

Artículo de Investigación

# Modelo matemático predictor del cambio climático aplicado a la granja el Tibar de la universidad de Cundinamarca

## A mathematical model for predicting climate change applied to the el Tibar farm of the university of Cundinamarca

**Guillermo León Murcia<sup>1</sup>:** Universidad de Cundinamarca, Colombia

[gleonm@ucundinamarca.edu.co](mailto:gleonm@ucundinamarca.edu.co)

**Iván Olimpo Velásquez Parra:** Universidad de Cundinamarca, Colombia

[iovelasquez@ucundinamarca.edu.co](mailto:iovelasquez@ucundinamarca.edu.co)

**Néstor Javier García Guzmán:** Universidad de Cundinamarca, Colombia

[nestorjgarcia@ucundinamarca.edu.co](mailto:nestorjgarcia@ucundinamarca.edu.co)

**Fecha de Recepción:** 18/10/2025

**Fecha de Aceptación:** 19/11/2025

**Fecha de Publicación:** 24/11/2025

### Cómo citar el artículo

León Murcia, G., Velásquez Parra, I. O. y García Guzmán, N. J. (2026). Modelo matemático predictor del cambio climático aplicado a la granja el Tibar de la universidad de Cundinamarca [A mathematical model for predicting climate change applied to the el tibar farm of the university of cundinamarca]. *European Public & Social Innovation Review*, 11, 01-17. <https://doi.org/10.31637/epsir-2026-2071>

### Resumen

**Introducción:** Este estudio destaca la importancia de las matemáticas en la comprensión y predicción de fenómenos naturales, especialmente en el análisis de fluidos atmosféricos, debido a su capacidad para simular interacciones climáticas y anticipar posibles consecuencias. **Metodología:** Se realiza una revisión teórica centrada en la aplicación de modelos matemáticos y físicos al estudio del clima, considerando variables geográficas y atmosféricas. **Resultados:** Se identifican factores clave que influyen en el cambio climático,

<sup>1</sup> **Autor Correspondiente:** Guillermo León Murcia. Universidad de Cundinamarca (Colombia).

como la radiación solar, altitud, topografía y cobertura vegetal. Se discuten conceptos fundamentales como el balance calórico climático, la formación de vientos a partir de la rotación terrestre y el efecto Coriolis. **Discusión:** Se analiza la conexión entre la nubosidad y la lluvia, apoyándose en las ecuaciones de Navier-Stokes como herramienta para describir el comportamiento de los fluidos atmosféricos. Se resalta la dificultad de predecir fenómenos caóticos como la turbulencia, lo que limita la precisión en pronósticos meteorológicos a largo plazo. **Conclusiones:** La meteorología, apoyada en datos geográficos y variables como temperatura, humedad y presión, se consolida como una ciencia clave para la elaboración de modelos climáticos específicos, donde las matemáticas permiten avanzar hacia predicciones más rigurosas y contextualizadas.

**Palabras clave:** clima; modelo matemático; análisis predictivo; datos en tiempo real; ecuaciones de Navier Stokes; lluvia; meteorología; Tíbar.

### Abstract

**Introduction:** This study highlights the importance of mathematics in understanding and predicting natural phenomena, especially in the analysis of atmospheric fluids, due to its ability to simulate climatic interactions and anticipate possible consequences. **Methodology:** A theoretical review is carried out focusing on the application of mathematical and physical models to the study of climate, considering geographical and atmospheric variables. **Results:** Key factors influencing climate change are identified, such as solar radiation, altitude, topography, and vegetation cover. Fundamental concepts such as climate heat balance, wind formation from Earth's rotation, and the Coriolis effect are discussed. **Discussion:** The connection between cloud cover and rainfall is analysed, using Navier-Stokes equations as a tool to describe the behaviour of atmospheric fluids. The difficulty of predicting chaotic phenomena such as turbulence is highlighted, which limits the accuracy of long-term weather forecasts. **Conclusions:** Meteorology, supported by geographical data and variables such as temperature, humidity, and pressure, is consolidating its position as a key science for the development of specific climate models, where mathematics allows for more rigorous and contextualised predictions.

**Keywords:** climate; mathematical model; predictive analysis; real-time data; Navier-Stokes equations; rainfall; meteorology; Tíbar.

