lo tanto, estos se pueden comportar como indicadores ambientales para clasificar el clima de una región. Debido a que las plantas sólo pueden prosperar en medio de un rango específico de variaciones de humedad, temperatura y en algunos casos de radiación solar, por lo tanto, se estima que esas condiciones estarán presentes si las plantas prosperan en esa zona, lo cual también condiciona la fauna, principalmente la herbívora que tiende a alimentarse de especies específicas (Science & Information for a Climate-Smart Nation, 2014). Comparar rangos pasados, presentes y futuros de los factores bióticos es un método que puede definir clasificaciones cambiantes. Así mismo, se pueden considerar los factores abióticos y componentes físicos ya que tienen una relación directa o incluso indirecta en los condicionantes climáticos.

Es posible que al considerar estos factores también controladores del clima, aumente con cierta significancia los requerimientos de medidas de control frente al impacto que se está ocasionando sobre el medioambiente, y a su vez, puede implicar nuevas medidas de adaptación en la sociedad. Por ejemplo; las zonas costeras e insulares de Colombia son actualmente consideradas como altamente vulnerables a impactos por el cambio climático, este nivel de vulnerabilidad podría extenderse a otras regiones que, de acuerdo a otros factores ambientales incluidos, estiman más zonas del país con similitud en el tipo de clima. Esto significa también más hectáreas con alto potencial de desertificación.

Desde el punto de vista económico, según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para el año 2030, las inundaciones demandarán un valor de capital del orden de 2,2% del PIB. Los



análisis realizados después de una clasificación climática, han permitido incluso, sugerir mejoras en los planes de ordenamiento territorial, además de recomendar modificaciones en los equipos de monitoreo climatológico (Vélez, Orozco, Duque, & Aristizábal, 2015). La inteligencia artificial en esta área ha sido muy eficiente en las evaluaciones de impacto para la posterior toma de decisiones, adicionalmente, proporciona un modelo formal con una expresión clara y entendible para todos (García, Benjamín, & Bello, 2014).

Según lo visto anteriormente, se opta por el uso de la lógica difusa para esta clasificación climática, debido a su fácil implementación y la adición de complejidad al análisis de los datos dado que el clima es mucho más complejo que la unión de dos o tres datos en un índice o formula simple que limita severamente la caracterización en modelos muchas veces lineales; la lógica difusa por su lado ha dado buenos resultados de forma rápida y económica en muchos campos de estudio y cabe resaltar que, a diferencia de otros índices de inteligencia artificial o no, no es necesario conocer en profundidad el modelo matemático que rige su funcionamiento (Jiménez, 2015). Además, es muy flexible, permitiendo realizar modificaciones de las reglas o condiciones sin rediseñar todo el modelo, También, puede admitir varios tipos de entradas, incluido datos vagos, distorsionados o con poca precisión. (Electrical Technolgy, 2018).



## 7. OBJETIVOS

# 7.1. Objetivo general

Formular un método de clasificación climática por medio del uso de lógica difusa en Colombia

# 7.2. Objetivo específico

- Recolectar datos disponibles de imágenes satelitales sobre parámetros climáticos
- Analizar los datos obtenidos de imágenes satelitales mediante software de lógica difusa
   FISPro y GeoFIS
- Definir la salida difusa por rangos, para la clasificación climática.



#### 8. MARCO REFERENCIAL

#### 8.1 Marco teórico

#### **8.1.1** El clima

El clima ha sido definido de diversas maneras, en su mayoría se le relaciona con las condiciones atmosféricas en el tiempo. El geógrafo español Contreras Arias, también lo definió de manera muy concisa como; "la relación de las características que condicionan el estado más frecuente de la atmósfera y la definición de los fenómenos meteorológicos en el tiempo, en un determinado lugar de la superficie terrestre".

Hay varios factores que tienen la capacidad de condicionar el clima en cada zona, como la altitud, latitud, orientación, continente, vegetación y la naturaleza del clima. También, se deben considerar los elementos o componentes que son imprescindibles en la clasificación de este, tales como; humedad, visibilidad, radiación solar, temperatura, precipitación, viento, presión, nubosidad, entre otros (Escardó, 2010).

Las condiciones climáticas especiales de Colombia, parte precisamente de su ubicación en la zona intertropical. Situado en el hemisferio norte de la tierra y a través de su extensión en la zona tórrida, sobre la cual llegan los rayos solares de manera vertical. Esto explica desde la latitud que se trata de la región más ardiente.

El clima que predomina en el país es el cálido, y las montañas son las responsables de considerables variaciones debido a los pisos térmicos que se distribuyen como se muestra en la tabla 4 y 5. En los altiplanos donde hay un mayor porcentaje de la población, está el clima templado y frío en las montañas (ELBIBLIOTE, 2011).



Tabla 4.Climas de Colombia en relación a la zona que representa.

Clima	Regiones
Ecuatorial Iluvioso	Sur y este
Tropical seco	Península de la Guajira
Tropical seco y húmedo	Zonas medianas de montañas
Tropical – estación húmeda y seca	Montañas
Frío	Bogotá
Frío con temperaturas muy bajas	Sierra Nevada de Santa Marta y la Cordillera Central
Tórrido	Valles del Patía y del Magdalena
Tropical cálido	Zona del pacífico

Nota: esta tabla muestra los típicos climas colombianos y las regiones que cubre.

**Tabla 5.**Pisos térmicos en Colombia.

Pisos térmicos	Clima	Altitud (m)	Temperatura (°C)
1	Cálido	<1000	>24
2	Templado	1000 - 2000	17 - 24
3	Frío	2000 - 3000	12 - 17
4	Páramo	3000 - 4500	<12
5	Nevado	>4500	<0

Nota: esta tabla muestra los cinco pisos térmicos de Colombia con su respectiva altitud y temperatura correspondiente, extraído de las bases de datos del IDEAM.



#### 8.1.2 Clasificación climática

La clasificación de los climas inició con interpretaciones de la geometría tierra – sol. Básicamente, se hacía una división de la tierra en cinturones latitudinales y así se lograron establecer franjas de comportamiento similar en cuanto a la temperatura, justificadas por su cercanía a los polos o ecuador geográfico. Las franjas se denominaron zona tórrida, templada y fría (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2014).

Seguidamente, se han desarrollado varios sistemas de clasificación que consideran algunos elementos básicos que condicionan el clima como la vegetación, precipitación, evaporación, temperatura y la humedad. Por lo tanto, esto ha facilitado la ampliación de análisis y lograr resultados más específicos en relación (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2014).

A continuación, los métodos de clasificación climática utilizados en Colombia actualmente.

#### 8.1.2.1 Clasificación climática de Köppen

Este método de clasificación separa las zonas climáticas en cinco (5) grupos, representados en letras mayúsculas; A, B, C, D, E y H como se muestra en la tabla 6 y su distribución grafica en la figura 4.



**Tabla 6.**Distribución climática general según Köppen.

Tipo de clima	Descripción	Otros climas en el grupo
Tropical o megatermal (A)	Temperaturas >18°C Precipitación > evaporación	Af: sin estación seca  Am: estaciones secas cortas  Aw: estaciones secas en invierno  As: estaciones secas en invierno
Secos (B)	Sequedad, pérdidas de agua del suelo por evaporación.	Bw: clima árido Bs: clima semiárido
Templado o mesotermal (C)	-3°C< Temperatura>18°C	Cf: precipitaciones constantes Cw: invierno seco Cs: verano seco
Templado frío o microtermal (D)	-3°C< Temperatura>10°C	Df: precipitaciones constantes Dw: invierno seco Ds: verano seco
Regiones más frías (E)	Temperaturas bajo cero	ET: climas de tundra EF: climas de nieve/hielo
Climas de montaña (H)		

Nota: esta tabla muestra los grupos climáticos considerados por Köppen de acuerdo a las temperaturas y precipitaciones en cada región. Esto idealizado a nivel global, extraído de las bases de datos del IDEAM.



**Tabla 7.**Distribución climática según Köppen en Colombia.

Tipo de clima	Regiones	Otros climas en el grupo
Tropical (A)	Af: Centro y norte de la Amazonia, Región Pacífica, occidente de Santander, Boyacá y Cundinamarca. Am: Piedemonte llanero	Af: tropical lluvioso de selva  Am: tropical lluvioso de bosque  Aw: tropical lluvioso de sabana con invierno
	Aw: región Caribe y Orinoquia. As: Huila, Valle, Cauca y Nariño.	seco As: tropical lluvioso de sabana con verano seco
Seco (B)	Bw: Alta Guajira. Bs: media y baja Guajira y sectores del litoral Caribe.	Bw: seco árido muy caliente Bs: seco semiárido muy caliente
Templado mesotermal (C)	Cwb: Boyacá y Santander.  Csb: Boyacá y Santander, Valle, Cauca y Nariño.  Csc: niveles altos de la cordillera oriental.  Cfb: Boyacá, Cundinamarca, Antioquia, Cauca y Nariño.  Cfc: niveles altos de la cordillera oriental.	Cwb: Mesotermal con invierno seco y templado.  Csb: Mesotermal con verano seco y templado.  Csc: Mesotermal con verano seco y frío.  Cfb: Mesotermal templado sin estación seca.  Cfc: Mesotermal frío sin estación seca.
Templado microtermal (D)	No se identificaron en las estaciones.	
Frío de alta montaña (H)	Niveles altos de las tres cordilleras.	

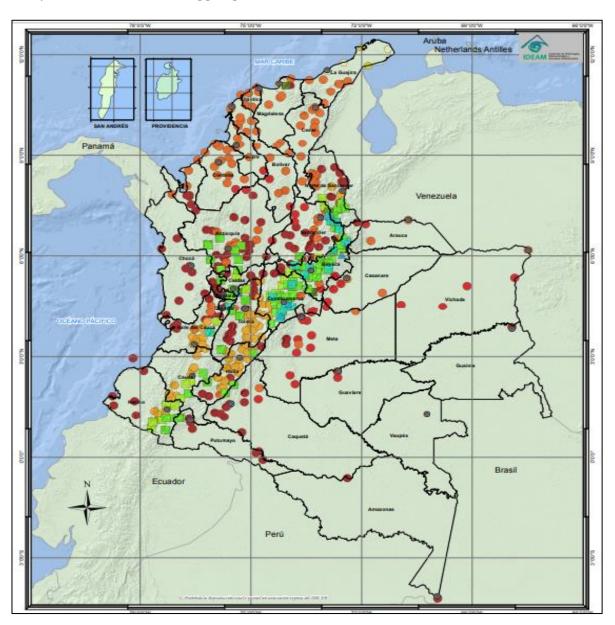


Nota: esta tabla muestra los grupos climáticos considerados por Köppen de acuerdo a las temperaturas y precipitaciones en cada región de Colombia.

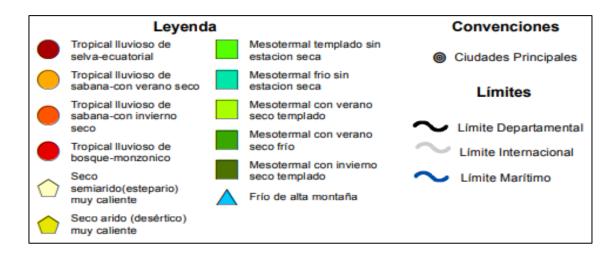
# Mapa – clasificación climática de Köppen en Colombia.

Figura 4.

Clasificación climática de Köppen para Colombia 1981 – 2010.







Nota: el gráfico representa los climas encontrados en las regiones de Colombia según el método de clasificación de Köppen hasta el 2010. Tomado del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, publicado en el 2014.

#### 8.1.2.2 Clasificación climática de Thornthwaite

Para esta clasificación, Thornthwaite propuso el uso de un parámetro fundamental como es la evapotranspiración potencial para delimitar los distintos tipos del clima, bajo el entendimiento que la evaporación, transpiración y el agua disponible en el suelo, afecta al mismo y directamente a las plantas (Rodríguez, 2017).

Este método consta de cuatro índices:

- 1. Índices de humedad
- 2. Variación estacional
- 3. Eficacia térmica
- 4. Concentración estival



### - Determinación del índice de humedad

$$lh = 100 - \frac{\sum_{l=1}^{1=2} EXC}{ETP}$$

El índice de aridez está definido como el porcentaje de falta de agua en los meses del año, en relación a la ETP anual.

$$la = 100 - \frac{\sum_{l=1}^{1=2} DEF}{ETP}$$

Para calcular el índice de humedad global se resta el 60% del índice de aridez al índice de humedad.

$$lm = lh - (0.6xla)$$

Estos índices permiten definir el tipo de humedad en relación a los siguientes criterios:

Tabla 8.

Rangos para definir el tipo de clima según la humedad.

TIPO	DESCRIPCION	CONDICION
E	Árido	-40 >= lm >-60
D	Semiárido	-20 >= lm > -40
C1	Subhúmedo seco	0 >= Im > -20
C2	Subhúmedo húmedo	20 >= Im > 0
B1	Ligeramente húmedo	40 >= Im > 20
B2	Moderadamente húmedo	60 >= Im > 40
B3	Húmedo	80 >= Im > 60
B4	Muy húmedo	100 >= lm > 80
Α	Perhúmedo	lm > 100

Nota: esta tabla muestra los rangos en relación al índice de humedad global establecidos por Thornthwaite para clasificar el tipo de clima de acuerdo a esta variable, extraído de las bases de datos del IDEAM.



# - Variación estacional de la humedad.

Este se clasifica de acuerdo a los siguientes criterios:

**Tabla 9.**Rangos de la variación estacional de la humedad.

Rango	Descripción	Condición			
Se	Solo para tipos de humedad A, B, C2				
R	Falta de agua nula	$16,7 \ge \mathrm{Ia} \ge 0$			
S	Falta de agua estival moderada	33,3 > Ia ≥ 16,7			
w	Falta de agua invernal moderada	33,3 > Ia ≥ 16,7			
s2	Falta de agua estival grande	Ia > 33,3			
w2	Falta de agua invernal grande	la > 33,3			
Sc	Solo para los tipos de clima C1, D y E				
D	Exceso de agua nula	$10 > lh \ge 0$			
S	Exceso de agua invernal moderado	20 > lh ≥ 10			
W	Exceso de agua estival $20 > lh \ge$				
s2	Exceso de agua invernal grande $ lh \ge 0 $				
w2	Exceso de agua estival grande	lh ≥ 0			

Nota: esta tabla muestra los rangos en relación al índice de aridez y el índice de humedad para la variación de la humedad, extraído de las bases de datos del IDEAM.



# - Índice de eficacia térmica (ETP)

Este índice se determina con los siguientes rangos:

**Tabla 10.**Rangos para definir la evapotranspiración potencial o eficacia térmica.

Tipo	Descripción	Condición
E'	Helada permanente	142 ≥ ETP
D'	Tundra	285 ≥ ETP > 142
C'1	Microtérmico	427 ≥ ETP > 285
C'2		570 ≥ ETP > 427
B'1		712 ≥ ETP > 570
B'2	Mesotérmico	855 ≥ ETP > 712
B'3		997 ≥ ETP > 855
B'4		1140 ≥ ETP > 997
A	Megatérmico	ETP > 1140

Nota: esta tabla muestra los rangos para concluir sobre el resultado obtenido de la evapotranspiración potencial o eficacia térmica, extraído de las bases de datos del IDEAM.

### - Concentración estival de la eficacia térmica.

Este se calcula como el porcentaje de ETP correspondiente al periodo de verano del hemisferio norte.

$$ETP\ verano\% = \frac{100(ETPSVI + ETPVIII + ETPVIII)}{ETP}$$

Y se caracteriza según el resultado de la siguiente forma:



**Tabla 11.**Tipos de concentración estival.

Tipo	Condición
a'	48,0 > ETPv
b'4	51,9 > ETPv ≥ 48,0
b'3	56,3 > ETPv ≥ 51,9
b'2	61,9 > ETPv ≥ 56,3
b'1	68,0 > ETPv ≥ 61,9
c'2	76,3 > ETPv ≥ 68,0
c'1	88,0 > ETPv ≥ 76,3
ď'	ETPv ≥ 88,0

Nota: esta tabla muestra los rangos de eficiencia térmica en verano para cada tipo de concentración estival, extraído de las bases de datos del IDEAM.

## Distribución de los climas según Thornthwaite en Colombia.

Según los índices de humedad, la mayoría de las regiones del país están clasificados como clima A y B4, es decir; superperhúmedo y muy húmedo. Estos lugares son principalmente: Región pacífica, Amazonía, Orinoquia, gran parte de Antioquia, Caldas, Risaralda y Occidente de Santander (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2014).

1. Distribución climática según el índice de tipo de humedad.



**Tabla 12.**Tipos de clima según índice de humedad.

Tipo de clima	Condiciones	Regiones
B1, B2, B3	Ligeramente húmedo, moderadamente húmedo y húmedo.	Estribaciones de las tres cordilleras y hacia el sur de la región Caribe
C1, C2	Subhúmedo seco y subhúmedo húmedo	Regiones Andina y Caribe
D, E	Semiáridos y áridos	Alta y media Guajira y sectores del centro del litoral Caribe.

Nota: esta tabla muestra los tipos de clima encontrados en diferentes regiones de Colombia, basado en el índice de humedad.

2. Distribución climática según el índice de variación estacional de la humedad.

Este índice demostró no ser muy representativo para las regiones de Colombia. Para los tipos de clima A, B y C2, en la mayor parte resultaron con información de déficit de humedad casi nulo. Igualmente, para los tipos C1, D y E, indican exceso de agua casi nula en la mayoría de las regiones (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2014).

3. Distribución climática según el índice de eficacia térmica.

Por medio de este índice se definió que la mayor parte del país está en el rango de clima megatérmico (A), incluido la región Caribe, Orinoquia, Amazonía y las estribaciones de las tres cordilleras, que están por debajo de los 1400 msnm (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2014).

4. Distribución climática según el índice de concentración Estival.

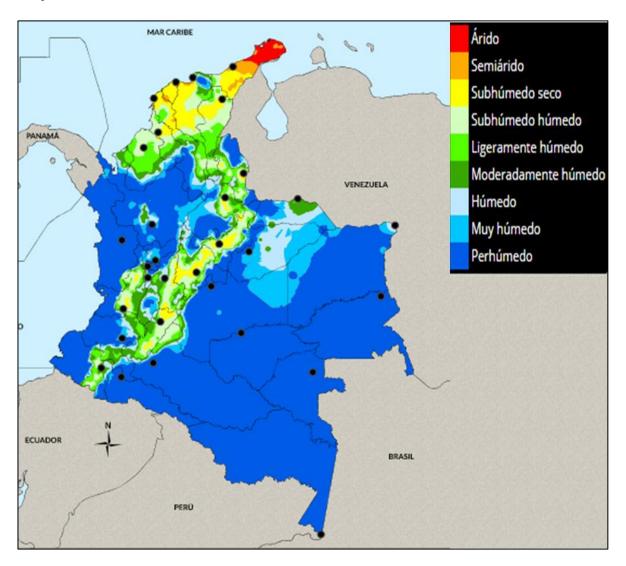
Este índice no muestra variaciones significativas en condiciones del trópico.



# Mapa – clasificación climática de Thornthwaite en Colombia.

Figura 5.

Clasificación climática de Thornthwaite en Colombia, 2010.



Nota: el gráfico representa los climas encontrados en las regiones de Colombia según el método de clasificación de Thornthwaite en el 2010. Tomado del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, publicado en el 2010.



### 8.1.2.3 Clasificación climática de Caldas – Lang.

Está basado en la combinación de la clasificación de Caldas con la de Lang, ideado de esta manera por el geólogo Schaufelberguer, 1962. Logrando considerar más tipos de climas, teniendo en cuenta el factor térmico y de humedad. Según el IDEAM, estos son los parámetros ideales para describir el clima de determinadas regiones.

Esta clasificación es una de las de mayor uso en Colombia por su facilidad y sentido práctico. Describe de manera apropiada las características de humedad y temperatura. Los tipos de clima se nombran con dos criterios: el primero describe su característica térmica y el segundo su condición de humedad promedio (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2014).



**Tabla 13.**Tipos de clima según el método de Caldas – Lang.

Tipos de clima según Caldas - Lang	
Cálido superhúmedo	
Cálido húmedo	
Cálido semihúmedo	
Cálido semiárido	
Cálido árido	
Templado superhúmedo	
Templado húmedo	V
Templado semihúmedo	
Templado semiárido	
Templado árido	
Frío superhúmedo	
Frío húmedo	
Frío semiárido	:
Frío árido	2334 2044 AND
Muy frío bajo superhúmedo	
Muy frío bajo húmedo	
Muy frío bajo semihúmedo	d in aller der der der der der der der der der d
Muy frío semiárido	
Muy frío bajo árido	
Extremadamente frío superhúmedo	
Extremadamente frío húmedo	
Extremadamente frío semihúmedo	
Extremadamente frío semiárido	
Extremadamente frío árido	
Nival superhúmedo	
Nival húmedo	
Nival semihúmedo	40 NO 10
Nival semiárido	
Nival árido	10, 14 <u>2</u> 0



Nota: esta tabla muestra la relación completa de los climas obtenidos, extraído de las bases de datos del IDEAM.

# Distribución de los climas según Caldas – Lang en Colombia.

**Tabla 14.**Climas existentes en Colombia según Caldas-Lang.

Tipo de clima	Regiones
Desértico	Alta Guajira
Árido y semiárido	Franja litoral, Magdalena, norte de Bolívar, Sucre y Córdoba.
Semihúmedo y húmedo	Orinoquia, Amazonía, valle del medio Magdalena, Sur de la región Caribe y oriente de Norte de Santander.
Templados	Laderas de las tres cordilleras
Secos	Laderas del Valle del Cauca y sectores de Santander
Superhúmedo y húmedo	Región pacífica, cordillera central en Antioquia, cordillera occidental en Cuaca y a lo largo de Piedemontes llanero y Amazónico.
Fríos	Las tres cordilleras y la Sierra Nevada de Santa Marta.

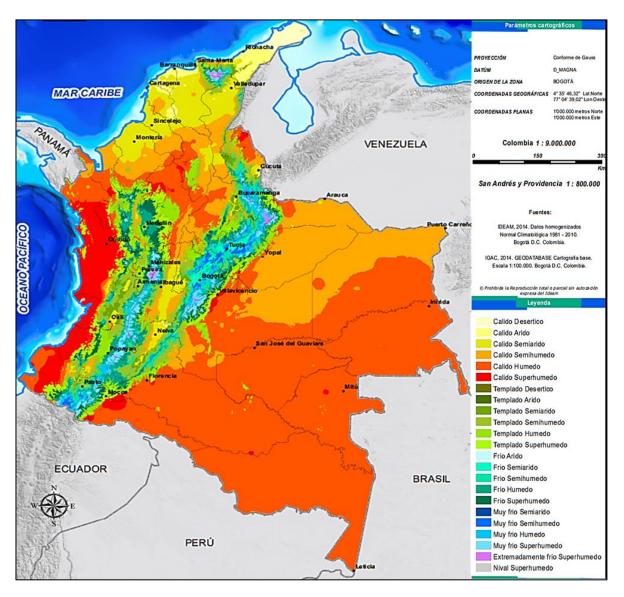
Nota: esta tabla muestra el tipo de clima encontrado en las regiones de Colombia según la clasificación de Caldas – Lang, basado en el factor térmico y el factor de humedad.



Mapa - clasificación climática de Caldas - Lang en Colombia.

Figura 6.

Clasificación climática de Caldas – Lang para Colombia, 2014.



Nota: el gráfico representa los climas encontrados en las regiones de Colombia según el método de clasificación de Caldas – Lang en el 2014. Tomado del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, publicado en el 2014.



### 8.1.3 Lógica difusa.

La lógica difusa es una herramienta matemática que, según su extensa aplicabilidad consiste en la concepción de conjuntos con frontera inexactas (Duarte O. G., 2000).

Según Ponce. C, la lógica difusa está relacionada con principios matemáticos basados en grados de pertenencia, que tiene como función modelar informaciones. Las reglas lingüísticas juegan un papel fundamental en este modelado que relaciona las entradas y salidas del sistema. Esta lógica presenta rangos de membresía entre un intervalo de 0 a 1 (Cabrera, 2013).

### 8.1.3.1 Matrices para la caracterización de la lógica difusa.

En el siguiente cuadro se presentan tres (3) matrices que exteriorizan proposiciones en relación a las fases: lógica, relacional, y teoría de conjuntos.



**Tabla 15.**Facetas de la lógica difusa.

Facetas				
Lógica	Conjuntos	Relacional		
- Se caracteriza por su tolerancia con la imprecisión, flexibilidad y capacidad para modelar casos no lineales.  - Representa conocimientos en base a información incompleta o imprecisa.  - Trabaja con números y términos lingüísticos.  - Describe un sistema usando reglas de sentido común.	<ul> <li>Es aplicado a conjuntos con fronteras no definidas con precisión.</li> <li>Para la representación de los grados de pertenencia se extraen los datos de las variables que se van a representar, y con estos se define la forma de la función de membresía.</li> <li>Valores de pertenencia entre 0 y 1, no 0 o 1 como sucede en otros casos.</li> </ul>	- Se relaciones con funciones que no están definidas con precisión.  - Tiene capacidad de reproducir de manera aceptable, los modos usuales del razonamiento.  - Considera reglas tomadas de expertos y si no hay expertos, los sistemas difusos adaptivos aprenden las reglas, por medio de la observación de cómo las personas manipulan sistemas reales.		