## 1. Introducción

En las palabras inmortales de Galileo Galilei, “las matemáticas son el lenguaje con el que Dios ha escrito el Universo”. Este aforismo resuena con particular relevancia en el ámbito de la investigación científica, donde la observación, el cálculo y la formulación de hipótesis convergen para desentrañar los misterios de la naturaleza. Este trabajo se embarca en un viaje a través de la comprensión matemática de fenómenos naturales, centrándose específicamente en el fascinante estudio de los fluidos. Villaman (2011).

Desde tiempos inmemorables, la humanidad ha enfrentado la imprevisibilidad de eventos climáticos, desde el caprichoso comportamiento del viento hasta la danza caótica de las nubes y la lluvia. En este escrito, se explorará la aplicación de modelos matemáticos para entender y predecir el cambio climático, un fenómeno complejo que ha capturado la atención global debido a sus consecuencias potenciales. Vielma, (2003).

El cambio climático, acelerado por la vida moderna, ha impulsado la necesidad de predicciones precisas. Aquí, nos sumergiremos en los avances de la investigación de modelos matemáticos, desentrañando su relevancia, componentes y capacidad para arrojar luz sobre el futuro climático con una confiabilidad probabilística significativa.

Desde el equilibrio calórico hasta la dinámica atmosférica, exploraremos cómo factores como la radiación solar, la topografía y la cobertura vegetal contribuyen al cambio de temperatura y, en última instancia, al clima. Nos sumergiremos en la ecuación de Navier-Stokes, una herramienta esencial que describe el comportamiento de los fluidos, enfrentándonos al desafío que plantea la turbulencia, un enigma aún no completamente resuelto en la comprensión matemática de los flujos atmosféricos.

Además, examinaremos cómo los modelos climáticos se enfrentan al límite de la predictibilidad, un fenómeno que Edward Norton Lorenz exploró en sus investigaciones pioneras sobre la física del caos y los sistemas dinámicos no lineales. A pesar de estos desafíos, se destacará la utilidad vital de los modelos climáticos para comprender las tendencias y proyectar posibles escenarios.

Nos sumergiremos en un enfoque concreto, centrándonos en una unidad ambiental específica que es la Granja el Tibar. Exploraremos sus características geográficas y definiremos variables clave para el modelo climático. La aplicación de ecuaciones de Navier-Stokes y otros conceptos matemáticos será esencial para analizar y predecir los patrones climáticos en esta región particular.

A medida que avanzamos, nos enfrentaremos a la complejidad inherente de la atmósfera, la imprevisibilidad de la turbulencia y las limitaciones en la calidad de las predicciones climáticas. Sin embargo, guiados por la convicción de que las matemáticas son la clave para descifrar los secretos del universo, nos sumergiremos en la búsqueda continua de comprender y prever los caprichosos movimientos de la naturaleza.

## 2. Metodología

La metodología aplicada en la investigación que se desarrollo es mixta, se hace una relación entre observación, cálculo y formulación de hipótesis, generando una importancia de comprender y predecir fenómenos climáticos como un fenómeno complejo y su impacto en la sociedad, explicando la variabilidad climática a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta 11 ítems, entre ellos temperaturas, humedades, punto de rocío, lluviosidad para lo cual se hizo una explicación de la radiación solar, latitud, altitud, topografía y cobertura vegetal.

Se hizo una presentación del balance calórico climático, con la ecuación de Balance Calórico apoyados en el concepto de radiación neta, la influencia del Viento y Efecto Coriolis, el origen del viento y su relación con la rotación de la Tierra, para luego hacer una descripción del efecto Coriolis y su impacto en la dirección del viento, así de este modo se interpretan los datos y se sabe si habrán días Nublados y/o lluviosos basados en la relación entre nubosidad y lluvia, o si se formarán nubes y su conexión con la lluvia, explicando las condiciones climáticas específicas que afectan la conexión usando modelos heurísticos y conceptuales que contienen variables de estudio y componentes de los modelos matemáticos climáticos.

Como asimilación de datos, dinámica atmosférica, parametrizaciones físicas, y posprocesamiento usando ecuaciones de Navier-Stokes y Limitaciones para el punto de aplicación en la granja el Tibar donde se hace una descripción de las limitaciones en la predicción del clima debido a la naturaleza caótica de la atmósfera, basados también en mención de Edward Lorenz y su contribución a la comprensión de la predictibilidad atmosférica desafiando la predicción climática y generar así la necesidad de interpretar los resultados de los modelos climáticos por parte de expertos como Claude Louis Marie Henri Navier y su contribución a la comprensión de los fluidos.

### 3. Resultados

Decía Galileo Galilei que «las matemáticas son el lenguaje con el que Dios ha escrito el Universo». Y según el marco de investigación que se ha desarrollado hasta ahora aunque no hay como demostrarlo Galileo tienen razón, ya que fundamentalmente es necesaria observación y cálculo, observando la naturaleza, trasladando las observaciones a lenguaje matemático y formulando las correspondientes hipótesis para luego aceptarlas o negarlas, que es lo que se desea realizar en este trabajo, ya que cuando se haga esto correctamente se tendrá un modelo de la naturaleza que se desea, según investigaciones en el mundo existen desde el inicio de los tiempos algunos fenómenos que el ser humano no puede controlar, por ejemplo el comportamiento del viento; o la reacción del viento cuando un bólide de fórmula uno pasa y cerca va el contrincante, o la propagación de un incendio, la trayectoria que el caudal de agua seguirá en una posible inundación o la explicación de una trayectoria de un líquido en el techo de una habitación, o las turbulencias tanto aéreas o marinas que suelen ser benéficas o perjudiciales para navegación o simplemente cuando exactamente en mi zona de habitación lloverá, estará nublado o hará frío.

¿Y qué tienen en común todos estos ejemplos? Que son estudio de fluidos, según la RAE “es un adjetivo. Dicho de una sustancia: Que se encuentra en estado líquido o gaseoso.” O mejor aún en clase de física recuerdo las palabras de un profesor “Los fluidos desde un punto de vista fisicoquímico son conjuntos de partículas unidas entre sí por fuerzas débiles que permiten que ante una fuerza externa las posiciones de sus moléculas varíen, fluyan” claro de ahí el nombre se pensó y se estaba en lo cierto y agregando a su definición “es por ello por lo que ocupan el máximo lugar posible”.

El cambio climático debe considerarse un fenómeno complejo que ha preocupado a la sociedad e impulsado predicciones precisas para comprender su evolución y sus posibles consecuencias; así, los modelos matemáticos son fundamental al simular las interacciones climáticas y facilitar la comprensión de los factores que influyen en el clima de la Tierra. Muñoz (2018).

En este artículo, se explorarán los avances en la investigación de modelos matemáticos del cambio climático, centrándonos en su relevancia, sus componentes y su capacidad para predecir el clima futuro con una alta confiabilidad probabilística.

La determinación y comprensión del cambio climático son elementos esenciales para evaluar cómo se están desviando los patrones climáticos normales y cómo esto puede afectar al planeta. La Tierra tiene un clima variable, con cambios que ocurren de manera lenta y continua. Sin embargo, en los últimos dos siglos, el ritmo acelerado de la vida moderna ha impuesto su influencia en el cambio climático global. Pardo (2002).

## ¿Cómo cambia el clima en unas pocas horas?

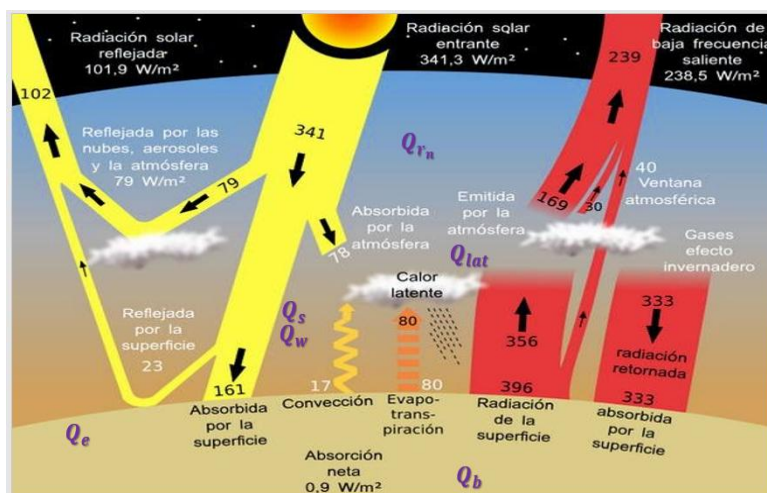
Pizarro (2013) Empecemos por la temperatura del aire, es la medida de la energía cinética promedio de las moléculas de aire, a medida que las moléculas de aire se calientan, se mueven más rápido y la temperatura aumenta por el contrario a medida que las moléculas de aire se enfrían, se mueven más lento y la temperatura disminuye.