Nota: esta tabla muestra las características generales de la lógica difusa por medio de tres facetas; lógica, conjuntos y relacional.

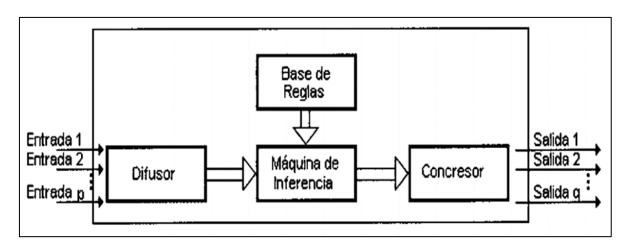


### 8.1.3.2 Controlador difuso adaptivo

Es básicamente un sistema de control que presenta una estructura interna como lo muestra la siguiente figura.

Figura 7.

Estructura interna de un controlador difuso.



Nota: esta figura muestra la estructura interna de un sistema de control difuso. Tomado de la Revista Ingeniería e Investigación, publicado por Oscar Duarte en el año 2000.

La ventaja de los controladores difusos en relación a otros, es que estos se pueden diseñar aún sin tener un modelo matemático preciso, ya que están basados en reglas.

Los controladores cuentan con un algoritmo por medio del cual evalúan su desempeño, y de acuerdo con cierto criterio se ajusta el diseño, estos algoritmos de autoajuste garantizan que el controlador tenga su comportamiento ideal, teniendo en cuenta las combinaciones de información numérica con la lingüística. (Duarte O. G., 2000).



#### 8.1.3.3 Base de datos difusa

Como se ha mencionado anteriormente, la lógica difusa desarrolla determinados procedimientos para manejar la información precisa y vaga. Entonces, los sistemas de base de datos tienen como objetivo organizar la información.

### 8.1.3.4 El estado de la temática en la actualidad y sus avances

Actualmente en Colombia se han realizado estudios con lógica difusa en diversos ámbitos, la mayoría de estos en el apoyo de tomas de decisiones en temas económicos para la "gestión de la cadena de suministros" (Ortiz & Oramas, 2015) mejorando la disponibilidad de materias primas, su distribución y la gestión de los inventarios; "Sistema de inferencia difuso para la inflación en Colombia" (Enciso, Acosta, & Campo, 2013), el cual es capaz de tomar en cuenta los valores cualitativos dados a la economía en general los cuales pueden afectarla; "Técnicas de lógica difusa en la predicción de índices de mercados de valores" (Arango, Velazquez, & Franco, 2014); de igual forma se pueden encontrar trabajos relacionados con estudios de carácter ambiental como "Un modelo de lógica difusa y conjuntos difusos para el pronostico de los niveles medios diarios del rio Magdalena, en la estación limnigrafica de Puerto Salgar, Colombia" (Segura & Obregon, 2005); "Aplicación educativa de la lógica difusa a la situación ambiental del humedal Cauquita" (Gonzalez & Espinoza, 2015); y aun en temas tan complejos como la filosofía, se pueden ver aplicaciones de la lógica difusa como el trabajo "Propuesta de una metodología con base en la lógica difusa para explicar los razonamientos de tipo Sorites" (Buitrago, 2018), la mayoría de estos basándose en el potencial de la Lógica Difusa de poder usar términos lingüísticos para el análisis



del problema, generando resultados mucho mas acercados a la psique humana pero con la habilidad de tener en cuenta una gran cantidad de variables con miríadas de datos.

### 8.2 Marco conceptual

Se entiende por clasificación climática a la organización de regiones de acuerdo a su estado climático, en el cual influyen diferentes factores como el abiótico, físico y químico, los cuales fueron tenido en cuenta en esta formulación.

Los factores o indicadores abióticos considerados para esta clasificación son; evaporación, temperatura, precipitación y humedad. Estos afectan la distribución de los seres vivos por ser condicionantes importantes del clima. Por ejemplo; la humedad es un indicador clave para conocer las especies que pueden habitar en un ecosistema.

Los factores o indicadores físicos como la radiación, viento, presión y altitud, guardan mucha relación con los abióticos, de hecho, las corrientes de vientos regulan la temperatura, humedad y otros parámetros abióticos. Por lo tanto, ejercen la misma intervención sobre los ecosistemas y el clima.

Efectivamente los indicadores abióticos se derivan de la totalidad de indicadores físicos que se saben con seguridad que condicionan el clima, como tal, los indicadores abióticos tomados en cuenta para este trabajo condicionan la distribución de las especies y en el caso de encontrarse una misma familia taxonómica condicionan los aspectos morfológicos, pero para la estructura de Mamdani no se derivaron los aspectos abióticos de los físicos del clima, esto con la finalidad de distribuir los pesos dados a cada parámetro de forma única, dándole mas sensibilidad a cada uno



y evitando la exclusión por peso de algún parámetro físico poco condicionante de un parámetro abiótico el cual, en la realidad, podría generar grandes cambios en el clima.

Los factores o indicadores químicos como el CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> Y PPM, son gases de efecto invernadero. Algunos de estos son GEI directos que afectan a la atmósfera tal como son emitidos y otros son GEI indirectos precursores de ozono troposférico y en la atmósfera se transforman a GEI directos.

Los GEI directos considerados para esta clasificación son los siguientes:

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), es considerado para la clasificación ya que desempeña un rol importante en muchos procesos biológicos, su concentración depende de las fuentes de emisión y la vegetación que tiene la capacidad de absorción del mismo.

El metano (CH<sub>4</sub>) condiciona básicamente la capacidad de oxidación de la troposfera, el medio ambiente es afectado considerablemente por este gas, las vacas son una de las mayores fuentes de producción de este al año. Según el IDEAM, cada vaca genera 90 kilos de CH<sub>4</sub>/año.

Los GEI indirectos considerados para esta clasificación son los siguientes:

El monóxido de carbono (CO) no contribuye por sí mismo al efecto invernadero, para que esto suceda debe reaccionar con los radicales OH, el CO tiene gran importancia climatológica debido a que tiene la capacidad de afectar de manera indirecta la formación de GEI como lo es el O<sub>3</sub> y el CH<sub>4</sub>.

Según estudios actuales, el PPM dependiendo del tamaño y forma pueden contribuir al calentamiento global, como lo indica el IDEAM; estas pequeñas partículas son removidas de la atmósfera por las precipitaciones, tienen corto tiempo de vida en la misma, su concentración y composición varía regional, espacial y temporalmente, lo que lo hace muy significativo para la clasificación climática.



Como se mencionó anteriormente, la lógica difusa está relacionada con principios matemáticos basados en grados de pertenencia, que tiene como función modelar informaciones. Las reglas lingüísticas juegan un papel fundamental en este modelado que relaciona las entradas y salidas del sistema. Esta lógica presenta rangos de membresía entre un intervalo de 0 a 1 (Cabrera, 2013). En las entradas del sistema se debe tener en cuenta los datos históricos de los parámetros descritos, con la ayuda se los softwares FISPro y GeoFIS se obtienen los resultados en rangos para un posterior análisis.

Los datos históricos de cada parámetro se pueden obtener de la página GIOVANNI NASA, es una aplicación basada en la web desarrollada por el Centro de Servicios de Información y Datos de Ciencias de la Tierra que proporciona una forma sencilla e intuitiva de visualizar, analizar y acceder a grandes cantidades de datos de teledetección de ciencias de la Tierra sin tener que descargar los datos.

Por otro lado, GeoFIS es una plataforma de software de código abierto y gratuito para el procesamiento de datos de alta resolución espacial con una perspectiva de apoyo a la toma de decisiones y FISPro permite crear sistemas de inferencia difusa y utilizarlos con el propósito de razonamiento, sobre todo para la simulación de un sistema físico o biológico.

### 8.3 Marco legal

Las normas vigentes que se presentarán a continuación, están relacionadas con el cambio climático en Colombia.

### Ley 1931 del 2018.

Por medio de esta ley se establecen directrices para la gestión del cambio climático.



En el artículo 1, se menciona el objetivo general de establecer acciones de adaptación al cambio climático.

En el artículo 7, se establecen los instrumentos de los ministerios como objetivos específicos para responder a los cambios climáticos.

En el artículo 10, se señalan las funciones correspondientes a las autoridades ambientales regionales para elaborar e implementar planes, programas y proyectos de adaptación a la variación climática.

#### Resolución 2254 del 2017.

Por medio de esta se adopta la norma de calidad del aire y se dictan otras disposiciones para gestión del recurso aire en el territorio nacional.

En el artículo 2, se establecen los niveles máximos permisibles de contaminación criterio en el aire; material particulado, SO2, NO2, O3 y CO con respecto a un tiempo de exposición.

En el artículo 3, se establecen los niveles máximos permisibles a condiciones de referencia para contaminantes criterio que regirán a partir del año 2030.

En el artículo 4, se establecen los niveles máximos permisibles de contaminantes tóxicos del aire.

En el artículo 10, se establecen los rangos de concentración para la declaratoria de los niveles de prevención, alerta o emergencia.

En el artículo 15, se presenta la elaboración de los programas de reducción de la contaminación del aire.

#### Decreto 2811 del 1974.

Por medio este de este decreto se dicta el código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.



En el artículo 73, se menciona que le corresponde al gobierno mantener la atmósfera en condiciones que no afecten el desarrollo normal de la vida humana, animal o vegetal y de los recursos naturales renovables.

En el artículo 74, se estable que se prohibirá, restringirá o condicionará las emisiones a la atmósfera de polvos, vapores, gases, humos y, en general, de cualquier sustancia que pueda afectar a la comunidad cuando estas sobrepasen los niveles fijados.

En el artículo 75, se dictan algunas disposiciones para prevenir la contaminación atmosférica.

- Documento económico CONPES 3975-Politica nacional para la transformación digital e inteligencia artificial.

Política que establece como objetivo el potenciar la generación de valor social y económico en el país mediante el uso de tecnologías digitales en el sector público y privado, para impulsar la productividad y favorecer el bienestar de los ciudadanos, de manera que Colombia pueda aprovechar las oportunidades y enfrentar los retos relacionados con la Cuarta Revolución Industrial.



### 9. METODOLOGÍA

La investigación será teórico-longitudinal debido al análisis de gran cantidad de datos históricos disponibles para generar información relacionada con el tema de estudio.

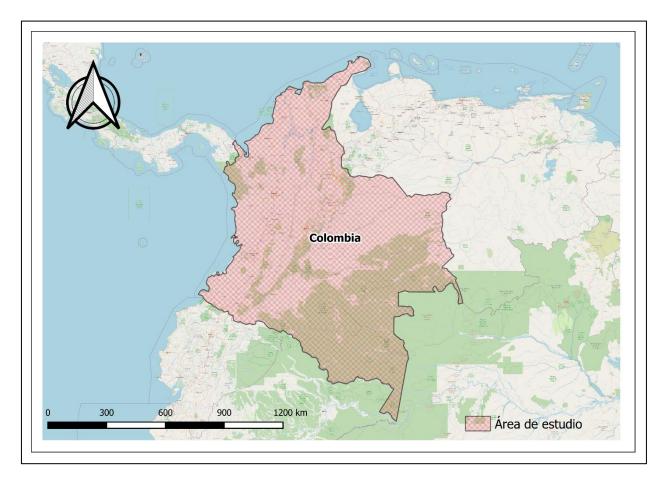
Teniendo en cuenta que la mayoría de métodos de clasificación se basan solo en parámetros de precipitación y temperatura, se plantea formular un índice de clasificación que posea indicadores químicos, abióticos y físicos para aumentar la sensibilidad del sistema y dar resultados más precisos, de esta forma, y teniendo en cuenta el uso de la lógica difusa para el análisis de los datos, es necesario ordenar los parámetros e indicadores por medio de la estructura de Mamdani.

### 9.1 Área de estudio

Teniendo en cuenta la cantidad y calidad de datos que se pueden obtener del área latinoamericana mediante imágenes satelitales, se determina el área de estudio como Colombia tal como se puede ver en la figura 8, de esta forma se pueden obtener una cantidad considerable mediante el uso de una grilla con longitud determinada por la imagen satelital con datos en menor resolución, evitando de esta manera que se repitan datos los cuales podrían sobrevalorarse por el software.