Factores como la radiación solar, la latitud, la altitud, la topografía y la cobertura vegetal contribuyen al cambio de temperatura en el aire, Pero ¿cómo?

La radiación solar es la fuente principal de energía para la Tierra, calienta la superficie de la Tierra, que a su vez calienta el aire que la rodea, la latitud tiene un impacto en la temperatura del aire porque los lugares ubicados cerca del Ecuador reciben más radiación solar que los lugares ubicados cerca de los polos, la altitud también afecta la temperatura del aire. El aire se enfría a medida que aumenta la altitud. Por lo tanto, las montañas tienden a tener temperaturas más frías que las tierras bajas. La topografía también puede afectar la temperatura del aire. Las áreas con mucha vegetación tienden a tener temperaturas más frescas que las áreas con poca vegetación. La cobertura vegetal también puede afectar la temperatura del aire ya que absorbe la radiación solar y la convierte en energía química y esto ayuda a enfriar el aire, ahora mismo algo acerca del Balance calórico climático. Sepúlveda (2015).

**Figura 1.**

*Balance climático*



**Fuente:** spanish.peopledaily tomado de <https://acortar.link/BtAvHr>

Sean:

$Q_{rn}$  = cantidad de calor disponible en la superficie

$Q_s$  = Calor sensible

$Q_b$  = Calor biológico

$Q_e$  = Calor edáfico

$Q_{lat}$  = Calor latente

$Q_w$  = Flujos de calor

Al igual que en física la sumatoria de las fuerzas igual a cero, garantizan un equilibrio, aquí lo hace el calor, entonces si consideramos un periodo de tiempo determinado con todos los flujos de calor tanto ascendentes (positivos) como descendentes (negativos) que se mueven en la superficie el balance debe ser cero, así tendremos que el equilibrio calórico se da así:

$$Q_{rn} - (Q_e + Q_s + Q_{lat} + Q_b + Q_w) = 0$$

De aquí se puede decir que la radiación neta se puede expresar en términos de flujos de calor de la siguiente forma

$$R_n = Q_e + Q_s + Q_{lat}$$

Hay otra variable que se debe tener en cuenta, el coeficiente de intercambio en el aire, que indica la cantidad de gramos de aire que pueden pasar por unidad de superficie en un tiempo determinado a una altura específica. Este coeficiente aumenta con la turbulencia y la velocidad del viento, siendo más grande a mayores alturas debido al aumento de la velocidad del viento. En condiciones térmicas y dinámicas adecuadas, este coeficiente puede ser significativamente alto.

Existen procesos de calentamiento y enfriamiento del aire en relación con la temperatura del suelo en el día como en la noche, durante el día, el suelo se calienta gradualmente, transfiriendo calor a capas superiores mediante convección y turbulencia. La densidad del aire disminuye con la altura, generando un gradiente de temperatura donde las temperaturas más altas están más cerca del suelo.

En ciertos momentos del ciclo diurno, la pérdida y recepción de calor se equilibran, mostrando una temperatura constante con la altura, durante la noche, el suelo se enfría por radiación, y el aire en contacto con él también se enfría. La inversión térmica ocurre cuando la superficie del suelo alcanza temperaturas más bajas que la capa de aire en contacto con él, invirtiendo el intercambio de calor del aire al suelo. Este proceso, caracterizado por curvas radiativas en noches despejadas, se denomina inversión térmica y puede extenderse hasta altitudes variables.

La altura de inversión marca el punto hasta el cual la temperatura aumenta con la altura, y la capa entre el suelo y esa altura se llama capa de inversión. La temperatura del aire en capas bajas tiene dos curvas características: durante el día, el gradiente de insolación muestra temperaturas decrecientes con la altura, mientras que, durante la noche, el gradiente de inversión muestra temperaturas crecientes con la altura.