**Figura 8.** *Área de estudio.* 



Nota: Adaptado de imágenes OpenStreetMap del Software SIG QGis 3.8.3

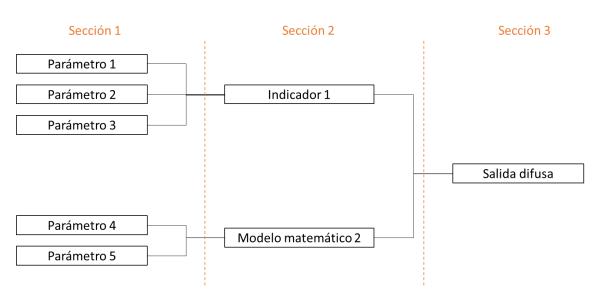
Para este caso de estudio se tendrá en cuenta solamente el territorio continental debido a la falta de información existente en las imágenes satelitales en la zona terrestre de la región insular colombiana comprendida por las Islas Rosario, Isla Tierra Bomba, Isla de Barú, Isla Fuerte, Isla Tortuguilla, Archipiélago de San Bernardo, Archipiélago de San Andrés y Providencia, y las islas Malpelo, Gorgona y Gorgonilla además de las islas fluviales y lacustres existentes en la jurisdicción de Colombia que no comprenden la región Insular.



#### 9.2 Estructura de Mamdani

La lógica difusa funciona en forma de cascada o árbol, ilustrado en la figura 9, donde en la parte más amplia (Sección 1) se colocan los parámetros diferenciados en cada rama por relación, generalmente como parte de algún indicador, en el centro se pueden encontrar, en este caso, los indicadores que relaciona a los parámetros nombrados anteriormente, también, se puede encontrar modelos matemáticos que relacionan los parámetros puestos en la sección anterior, al final, se encuentra el resultado del cálculo por lógica difusa, estos se hallan en un rango de 0 a 1 los cuales deben ser clasificados según reglas que identifican los valores por rangos, funcionando como puente entre los resultados de salida y los que se necesitan.

**Figura 9.**Estructura de Mamdani para lógica difusa.



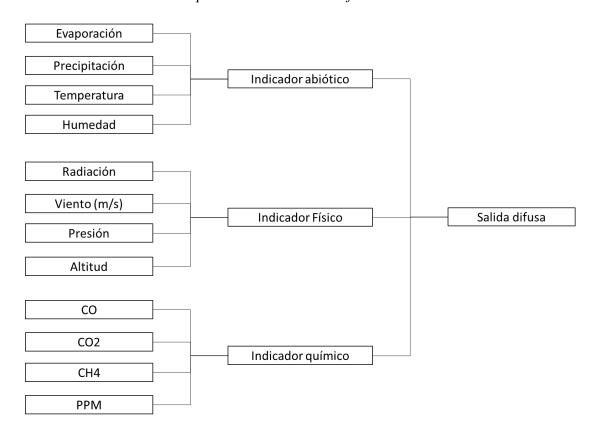
Para este trabajo se tendrán en cuenta 12 parámetros en un comienzo, todos estos distribuidos en 3 indicadores, en este caso son: el abiótico, físico y químico, cada uno con 4 parámetros,



distribuidos así: evaporación, humedad, temperatura y precipitación para el abiótico; Radiación, Velocidad del viento, presión atmosférica y altitud para el físico y CO, CO2, CH4 y PPM para el indicador químico, todo esto representado en la figura 10.

Figura 10.

Estructura de Mamdani usada para el sistema de clasificación climática.



Cabe resaltar que es posible la modificación de los parámetros establecidos, debido a la poca información que pueda existir en las bases de datos de imágenes satelitales de Colombia o la falta de relación entre el parámetro y el indicador según el software de lógica difusa, lo que hará que se ignore el parámetro de forma automática.



#### 9.3 Recolección de datos

La recolección de datos se realizará por medio de imágenes satelitales, obtenidas de la página Giovanni, la cual es una página de internet administrada por la NASA donde se puede descargar imágenes satelitales con sus respectivos datos, por medio de una cuenta creada en la misma página de forma gratuita, en esta página se puede encontrar información recopilada de varios satélites especializados en la creación de imágenes con información representada por tonalidades de grises en archivos cartográficos con superposición de datos, también encontrados con la extensión .nc que solo puede ser visualizada por medio de un software de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como ArcGis o QGis, en cualquiera de sus versiones; para la extracción de la información se usara una grilla conformada por coordenadas en una plantilla de extensión .csv (Separada por comas) creada en Excel, el espaciado de la grilla se establecerá tomando en cuenta el tamaño del pixel de la imagen con datos de menor resolución, de esta forma se reducirá la posibilidad de datos semejantes y con esto una posible imprecisión en la imagen interpolada con la clasificación de climas.

Los datos tomados en cuenta deberán poseer ciertos requisitos en cuanto a:

- **Resolución**: se tomarán las imágenes que mejor resolución tengan, buscando de igual forma que todas las imágenes de los distintos indicadores posean la misma.
- Volumen temporal: se tomará en cuenta que el satélite posea datos de más de 30 años,
   tomados de forma continua y en frecuencia mensual; en el caso de que no se alcancen los
   30 años de datos en algún parámetro, se reducirá la toma de datos de los demás parámetros,



buscando la uniformidad temporal de los datos a analizar, por lo tanto, la escala temporal de recolección se verá afectada por el parámetro que menor cantidad de datos contenga.

- **Medidas**: se tomarán en cuenta los datos que están en medidas del sistema internacional de unidades para facilitar la organización y uniformidad de la información.

### 9.4 organización de datos

Los datos se ordenarán en una plantilla de Excel (Libro), tomando la primera fila para etiquetar los datos y las primeras dos columnas para almacenar información de cada punto de coordenadas.

Al igual que la plantilla con las coordenadas en la grilla, este documento debe ser guardado con extensión .csv (Delimitado por comas), para su uso en el software GeoFIS, También, se deberá realizar una nueva plantilla (libro) de Excel con cada mes correspondiente debido a que el formato .csv solo admite la lectura de información de la primera hoja de cada libro, bloqueando o eliminando las demás.

### 9.5 Análisis de datos por lógica difusa

Teniendo en cuenta el Índice de Lang para clasificación climática, se establecerá en primera medida, una tabla de rangos de cada clima con la cual se analizarán los datos difusos, para la creación de la tabla, se contaran la cantidad de puntos de muestreo del área de Colombia y cercano a este, correspondiente a cada tipo de clima, de esta forma, se tomara en cuenta la predominancia de cada clima del Índice de Lang, por lo que se podrá comparar la diferencia que se añade con la lógica difusa y la adición de más variables al sistema.



### 9.5.1 Normalización y fusión de datos

Es necesario la ordenación de los datos en el rango comprendido entre 1 y 0, entendiéndose 1 como la parte más alta de los datos y 0 como lo más bajo, para esto es necesario ordenar los datos en una hoja de Excel, donde la primera fila será definida como celda general y las que contienen datos como celdas con formato numérico, además es necesario definir el punto para determinar los decimales, logrando así que pueda ser analizado por el software GeoFis.

En este estudio se usará el Índice de Lang para el análisis y caracterización del clima por lo cual es necesario obtener el resultado numérico de cada punto de muestreo de los datos con el fin de usarlo como base de aprendizaje automático por pesos (Parámetro WAN) (Guillaume & Charnomordic, 2011) y de esta forma explotar los beneficios inherentes de la inteligencia artificial.

De esta forma se incluirá en las hojas de Excel la columna de datos relacionados con los resultados del Índice de Lang y se normalizaran los datos según esta columna, buscando la relación entre cada uno de las variables añadidas que se toman en cuenta en el modelo original de Lang y los que no.

Primero los datos se cargan al software GeoFis eligiendo como separador el punto y coma y el sistema de coordenadas como WG284 / UTM zona 18N, los cuales son representativas de gran parte de Colombia en el sistema universal transversal de Mercator, después se aceptan estas propiedades y automáticamente aparecerán los puntos de muestreo en la pantalla de GeoFis, siguiente a esto se realiza la fusión de datos, en la cual se carga la información relacionada a cada punto, teniendo en cuenta la función de pertenencia respectiva al comportamiento de cada dato según la variable de salida, en otras palabras, el comportamiento de las variables según el clima;



posteriormente es necesario configurar las variables que se agregaran, es decir, la sección 2 de la estructura de Mamdani, para esto se usa la opción de aprendizaje automático en el parámetro WAN teniendo como base la columna de datos donde se encuentra los resultados del Índice de Lang, de esta forma el software configura los pesos, también se añade la sección 3 de la cascada de caracterización, uniendo los indicadores que se cargaron de la sección 2, luego se debe guardar la fusión como un archivo con extensión .csv.

#### 9.5.2 Análisis de salida difusa

La salida difusa en el archivo .csv de datos fusionados se encuentra en el rango entre 0 y 1 por lo cual es necesario establecer rangos para lograr definir los climas que se representan aquí, por lo tanto, se usará la tabla previamente elaborada con los datos del análisis de Lang, realizado al área de Colombia y sus alrededores, de esta forma se establecerá el clima de cada punto de la red creada con la cual se extrajo los datos de las imágenes satelitales.

### 9.5.3 Creación de mapas

El archivo .csv con los datos fusionados se usará finalmente para la creación de mapas de los resultados lineales del Índice de Lang y los resultados obtenidos con la lógica difusa, el archivo con los datos en formato .csv se cargará a QGis junto con un archivo shape que contenga las coordenadas de puntos del área continental de Colombia, siguiente a esto se hará interpolación Kriging debido a su naturaleza geoestadística y precisión con datos espaciales del fenómeno, debido a la posibilidad de incluir valores en el eje Z a diferencia del modelo de interpolación por



ponderación de distancia inversa (Interpolación IDW) que genera puntos de concentración de datos sin tener en cuenta la posición espacial en el eje Z y aumentando el margen de error mientras más distancia exista al punto de datos debido a la estimación de valores según el cálculo de las celdas aledañas, seguido de la interpolación, se ordenara la ventana de salida de imagen y se guardara el mapa como imagen con su respectiva leyenda y demás datos básicos.



# 10. POSIBLES COLABORADORES

- Estudiante ingeniería ambiental Jhoan Manuel Londoño Rojas
- Estudiante ingeniería ambiental Heimer Darío López Mina
- Director de trabajo de grado B. Sc, M. Sc, PhD Juan Guillermo Popayán Hernández



#### 11. RECURSOS DISPONIBLES

#### **Recursos Humanos**

Tabla 16.

Recursos humanos.

Nombre	Cargo	Función en el proyecto
Jhoan Manuel Londoño Rojas	Estudiante de Ingeniería ambiental	Autor
Heimer Darío López Mina	Estudiante de Ingeniería ambiental	Autor
Juan Guillermo Popayán Hernández	Ingeniero Ambiental,  Magister en ingeniería  ambiental, Doctor en ciencias  ambientales.	Director

#### **Recursos financieros**

Nota: El software empleado para el análisis de datos por medio de inteligencia artificial es de código abierto, el software empleado para ordenar e interpolar la información obtenida en el análisis es QGis y es de igual manera de código abierto, las bases de datos en las cuales se obtienen la información son proporcionadas por entidades públicas y privadas y son de igual forma de acceso libre, el precio del computador está basado en las especificaciones recomendadas para el trabajo con software SIG, siendo estas especificaciones necesarias, como son: procesador con velocidad de 3.3 GHz por núcleo de procesamiento y preferiblemente por encima de los 4 núcleos de procesamiento, 8 GB de memoria RAM, disco duro en estado sólido, tarjeta gráfica dedicada compatible con software OpenGL y que pueda admitir WebGL de por lo menos 4 GB de memoria y sistema operativo Windows preferiblemente 8.1 o 10; un computador con estas características trabajara de forma rápida y sin problemas de estabilidad o compatibilidad para el desarrollo de



cualquier tarea en el software SIG; el costo del servicio de internet se basó con un contrato establecido en 50 MB de velocidad simétrica y router de doble banda suministrado por la empresa prestadora del servicio; el valor dado a los estudiantes se basó en el salario base de un ingeniero ambiental con cargos de nivel inicial o sin experiencia, estos datos fueron extraídos de la página Talent la cual muestra salarios de diferentes profesiones según promedios hechos con datos de contratos empresariales.

**Tabla 17.** *Recursos financieros.* 

	Unidad	Valor unidad	Cantidad unidades	Costo total
	Co	stos del per	sonal	
Jhoan M. Londoño	Hora	7.500	420	2.100.000
Heimer D. López	Hora	7.500	420	2.100.000
Juan G. Popayán	Persona	3.918.254	1	3.918.254
	Equipo de oficina			
Internet	Mes	100.000	7	700.000
Computadores	Unidad	3.200.000	2	6.400.000
Subtotal			15.218.254	
Imprevistos (10%)			2.921.825	
Total			18.140.079	

### 12. RESULTADOS

## 12.1 Índice climático de Lang para Colombia

Según los datos extraídos de los satélites de la NASA, se ordenaron las imágenes en el software QGis y se realizó la extracción de datos en una nueva capa la cual se exporto en formato .csv (Texto delimitado por comas) para posteriormente realizar los cálculos en Excel.

Teniendo en cuenta que se usó el Índice de Lang, solo fue necesario el análisis de dos variables, la precipitación y temperatura, empleando la fórmula:

$$R = \frac{P}{T}$$

Donde R es el Índice de Lang, P es la sumatoria de la precipitación anual y T es el promedio anual de temperatura en determinado punto, sin embargo, solo se logró obtener la ventana de datos de solo 6 años, razón por la cual se decidió realizar un promedio de la sumatoria de precipitación anual y del promedio anual de temperatura, esto debido a que se puede notar un cambio en el clima de un punto determinado, con el análisis de dos o más "normales climatológicas" (Organizacion Meteorologica Mundial, 2014), aun teniendo en cuenta las nuevas recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial de tomar cada "normal climatológica" como un periodo de tiempo de 15 años en vez de 30 años, los datos obtenidos no son suficientes para realizar una comparación del clima, por lo que se tomó como una constante.

De esta manera se obtuvo el Índice de Lang de cada punto de muestreo, se determinó el clima de cada punto teniendo en cuenta los rangos dados para la clasificación del clima según el Índice



de Lang como se observa en la tabla 18 y 19, y se realizó el respectivo mapa usando la interpolación de Kriging como se puede ver en la figura 11.

**Tabla 18.**Rangos para clasificación del clima según el Índice de Lang.

R	Clima	
>160	Superhumedo	
100,1-160	Humedo	
60,1-100	Semihumedo	
40,1-60	Semiarido	
20,1-40	Arido	
0-20	Desertico	

Nota: Información extraída de las bases de datos del IDEAM para el Índice de Lang (IDEAM, 2015).

**Tabla 19.**Resultado del cálculo del Índice de Lang.

Cod. Punto muestreo	X	Y	Índice de Lang	Clima
1	-76,49527	6,52107	99,60185377	Semihúmedo
2	-75,47899	6,50543	29,27415093	Árido
3	-68,46814	8,49664	38,91914626	Árido
4	-69,50903	8,49664	76,26363735	Semihúmedo
5	-67,5016	-3,54797	67,73295295	Semihúmedo
6	-67,5016	8,49664	66,33546213	Semihúmedo
7	-69,58159	11,47482	56,74024168	Semiárido
8	-80,54993	8,45947	106,2180103	Húmedo
9	-69,54621	9,46318	109,3975533	Húmedo
10	-69,54621	10,50408	111,9375136	Húmedo
11	-70,49138	8,48328	107,9925501	Húmedo
12	-78,50532	-4,51451	104,5762207	Húmedo
13	-72,47704	8,48328	84,53667398	Semihúmedo
14	-71,50766	8,48328	91,947424	Semihúmedo
15	-69,47186	-3,54797	64,99862216	Semihúmedo
16	-68,46814	-3,54797	107,9345219	Húmedo



17	-78,50532	-3,47362	93,45383831	Semihúmedo
18	-78,50532	-2,50708	117,0233953	Húmedo
19	-78,4653	8,51455	76,83347257	Semihúmedo
20	-77,51156	8,49891	76,94541027	Semihúmedo
21	-80,51351	7,5139	84,65609221	Semihúmedo
22	-79,52861	9,49157	84,35263089	Semihúmedo
23	-74,49398	8,48328	112,8981044	Húmedo
24	-73,46206	8,49891	96,83971159	Semihúmedo
25	-76,49527	8,49891	166,8501994	Superhúmedo
26	-75,5259	8,51455	149,0993335	Húmedo
27	-72,50831	7,52953	130,3918458	Húmedo
28	-73,49333	7,5139	120,4341412	Húmedo
29	-70,49138	7,49826	111,7521935	Húmedo
30	-71,50766	7,52953	104,7908429	Húmedo
31	-76,51091	7,5139	72,19421558	Semihúmedo
32	-77,51156	7,49826	68,11657106	Semihúmedo
33	-74,50961	7,52953	72,51661477	Semihúmedo
34	-75,47899	7,49826	73,61395035	Semihúmedo
35	-78,51323	1,46205	67,04338423	Semihúmedo
36	-67,43134	2,54016	59,45833246	Semiárido
37	-76,50746	1,48712	57,86218169	Semiárido
38	-77,48528	1,48712	84,43052696	Semihúmedo
39	-70,49014	2,51508	78,69825063	Semihúmedo
40	-71,54317	2,54016	59,45787577	Semiárido
41	-68,43423	2,54016	61,00479349	Semihúmedo
42	-69,46218	2,56523	50,40025207	Semiárido
43	-70,51521	1,53727	49,90504765	Semiárido
44	-71,54317	1,53727	51,44485823	Semiárido
45	-68,50944	1,53727	35,97847063	Árido
46	-69,5374	1,5122	30,48018653	Árido
47	-74,47662	1,53727	65,23424952	Semihúmedo
48	-75,52965	1,48712	51,67467283	Semiárido
49	-72,52099	1,53727	102,8020326	Húmedo
50	-73,54895	1,5122	55,68060173	Semiárido
51	-75,45443	0,50931	84,80537682	Semihúmedo
52	-76,55761	0,48424	80,48119925	Semihúmedo
53	-73,4988	0,53438	81,75234371	Semihúmedo
54	-74,47662	0,55945	80,01520101	Semihúmedo
55	-79,54119	0,45917	93,5244484	Semihúmedo
56	-67,40627	1,53727	86,20452277	Semihúmedo
57	-77,41006	0,53438	156,7673164	Húmedo



58	79 46200	0.49424	150 407502	Húmedo
	-78,46309	0,48424	152,427523	
59	-67,45641	0,50931	156,2598978	Húmedo
60	-68,53451	0,53438	198,8566685	Superhúmedo
61	-78,46309	-0,4685	111,7004243	Húmedo
62	-79,49105	-0,4685	94,04715672	Semihúmedo
63	-71,54317	0,53438	94,79545685	Semihúmedo
64	-72,52099	0,53438	97,32670534	Semihúmedo
65	-69,61262	0,53438	104,2773969	Húmedo
66	-70,54029	0,55945	121,6903279	Húmedo
67	-76,51091	5,53605	93,52250077	Semihúmedo
68	-75,47899	5,52042	143,6753087	Húmedo
69	-75,4795	4,52086	162,6136802	Superhúmedo
70	-76,48239	4,49578	278,152942	Superhúmedo
71	-72,44577	5,52042	172,1706389	Superhúmedo
72	-71,49203	5,56732	125,1123512	Húmedo
73	-74,52525	5,50478	106,2775454	Húmedo
74	-73,46206	5,52042	168,3045615	Superhúmedo
75	-69,46218	4,571	123,6545391	Húmedo
76	-70,49014	4,571	103,1997157	Húmedo
77	-67,43134	4,571	108,3327904	Húmedo
78	-68,48437	4,52086	109,661081	Húmedo
79	-73,52387	4,52086	110,0629868	Húmedo
80	-74,52676	4,49578	129,2835929	Húmedo
81	-71,5181	4,52086	98,2315123	Semihúmedo
82	-72,52099	4,52086	131,736634	Húmedo
83	-71,5181	3,51797	110,8275711	Húmedo
84	-72,52099	3,54304	150,7967108	Húmedo
85	-69,51233	3,54304	113,2831455	Húmedo
86	-70,46507	3,4929	111,725545	Húmedo
87	-75,50457	3,4929	118,1709659	Húmedo
88	-76,48239	3,46783	120,9883484	Húmedo
89	-73,4988	3,4929	121,746922	Húmedo
90	-74,50169	3,4929	122,9324528	Húmedo
91	-74,47662	2,51508	162,6173085	Superhúmedo
92	-75,52965	2,51508	126,288899	Húmedo
93	-72,54606	2,51508	97,63933829	Semihúmedo
94	-73,47373	2,51508	103,5850097	Húmedo
95	-67,43134	3,54304	118,0670812	Húmedo
96	-68,4593	3,51797	118,7733517	Húmedo
97	-76,50746	2,54016	124,2778093	Húmedo
98	-77,48528	2,49001	128,1568071	Húmedo



				T
99	-80,4814	-2,50562	132,0448938	Húmedo
100	-79,50358	-2,50562	133,8474697	Húmedo
101	-77,52288	-3,48343	129,7718359	Húmedo
102	-79,50358	-3,5085	155,4577446	Húmedo
103	-75,46697	-2,48054	127,2092411	Húmedo
104	-74,51422	-2,45547	131,1044635	Húmedo
105	-77,52288	-2,53069	129,5688764	Húmedo
106	-76,52	-2,50562	118,3944923	Húmedo
107	-71,43035	-3,48343	117,5685156	Húmedo
108	-72,48338	-3,48343	125,5385408	Húmedo
109	-79,52866	-4,51139	130,3526997	Húmedo
110	-70,47761	-3,48343	136,7989033	Húmedo
111	-75,51711	-3,5085	141,7977483	Húmedo
112	-76,46985	-3,5085	138,4539255	Húmedo
113	-73,53641	-3,48343	130,871682	Húmedo
114	-74,51422	-3,5085	92,58273343	Semihúmedo
115	-72,50845	-4,48632	119,8895043	Húmedo
116	-73,51134	-4,48632	123,1773043	Húmedo
117	-70,52775	-4,48632	158,5664063	Húmedo
118	-71,48049	-4,48632	133,9516946	Húmedo
119	-76,49493	-4,48632	125,1192773	Húmedo
120	-77,52288	-4,48632	127,5899503	Húmedo
121	-74,5393	-4,51139	132,3141928	Húmedo
122	-75,54218	-4,48632	133,8799752	Húmedo
123	-68,52198	-4,46125	140,3747113	Húmedo
124	-69,52486	-4,48632	148,1047357	Húmedo
125	-67,49402	-4,48632	146,130184	Húmedo
126	-72,49592	-0,44343	130,1033545	Húmedo
127	-73,44866	-0,4685	106,9746051	Húmedo
128	-70,49014	-0,44343	100,3411421	Húmedo
129	-71,5181	-0,41836	169,48641	Superhúmedo
130	-76,53253	-0,44343	146,3522814	Húmedo
131	-77,43513	-0,44343	131,6447006	Húmedo
132	-74,50169	-0,4685	130,8520921	Húmedo
133	-75,50457	-0,44343	132,2199412	Húmedo
134	-78,52577	-1,45259	133,0592029	Húmedo
135	-79,50358	-1,47766	135,411478	Húmedo
136	-76,46985	-1,45259	138,0234183	Húmedo
137	-77,49781	-1,45259	141,0655105	Húmedo
138	-68,50944	-0,4685	140,9463033	Húmedo
139	-69,56247	-0,44343	125,8979646	Húmedo



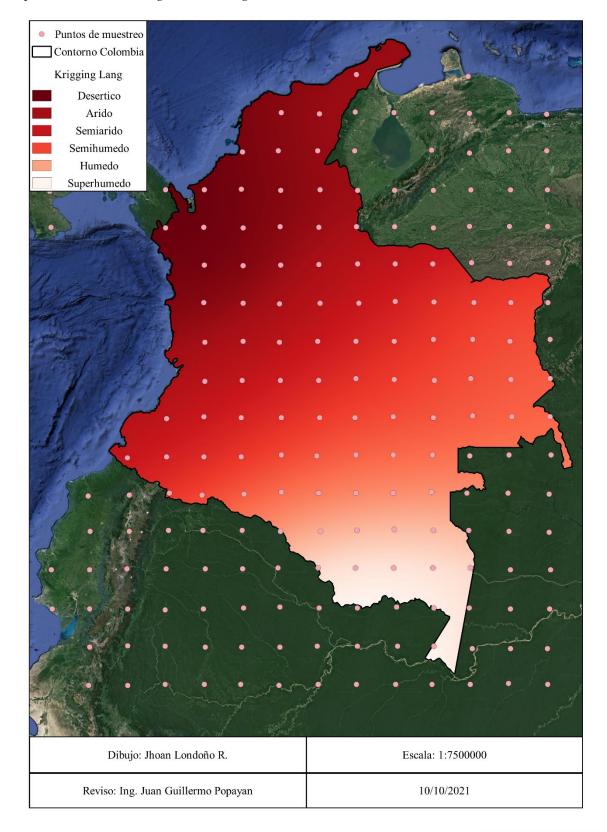
140	-80,50647	-1,47766	34,44639735	Árido
141	-67,45641	-0,49358	97,2104008	Semihúmedo
142	-70,50268	-1,42751	103,176369	Húmedo
143	-71,53064	-1,42751	183,7160107	Superhúmedo
144	-68,47183	-1,47766	147,4247947	Húmedo
145	-69,52486	-1,42751	134,1801687	Húmedo
146	-74,56437	-1,42751	136,3104413	Húmedo
147	-75,49204	-1,45259	137,6121199	Húmedo
148	-72,53352	-1,42751	134,8144537	Húmedo
149	-73,51134	-1,42751	133,8310383	Húmedo
150	-71,45542	-2,45547	134,3665219	Húmedo
151	-70,47761	-2,48054	133,8116864	Húmedo
152	-73,48627	-2,48054	127,7589196	Húmedo
153	-72,48338	-2,48054	118,0251045	Húmedo
154	-67,44388	-2,50562	109,9976094	Húmedo
155	-67,4188	-1,47766	116,2403222	Húmedo
156	-69,54994	-2,48054	121,940463	Húmedo
157	-68,47183	-2,50562	126,8607584	Húmedo
158	-73,5246	9,52301	129,3040889	Húmedo
159	-74,55652	9,52301	131,6779734	Húmedo
160	-70,53828	9,53865	138,1000124	Húmedo
161	-72,55522	9,52301	136,5487161	Húmedo
162	-68,4979	7,53735	129,9028016	Húmedo
163	-69,54545	7,53735	136,0807524	Húmedo
164	-75,49463	9,49174	151,8519263	Húmedo
165	-67,49725	7,53735	72,5656615	Semihúmedo
166	-71,5233	10,52366	28,24084238	Árido
167	-70,52265	10,52366	54,53700009	Semiárido
168	-72,50831	11,52431	124,1468773	Húmedo
169	-72,53958	10,5393	119,7470005	Húmedo
170	-67,5207	9,52301	112,9576486	Húmedo
171	-68,52135	9,52301	125,8268023	Húmedo
172	-68,50571	10,52366	132,7706709	Húmedo
173	-67,5214	10,4832	125,1105105	Húmedo
174	-70,50701	6,55234	119,7636618	Húmedo
175	-69,49073	6,58361	116,0955807	Húmedo
176	-72,47704	6,55234	46,65842262	Semiárido
177	-71,49203	6,55234	106,3884185	Húmedo
178	-74,47834	10,52366	104,7990976	Húmedo
179	-73,47769	10,49239	103,7789235	Húmedo
180	-68,49008	6,56797	109,3083624	Húmedo