Es necesario considerar que durante el día la temperatura se eleva rápidamente y sigue subiendo desde una a tres horas después que el sol alcanza su altura máxima, al convertirse en radiación incidente mayor que la emitida, después cae continuamente durante toda la noche, registrándose el mínimo, generalmente hacia la salida del sol.

### **¿Y el viento cómo se produce? ¿qué es el efecto Coriolis?**

El viento se origina debido a la rotación de la tierra y las diferencias de temperatura entre ésta y el mar, el movimiento del aire que constituye el viento se debe a la propiedad de los gases que el aire caliente tiende a subir mientras el aire frío baja, generando una circulación convectiva de abajo hacia arriba y viceversa, este proceso se produce debido a la búsqueda continua de equilibrio en la atmósfera como ya lo habíamos dicho anteriormente, el equilibrio aplica para fuerzas, calor y en este caso el viento, la energía generada por el viento se conoce como energía eólica y se mide en nudos o kilómetros por hora mediante la escala de Beaufort.

Las variaciones en la trayectoria, velocidad y temperatura del viento son influenciadas por diversos obstáculos en la superficie terrestre, como bosques, ciudades, montañas y el mar, de aquí que las fuerzas en juego al encontrarse el aire en movimiento con obstáculos como montañas, lo que genera cambios en la trayectoria, velocidad y temperatura del viento hacen que dos tipos de movimientos básicos del aire entren en la ecuación, la circulación local, influenciada por el calentamiento desigual de la superficie terrestre, y la circulación mundial, influenciada por la rotación de la Tierra y el efecto Coriolis, que es un efecto que se observa en un sistema de referencia, fue descrito en 1836 por el científico francés Gaspard Gustave de Coriolis y consiste en la existencia de una aceleración relativa del cuerpo en dicho sistema en rotación perpendicular al eje de rotación del planeta y a la velocidad del mismo es decir, traslación y rotación que generan un vaivén sobre el radio de giro el cual tiende a acelerarse con respecto al eje generando el movimiento hacia el eje de giro o alejándose de éste.

### **¿Y por qué hay días nublados y días lluviosos?**

La conexión entre los días nublados y lluviosos se centra en la relación entre la presencia de nubes y la ocurrencia de lluvia, ofreciendo información científica y datos interesantes sobre este fenómeno meteorológico, marcando una diferencia entre nublado y lluvias, es decir, días nublados no siempre son sinónimos de días lluviosos mientras que los cielos nublados se refieren a la presencia de nubes que bloquean la luz solar directa, los días lluviosos implican la caída de gotas de agua desde las nubes, la presencia de frentes cálidos y fríos también contribuye a la conexión entre nubosidad y lluvia, no todos los días nublados resultan en lluvia, ya que algunas nubes pueden bloquear la luz del sol sin contener suficiente humedad para producir precipitación, en ciertas regiones, como las zonas costeras y áreas cercanas a cadenas montañosas, la conexión entre días nublados y lluviosos es más pronunciada debido a condiciones climáticas específicas.

Tengamos presente que las nubes son las protagonistas en la formación de la lluvia, ya que cuando la atmósfera se satura de vapor de agua, ésta se condensa en pequeñas partículas en el aire y forma nubes que adoptan diversas formas y tamaños, dependiendo de la temperatura, la humedad y las corrientes de aire, los cielos nublados se producen cuando una gruesa capa de nubes cubre una gran parte del cielo, impidiendo que la luz del sol llegue al suelo y esta reducción de la luz solar tiene un efecto refrescante en la superficie de la tierra e impide que el aire se caliente tanto como lo haría en un día despejado y así es que se da como resultado que el aire más frío tenga menos capacidad para retener la humedad, lo que provoca la condensación del vapor de agua y la formación de gotas de lluvia que convierten el espacio en una lectura de inestabilidad atmosférica que es clave para las precipitaciones pues cuando el aire cálido y húmedo asciende y encuentra aire más frío en altitudes más altas, se vuelve inestable y comienza a ascender rápidamente y se enfría, lo que hace que la humedad de su interior se condense y forme nubes. Con el tiempo, la humedad acumulada se y se vuelve pesada para que el aire la soporte, lo que provoca lluvias con determinadas intensidades.