Ī	181	-67,48943	6,58361	116,0358801	Húmedo
-	182	-68,45881	5,53605	110,8262026	Húmedo
-	183	-67,48943	5,53605	108,6094751	Húmedo
	184	-70,47574	5,55169	107,6511921	Húmedo
	185	-69,42819	5,53605	107,0770149	Húmedo
	186	-74,49398	6,52107	106,1946936	Húmedo
	187	-73,49333	6,5367	104,4530319	Húmedo



**Figura 11.**Mapa del Índice de Lang obtenido según análisis de datos satelitales.





Según lo anterior se puede calcular el porcentaje de predominancia de cada clima en el área de estudio, definiendo el clima húmedo como el predominante con un 66.3% de los puntos reportando índices dentro del rango de este clima, continuando con el clima semihúmedo con 19.8%, semiárido con 5.9%, superhúmedo con 4.8%, árido con 3.2% y finalmente el clima desértico con 0% de incidencia debido a que este clima se presenta únicamente en la alta Guajira y según el IDEAM el clima desértico solo representa el 0.1% de distribución entre los climas cálidos del área de Colombia (IDEAM, 2015), sumándole a esto el tamaño del pixel según la resolución de imagen del satélite el cual promedia los datos en el área del pixel por lo que en el área de la alta Guajira se tomaron además de los datos de esta, los datos de sus áreas aledañas por lo que no se presentan cálculos del Índice de Lang en el rango de clima desértico.

## 12.2 Rango de caracterización de salida difusa

Tomando en cuenta los resultados obtenidos de la distribución de climas en Colombia por medio del Índice de Lang y usando definiciones climáticas dadas por el IDEAM (IDEAM, 2015), se realizaron los rangos según el porcentaje de incidencia de cada clima y teniendo en cuenta la hipótesis de "más cercano a 0, más seco y caluroso; más cercano a 1, más húmedo", de esta forma se encontró la predominancia del clima húmedo con 66.3%, presentando una gran diferencia en comparación a los otros climas presentados, como el clima semihúmedo con 19.8%, semiárido con 5.9%, superhúmedo con 4.8%, árido con 3.2% y finalmente el clima desértico con 0% debido a su baja incidencia aun en el área de Colombia, de esta forma, el clima húmedo tendrá el rango más amplio para la caracterización de los resultados difusos (Defuzzificacion) basándose en el método de valor de influencia, asumiendo que, cualquier otra investigación con la misma base de datos, lanzara en su mayoría los mismos resultados debido a la relativamente poca variabilidad del clima



en general y en investigaciones menores a dos "normales climatológicas" o 30 años según los nuevos periodos de referencia climática (Organizacion Meteorologica Mundial, 2014).

**Tabla 20.**Tabla de rangos de caracterización para datos de salida difusa.

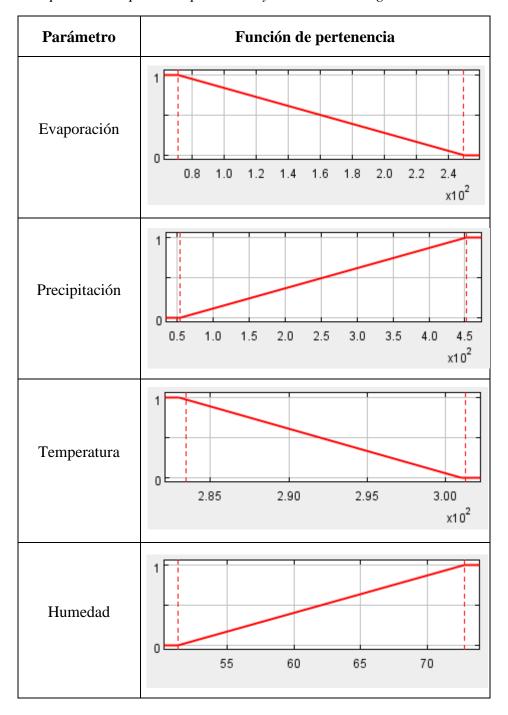
Clima	Rango	
Superhúmedo	0.56986426	0.99964062
Húmedo	0.35795436	0.56986426
Semihúmedo	0.21368447	0.35795436
Semiárido	0.13986967	0.21368447
Árido	0.10695187	0.13986967
Desértico	0	0.10695187

# 12.3 Funciones de pertenencia

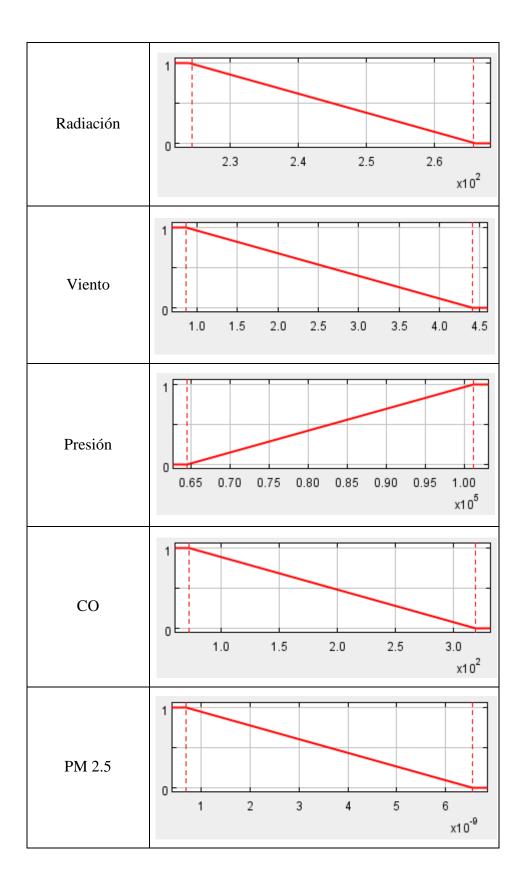
Para el análisis por medio de lógica difusa, es necesario establecer una función de pertenencia a cada parámetro, esta se basa en el comportamiento de este parámetro frente al fenómeno que se planea analizar y dar resultados, para este caso, las funciones se darán en base al comportamiento tentativo que tendría cada parámetro frente al modelo lineal del Índice de Lang, por lo que se tomara en cuenta la caracterización hecha anteriormente para la determinación de las funciones de pertenencia.



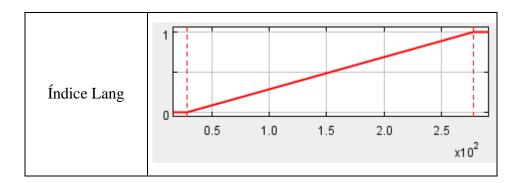
**Tabla 21.**Funciones de pertenencia por cada parámetro y el índice de Lang.











Nota: los parámetros mostrados en la tabla fueron los únicos usados en la fusión de datos del software GeoFis, debido a la existencia de estos en la ventana de datos tomada con una frecuencia mensual y resolución de por lo menos 1° en la imagen satelital.

### 12.4 Resultados difusos

En el análisis del índice de Lang mediante el software GeoFis, se usó el parámetro WAN para determinar los pesos de cada parámetro en el cálculo del resultado difuso basado en el índice de Lang, los resultados de los pesos asignados se pueden ver en las figuras 12, 13,14 y 15.

**Figura 12.**Pesos asignados a cada parámetro del índice biológico según la estructura de Mamdani.

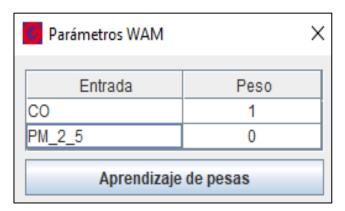
Parámetros WAM					
Entrada	Peso				
EVAPORACION	0				
PORCEN_HUMED	0				
PRECIPITACION	0,68				
TEMPERATURA 0,32					
Aprendizaje de pesas					



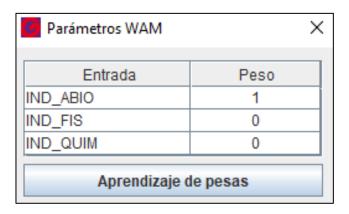
**Figura 13.**Pesos asignados a cada parámetro del índice físico según estructura de Mamdani.

Parámetros WAM	×			
Entrada	Peso			
PRES_ATM	0			
RADIACION	1			
VEL_VIENTO	0			
Aprendizaje de pesas				

**Figura 14.**Pesos asignados a cada parámetro del índice químico según estructura de Mamdani.



**Figura 15.**Pesos asignados a cada índice según estructura de Mamdani.





Como se pudo observar en las anteriores figuras, el software solo tomo en cuenta el parámetro de temperatura y precipitación al compararlo con el índice de Lang, algo que se puede deducir debido a la dependencia directa del índice exclusivamente de estos dos parámetros y teniendo en cuenta que el software busca relaciones entre los datos para elegir una manera de correlacionarlos, debido a esto se pensó que los resultados fueran iguales entre el índice difuso y el índice de Lang, algo que sorprendentemente no ocurrió como se muestra en la tabla 22.

**Tabla 22.**Comparación de cantidad de puntos por cada clima entre el índice de Lang y el índice difuso.

Clima	No. Puntos Lang	No. Puntos difusos
Superhúmedo	9	3
Húmedo	124	108
Semihúmedo	37	54
Semiárido	11	15
Árido	6	3
Desértico	0	4
Total	187	187

Según lo anterior, se nota cambios en cada clima, pasando de 4.8% a 1.6% para el clima superhúmedo, 66.3% a 57.8% para el clima húmedo, 19.8% a 28.9% para clima semihúmedo, 5.9% a 8% para clima semiárido, 3.2% a 1.6% para clima árido y de un 0% a un 2.1% para el clima desértico, generando de esta forma el mapa de la figura 16. Con información proveniente de la tabla 23.

**Tabla 23.**Resultado del cálculo del índice difuso.

X	Y	Índice difuso	Clima
-79.53	-4.51	0.429472449	Húmedo
-78.51	-4.51	0.352128038	Semihúmedo
-74.54	-4.51	0.434658656	Húmedo
-77.52	-4.49	0.419544212	Húmedo
-76.49	-4.49	0.412673832	Húmedo
-75.54	-4.49	0.442089795	Húmedo
-73.51	-4.49	0.391231763	Húmedo
-72.51	-4.49	0.384209709	Húmedo
-71.48	-4.49	0.441831105	Húmedo
-70.53	-4.49	0.51337927	Húmedo
-69.52	-4.49	0.492573218	Húmedo
-67.49	-4.49	0.487854627	Húmedo
-68.52	-4.46	0.464502774	Húmedo
-69.47	-3.55	0.234702512	Semihúmedo
-68.47	-3.55	0.353329634	Semihúmedo
-67.5	-3.55	0.203948632	Semiárido
-79.5	-3.51	0.504045336	Húmedo
-76.47	-3.51	0.460784974	Húmedo
-75.52	-3.51	0.470470528	Húmedo
-74.51	-3.51	0.302642309	Semihúmedo
-77.52	-3.48	0.429877577	Húmedo
-73.54	-3.48	0.43434633	Húmedo
-72.48	-3.48	0.412199378	Húmedo
-71.43	-3.48	0.385860727	Húmedo
-70.48	-3.48	0.452309729	Húmedo
-78.51	-3.47	0.302686179	Semihúmedo
-77.52	-2.53	0.421012906	Húmedo
-80.48	-2.51	0.43673049	Húmedo
-79.5	-2.51	0.442707912	Húmedo
-78.51	-2.51	0.384919365	Húmedo
-76.52	-2.51	0.389616845	Húmedo
-68.47	-2.51	0.419219096	Húmedo
-67.44	-2.51	0.360374659	Húmedo
-75.47	-2.48	0.403027158	Húmedo
-73.49	-2.48	0.423151772	Húmedo
-72.48	-2.48	0.38900132	Húmedo
-70.48	-2.48	0.443942694	Húmedo



-69.55	-2.48		Húmado
-74.51	-2.46	0.402399913 0.412684371	Húmedo Húmedo
-74.31	-2.46	0.445401875	Húmedo
-80.51	-2.40	0.108212631	Árido
-79.5		0.108212031	Húmedo
	-1.48		
-68.47	-1.48	0.48774782	Húmedo
-67.42	-1.48	0.382594144	Húmedo
-78.53	-1.45	0.439752357	Húmedo
-77.5	-1.45	0.469193786	Húmedo
-76.47	-1.45	0.457728143	Húmedo
-75.49	-1.45	0.455376803	Húmedo
-74.56	-1.43	0.450739842	Húmedo
-73.51	-1.43	0.442937591	Húmedo
-72.53	-1.43	0.44586637	Húmedo
-71.53	-1.43	0.584121295	Superhúmedo
-70.5	-1.43	0.354728018	Semihúmedo
-69.52	-1.43	0.443586131	Húmedo
-67.46	-0.49	0.320570293	Semihúmedo
-79.49	-0.47	0.302344393	Semihúmedo
-78.46	-0.47	0.367770386	Húmedo
-74.5	-0.47	0.432105543	Húmedo
-73.45	-0.47	0.350715223	Semihúmedo
-68.51	-0.47	0.469179701	Húmedo
-77.44	-0.44	0.434715665	Húmedo
-76.53	-0.44	0.482465327	Húmedo
-75.5	-0.44	0.436682538	Húmedo
-72.5	-0.44	0.43196714	Húmedo
-70.49	-0.44	0.348555407	Semihúmedo
-69.56	-0.44	0.416580107	Húmedo
-71.52	-0.42	0.515922509	Húmedo
-79.54	0.46	0.307752036	Semihúmedo
-78.46	0.48	0.500026984	Húmedo
-76.56	0.48	0.249284379	Semihúmedo
-75.45	0.51	0.269418767	Semihúmedo
-67.46	0.51	0.478010609	Húmedo
-77.41	0.53	0.492339397	Húmedo
-73.5	0.53	0.256438457	Semihúmedo
-72.52	0.53	0.314712962	Semihúmedo
-71.54	0.53	0.305162236	Semihúmedo
-69.61	0.53	0.340111668	Semihúmedo
-68.53	0.53	0.62562451	Superhúmedo
-78.46 -74.5 -73.45 -68.51 -77.44 -76.53 -75.5 -72.5 -70.49 -69.56 -71.52 -79.54 -78.46 -76.56 -75.45 -67.46 -77.41 -73.5 -72.52 -71.54 -69.61	-0.47 -0.47 -0.47 -0.47 -0.44 -0.44 -0.44 -0.44 -0.42 -0.46 -0.48 -0.51 -0.51 -0.53 -0.53 -0.53 -0.53 -0.53 -0.53 -0.53	0.367770386 0.432105543 0.350715223 0.469179701 0.434715665 0.482465327 0.436682538 0.43196714 0.348555407 0.416580107 0.515922509 0.307752036 0.500026984 0.249284379 0.269418767 0.478010609 0.492339397 0.256438457 0.314712962 0.305162236 0.340111668	Húmedo Húmedo Semihúmedo Húmedo Húmedo Húmedo Húmedo Húmedo Húmedo Semihúmedo Húmedo Semihúmedo



-74.48	0.56	0.252492908	Semihúmedo
-70.54	0.56	0.393138528	Húmedo
-78.51	1.46	0.196118798	Semiárido
-77.49	1.49	0.267244945	Semihúmedo
-76.51	1.49	0.157346079	Semiárido
-75.53	1.49	0.138826447	Árido
-73.55	1.51	0.150885916	Semiárido
-69.54	1.51	0.042828717	Desértico
-74.48	1.54	0.210874085	Semiárido
-74.48	1.54	0.340067642	Semihúmedo
-72.52	1.54	0.340007042	Semiárido
-71.54	1.54	0.173796574	Semiárido
-68.51	1.54	0.091906076	Desértico
-67.41 -77.49	1.54	0.31398624	Semihúmedo
	2.49	0.423167956	Húmedo
-75.53	2.52	0.398499624	Húmedo
-74.48	2.52	0.51993305	Húmedo
-73.47	2.52	0.343330236	Semihúmedo
-72.55	2.52	0.335562168	Semihúmedo
-70.49	2.52	0.243921276	Semihúmedo
-76.51	2.54	0.409311341	Húmedo
-71.54	2.54	0.210443306	Semiárido
-68.43	2.54	0.181871386	Semiárido
-67.43	2.54	0.165340227	Semiárido
-69.46	2.57	0.142784178	Semiárido
-76.48	3.47	0.399284383	Húmedo
-75.5	3.49	0.389226921	Húmedo
-74.5	3.49	0.406267247	Húmedo
-73.5	3.49	0.402247201	Húmedo
-70.47	3.49	0.366912553	Húmedo
-71.52	3.52	0.365622061	Húmedo
-68.46	3.52	0.390677227	Húmedo
-72.52	3.54	0.494256207	Húmedo
-69.51	3.54	0.371477856	Húmedo
-67.43	3.54	0.388513158	Húmedo
-76.48	4.5	0.824040113	Superhúmedo
-74.53	4.5	0.421366652	Húmedo
-75.48	4.52	0.49357599	Húmedo
-73.52	4.52	0.361293037	Húmedo
-72.52	4.52	0.411076431	Húmedo
-71.52	4.52	0.331893126	Semihúmedo



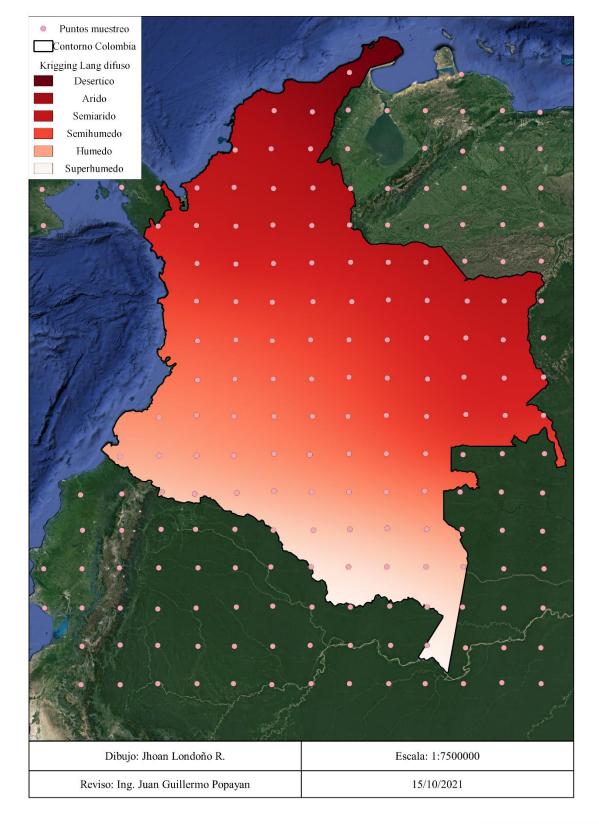
-68.48	4.52	0.359921103	Húmedo	
-70.49	4.57	0.335879069	Semihúmedo	
-69.46	4.57	0.407845349	Húmedo	
-67.43	4.57	0.354741025	Semihúmedo	
-74.53	5.5	0.353255828	Semihúmedo	
-74.33	5.52	0.460452358	Húmedo	
-73.46	5.52	0.510894651	Húmedo	
-73.46	5.52	0.551116809	Húmedo	
-72.43 -76.51	5.54	0.331110809	Semihúmedo	
+				
-69.43	5.54	0.349683724	Semihúmedo	
-68.46	5.54	0.362446675	Húmedo	
-67.49	5.54	0.354836286	Semihúmedo	
-70.48	5.55	0.35162241	Semihúmedo	
-71.49	5.57	0.398592286	Húmedo	
-75.48	6.51	0.062650873	Desértico	
-76.5	6.52	0.324225642	Semihúmedo	
-74.49	6.52	0.346565906	Semihúmedo	
-73.49	6.54	0.340452073	Semihúmedo	
-72.48	6.55	0.211329889	Semiárido	
-71.49	6.55	0.349483316	Semihúmedo	
-70.51	6.55	0.394099182	Húmedo	
-68.49	6.57	0.357679581	Semihúmedo	
-69.49	6.58	0.381528886	Húmedo	
-67.49	6.58	0.380987846	Húmedo	
-77.51	7.5	0.210605212	Semiárido	
-75.48	7.5	0.223100335	Semihúmedo	
-70.49	7.5	0.365788979	Húmedo	
-80.51	7.51	0.269628186	Semihúmedo	
-76.51	7.51	0.243777187	Semihúmedo	
-73.49	7.51	0.397512441	Húmedo	
-74.51	7.53	0.222645847	Semihúmedo	
-72.51	7.53	0.423626045	Húmedo	
-71.51	7.53	0.351450074	Semihúmedo	
-69.55	7.54	0.449664406	Húmedo	
-68.5	7.54	0.429228179	Húmedo	
-67.5	7.54	0.259568488	Semihúmedo	
-80.55	8.46	0.346767374	Semihúmedo	
-74.49	8.48	0.371071894	Húmedo	
-72.48	8.48	0.296693867	Semihúmedo	
-71.51	8.48	0.317723877	Semihúmedo	
-70.49	8.48	0.359004983	Húmedo	



-77.51	8.5	0.237391716	Semihúmedo	
-76.5	8.5	0.559535233	Húmedo	
-73.46	8.5	0.31216924	Semihúmedo	
-69.51	8.5	0.248877896	Semihúmedo	
-68.47	8.5	0.12342735	Árido	
-67.5	8.5	0.195256558	Semiárido	
-78.47	8.51	0.236075359	Semihúmedo	
-75.53	8.51	0.487322233	Húmedo	
-69.55	9.46	0.358050918	Húmedo	
-79.53	9.49	0.268311629	Semihúmedo	
-75.49	9.49	0.492128225	Húmedo	
-74.56	9.52	0.435067264	Húmedo	
-73.52	9.52	0.427248488	Húmedo	
-72.56	9.52	0.45178263	Húmedo	
-68.52	9.52	0.415027541	Húmedo	
-67.52	9.52	0.370662362	Húmedo	
-70.54	9.54	0.457227624	Húmedo	
-67.52	10.48	0.412595908	Húmedo	
-73.48	10.49	0.338615653	Semihúmedo	
-69.55	10.5	0.367072605	Húmedo	
-74.48	10.52	0.342563436	Semihúmedo	
-71.52	10.52	0.099432782	Desértico	
-70.52	10.52	0.223583618	Semihúmedo	
-68.51	10.52	0.439160553	Húmedo	
-72.54	10.54	0.394255694	Húmedo	
-69.58	11.47	0.155445796	Semiárido	
-72.51	11.52	0.407587657	Húmedo	



**Figura 16.**Mapa del índice difuso obtenido según análisis por lógica difusa.





# 12.5 Prueba t Student para muestras pareadas

Se generan las hipótesis:

H<sub>0</sub>: No existen diferencias entre los dos grupos de datos.

H<sub>1</sub>: Existen diferencias entre los dos grupos de datos.

Se compararon los dos grupos de datos obtenidos de un mismo grupo de datos iniciales para determinar si existen diferencias notables mediante la prueba t Student, la cual arrojo los datos mostrados en la tabla 24.

**Tabla 24.**Resultados de la prueba t Student para muestras emparejadas.

Prueba t para medias de dos muestras emparejadas α=0.05					
	Lang común	Lang difuso			
Media	0.00864571	0.85653115			
Varianza	1.0761E-05	1.20022424			
Observaciones	187	187			
Coeficiente de correlación de Pearson	0.02113305				
Diferencia hipotética de las medias	0				
Grados de libertad	186				
Estadístico t	-10.5840606				
P(T<=t) una cola	4.3038E-21				
Valor crítico de t (una cola)	1.65308714				
P(T<=t) dos colas	8.6076E-21				
Valor crítico de t (dos colas)	1.97280011				

Para este caso, se tomó el valor critico de t y la probabilidad de una cola debido a la existencia de dos hipótesis excluyentes que determinan su semejanza o diferencia.



Según los datos de la tabla 24, se toma decisión de rechazar la hipótesis nula H<sub>0</sub>, debido a la ubicación del valor estadístico t en el área de rechazo negativa, decisión justificada además por el valor del estadístico t unilateral, el cual es mucho menor al valor α tomado para el análisis, de esta forma, se acepta la hipótesis alternativa H<sub>1</sub> considerando estadísticamente la existencia de diferencias entre los dos grupos de datos referentes al índice de Lang y al índice difuso respectivamente.



#### 13. CONCLUSIONES

Fue posible recolectar los datos necesarios sobre cada uno de los parámetros climáticos por medio del satélite de la NASA, a excepción de los datos de altitud, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> de los cuales no se pudo extraer suficiente información que fuera confiable en cuanto a la resolución de las imágenes satelitales.

Se lograron analizar los datos obtenidos por medio del índice de Lang teniendo en cuenta su simplicidad en su procedimiento y sus rangos de caracterización del clima según el resultado; basta con utilizar únicamente dos variables (temperatura y precipitación) para clasificar los climas de una determinada región. El clima húmedo resultó ser el predominante con un 66.3% de los puntos reportados dentro del rango de este clima, seguido del clima semihúmedo con 19,9%, semiárido con 5,9%, superhúmedo con 4,8%, árido con 3,2% y finalmente el clima desértico con 0% de incidencia debido a que este clima se presenta únicamente en la Guajira y representa una extensión pequeña de área la cual se pierde información debido a la resolución de las imágenes satelitales. En el análisis del índice de Lang mediante el software GeoFis, se usó el parámetro WAN para determinar los pesos de cada parámetro en el cálculo del resultado difuso basado en el índice de Lang.

El software solo tomó en cuenta el parámetro de temperatura y precipitación al compararlo con el índice de Lang, algo que se puede deducir debido a la dependencia directa del índice exclusivamente de estos dos parámetros y teniendo en cuenta que el software busca relaciones entre los datos para elegir una manera de correlacionarlos, debido a esto se pensó que los resultados fueran iguales entre el índice difuso y el índice de Lang, algo que se refuto con el análisis de la prueba t student para muestras pareadas.



#### 14. RECOMENDACIONES

- Usar como base de aprendizaje del software índices climáticos que dependan de más de dos parámetros o que posean una constante como el índice de Martonne o el cociente de Emberger para evitar una correlación completa de los datos usados para el índice y los datos dados al software y lograr la inclusión de más parámetros en el análisis.
- Usar imágenes satelitales de mayor resolución para lograr obtener puntos de recolección de datos mas cercanos, aumentando así la precisión de los resultados y la influencia de cada uno en la interpolación.
- Usar métodos de interpolación que no generen focos de concentración de datos como la interpolación de Kriging, para generar mapas de grandes extensiones.
- Usar aprendizaje automático de pesos para los parámetros introducidos al software, para evitar el sesgo en el análisis introducido por la determinación de pesos manual basada en grupos de expertos.
- Evitar el uso de parámetros de verdadero o falso (1 o 0) debido al sesgo que genera en el análisis, por las funciones de pertenencia asignadas a estos parámetros y la clara influencia de estos con la lógica clásica, el cual obstaculizan el desarrollo de un sistema difuso.



### REFERENCIAS

- Arango, A., Velazquez, J., & Franco, C. (24 de Julio de 2014). Tecnicas de logica fidusa en la prediccion de indices de mercados de valores: Una revision de literatura. *Revista Ingenierias*, 12(22). doi:10.22395
- Buitrago, D. (2018). Propuesta de una metodología con base en la lógica difusa para explicar los razonamientos de tipo Sorites. *Revista Colombiana de filosofia de la ciencia*, 18(36), 39-69. doi:https://doi.org/10.18270/rcfc.v18i36.2273
- Cabrera, J. A. (2013). Lógica clásica y Lógica difusa: Fcetas que las caracterizan. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca.
- Castañeda, T. P. (14 de Julio de 2014). ZONIFICACIÓN CLIMATOLÓGICA SEGÚN EL MODELO CALDAS-LANG DE LA CUENCA RIO NEGRO MEDIANTE EL USO DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA SIG. Bogotá, Cundinamarca, Colombia: Universidad Militar Nueva Granada. Obtenido de http://hdl.handle.net/10654/11701
- CLIMATE DATA. (2019). VALLE DEL CAUCA CLIMA. ECMWF Data.
- dos Santos, R., Lima, M. D., & Leal, S. R. (2018). BALANÇO HÍDRICO E CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN E THORNTHWAITE NO MUNICÍPIO DE FEIRA DE SANTANA (BA). (U. d. Janeiro, Ed.) *Geo UERJ*(33), 17. doi:10.12957/geouerj.2018.34159
- Duarte. (2003). Evaporación y evapotranspiración. Tecnología de tierras y aguas I.
- Duarte, O. G. (2000). Aplicaciones de la Lógica Difusa. *Revist Ingeniería e Investigación No. 45*, 1-8.



- ELBIBLIOTE. (2011). Clima. www.elbibliote.com.
- Electrical Technolgy. (2018). What is Fuzzy Logic System?
- Enciso, M., Acosta, A., & Campo, J. (27 de Febrero de 2013). Scielo. *Ensayos sobre politica economica*, 31(71). Recuperado el 12 de Febrero de 2022, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S0120-44832013000200005
- Escardó, A. L. (2010). *Clima y cambio climático*. Madrid: Revista del Aficionado a la Meteorología.
- Gan Acosta, A., Gan Cuba, W., & Figueroa Cuello, A. N. (2008). *Exactitud y precision en inegeniería*. Pamplona: Revista Colombiana Tecnologías de Avanzada.
- García, E. (1964). *Modificaciones al sistema de clasificación climatica de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la Republica Mexicana*. México, D.F., México: Offset Larios S.A.

  Obtenido de https://www.igg.unam.mx/geoigg/biblioteca/archivos/memoria/20190917100949.pdf
- García, E. R., Benjamín, F. G., & Bello, P. R. (2014). *Evaluación del impacto de la capacitación con lógica difusa*. Cuba: Universidad de Sancti Spíritus.
- Gonzalez, L., & Espinoza, M. (2015). Aplicacion educativa de la logica difusa a la situacion ambiental del humedal Cauquita. *Ingenium*, *9*(23), 49-57. Obtenido de https://repository.usc.edu.co/bitstream/handle/20.500.12421/770/APLICA~1.PDF;jsessio nid=3CBBD34127B03D5E3F1D84E0D7230B5F?sequence=1
- Guillaume, S., & Charnomordic, B. (6 de Abril de 2011). Learning interpretable fuzzy inference systems with FisPro. *Information Sciences*, 19.



- Hernández, C. M., Ordoñez, D. M., & Giménez de Azcárate, J. (Abril de 2018). Análisis comparativo de dos sistemas de clasificación. (I. d. UNAM, Ed.) *Investigaciones Geográficas*(95). doi:10.14350/rig.57451
- Hernández, J. (2000). *Manual de métodos y criterios para la evaluación y monitoreo de la flora y vegetación*. Ciudad de Chile: Académico de la facultad de ciencias forestales y agronómicas, unversidad de Chile.
- IDEAM. (2015). *Clasificacion de los climas*. IDEAM. Obtenido de http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/clima-text.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2014). *Clasificación de los climas*.

  Atlas interactivo .
- Inzunza, J. (2006). Temperatura. Meteorología descriptiva.
- Jiménez, I. C. (2015). Lógica Difusa. UNP PROEDUNP-PAITA.
- Knutson, T., Kossin, J., Mears, C., Perwitz, J., & Wehner, M. (2017). Detection and attribution of climate change. En *Fourth National Climate Assessment* (Vol. 1, págs. 114-132).
  Washington, United States of America: U.S. Global Change Research Program. doi:10.7930/j01834ND
- Köppen, W. (1948). *Climatología: con un estudio de los climas de la tierra*. México: Fondo de Cultura Economica.
- L., E. M. (2007). *Definiciones de humedad y su equivalencia*. El Márquez: Centro Nacional de Metrología, División de Termometría.



- Leff, E. (31 de Julio de 2012). La complejidad ambiental. (C. d. CISPO, Ed.) *Polis*(16). Obtenido de http://journals.openedition.org/polis/4605
- Lozano, R. W. (2018). Clima, hidrología y meteorología (1 ed.). Colombia.
- Martines, E. (2007). *DEFINICIONES DE HUMEDAD Y SU EQUIVALENCIA*. El Márquez: Centro Nacional de Metrología, División de Termometría.
- Martinez, M. (2016). Radiación solar conceptos y aplicaciones. Arica : Instituto de investigaciones agropecuarias centro de investigación especializado en agricultura del desierto y altiplano. INIA URURI Región de Arica y Parinacota Ministerio de Agricultura.
- Meteo Navarra. (s.f.). *meteo.navarra.es*. Obtenido de navarra.es: http://meteo.navarra.es/definiciones/koppen.cfm#:~:text=Creada%20iniciamente%20por %20el%20climat%C3%B3logo,las%20temperaturas%20y%20las%20precipitaciones.
- MeteoSim. (2 de Abril de 2020). Modelos Globales y Regionales de Cambio Climatico. Barcelona, España. Obtenido de https://www.meteosim.com/es/modelos-globales-regionales-cambio-climatico/
- Organizacion Meteorologica Mundial. (9 de Julio de 2014). *Organizacion Meteorologica Mundial*. Recuperado el 24 de 09 de 2021, de https://public.wmo.int/es/media/press-release/no-997-%E2%80%93-los-cient%C3%ADficos-instan-que-se-actualicen-con-m%C3%A1s-frecuencia-los



- Ortiz, M., & Oramas, O. (Enero de 2015). Biblioteca digital Universidad de San Buenaventura.

  \*Revista Gestion & Desarrollo: Administracion de negocios, contaduria publica y economia, 12(1). Obtenido de http://hdl.handle.net/10819/5272
- OXFORD. (31 de 05 de 2021). lexico. Obtenido de lexico: https://www.lexico.com/es/definicion/difuso
- Raffino, M. E. (2020). Presión. Ciudad de Argentina: etecé.
- Rebato, C. (2020). Descubre la relación entre las redes neuronales artificiales, la inteligencia artificial y el eHealth. Think Big.
- Rodríguez, M. A. (2017). *Trabajo práctico de climatología: aplicación de índices y clasificaciones*. Universidad de la Rioja, servicio de publicaciones.
- Sánchez, S. N., & Garduño, R. (2008). Algunas consideraciones acerca de los sitemas de clasificación climática. Dep. El Hombre y su Ambiente. UAM-Xochimilco & Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM.
- Science & Information for a Climate-Smart Nation. (2014). *How do scientists classify different types of climate?* NOAA Freedom of information Act.
- Segura, J., & Obregon, N. (1 de Noviembre de 2005). Un modelo de logica difusa y conjuntos difusos para el pronostico de los niveles medios diarios del rio Magdalena, en la estacion limnigrafica de Puerto Salgar, Colombia. *Revista de Ingenieria*(22), 112-117. doi:10.16924
- Soneira, M., Perez-Pueyo, R., & Ruiz-Moreno, S. (Julio de 2002). Raman spectra enhancement with a fuzzy logic approach. *Journal of raman spectroscopy*, *33*(8), 599-603. doi:10.1002/jrs.885



- Strahler, N. A., & Strahler, H. A. (Marzo de 1994). *Geografía Física* (3 ed.). Barcelona, España: Ediciones Omega.
- Thornthwaite, C. W. (Enero de 1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94.
- UNNE. (31 de 05 de 2021). *Algoritmos* . Obtenido de Algoritmos : http://ing.unne.edu.ar/pub/informatica/Alg\_diag.pdf
- Vélez, U. J., Orozco, A. M., Duque, M. N., & Aristizábal, Z. B. (2015). Entendimiento de fenómenos ambientales mediante análisis de datos. Universidad Nacional de Colombia.
  Manizales: Seccion de Publicaciones e Imagen. Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales.
- Weatherbase. (2021). Köppen Classification: Tropical Rainforest Climate. Cali: WEATHER.
- Yue, T. L. (2001). Changes of Holdridge life zone diversity in all of China over half a century. *Ecological Modelling*, 153-162.
- Zurada, J. (2013). *Introduction to Artificial Neural Systems*. Los Angeles: West Publishing Company.