Predecir ciertas alteraciones en el clima se vuelve crucial para evitar la transformación de regiones en desiertos o la aparición de fenómenos climáticos extremos, es por ello por lo que, los modelos matemáticos utilizados para predecir el cambio climático se clasifican en dos categorías principales, los modelos heurísticos y modelos conceptuales.

Los modelos heurísticos se basan en explicaciones de las causas y mecanismos naturales que generan los fenómenos climáticos. Por otro lado, los modelos conceptuales se basan en formulas y algoritmos matemáticos que reproducen los procesos físicos que tienen lugar en la naturaleza.

Los modelos matemáticos del cambio climático suelen incluir los siguientes componentes:

La asimilación de datos que es un proceso fundamental en los modelos meteorológicos, ya que permite estimar el estado atmosférico en un momento dado a partir de las observaciones distribuidas por el sistema mundial de telecomunicaciones u otros medios, el comprender algo de la dinámica atmosférica que es la que se encarga de aproximar las ecuaciones que describen los procesos atmosféricos de manera eficiente nos ayudara bastante en la creación y análisis del modelo ya que estas ecuaciones describen los movimientos y cambios en la atmósfera a diferentes escalas espaciales y temporales y por ello es esencial para representar los fenómenos meteorológicos de manera realista.

Las parametrizaciones físicas son utilizadas para estimar los efectos de los procesos físicos que ocurren a escalas demasiado pequeñas para ser representados explícitamente por la dinámica del modelo y es aquí donde haremos énfasis ya que nuestra área de estudio está en tan solo de algo más de 66 mil metros cuadrados, estas parametrizaciones permiten capturar los efectos globales generados por los procesos a pequeña escala como es el caso y se utilizan para calcular variables de interés en la descripción del clima, como la velocidad del viento, la temperatura y la visibilidad. Correa (2016). El posprocesamiento es una etapa en la que se calculan diversas variables a partir de las predicciones del modelo y para ello nos ayudara la estación meteorológica instalada en la unidad ambiental el Tibar, estas variables incluyen el viento a diferentes alturas, las temperaturas cerca de la superficie y otros elementos relevantes para describir el clima con presión atmosférica, humedad relativa y otras.

De otro modo las ecuaciones que describen el flujo atmosférico son bien conocidas desde principios del siglo XX, estas ecuaciones se basan en las leyes de Newton, la conservación de la energía, la conservación de la masa y la ley de los gases perfectos. Los modelos globales utilizados son hidrostáticos, lo que significa que asumen un equilibrio hidrostático entre el peso de la atmósfera y la fuerza del gradiente de presión, sin embargo, cuando las características atmosféricas son de un tamaño similar a su altura, entran en juego procesos no hidrostáticos que deben ser considerados en modelos más avanzados.

La mayoría de los modelos aproximan la atmósfera en volúmenes tridimensionales, utilizando diferentes tipos de rejillas para calcular los valores promedio de las variables de pronóstico, estas rejillas pueden tener geometrías simples, como cubos, o estructuras más complejas, como icosaedros o mallas con resoluciones variables, nosotros usaremos las de los cubos donde trazaremos líneas de longitud, latitud y altura.

Y si de hablar de modelos climáticos se trata, a pesar de los avances en los modelos atmosféricos, existen situaciones en las que la predicción del clima se vuelve más difícil debido a la naturaleza caótica de la atmósfera, por ejemplo Edward Norton Lorenz quien fue un matemático y meteorólogo estadounidense, realizó investigaciones pioneras en este campo, relacionando la meteorología con la física del caos y los sistemas dinámicos no lineales donde sus estudios revelaron que el clima atmosférico tiene límites físicos en su predictibilidad, estableciendo un límite aproximado de 2 a 3 semanas para realizar predicciones precisas.

Jiyane (2003) Esto significa que, aunque se sigan desarrollando avances tecnológicos y científicos, es poco probable que podamos hacer predicciones “exactas” más allá de este límite de predictibilidad, sin embargo, esto no implica que los modelos climáticos sean inútiles y que por el contrario al ser un microclima no podamos ser más asertivos al pensar que por el contrario, son herramientas valiosas para comprender los efectos que pueden provocar anomalías en regiones específicas y para analizar diferentes escenarios de calentamiento global, forraje o siembra.

Dado que el clima es un sistema caótico que se representa de manera aproximada, existen límites en la calidad de las predicciones, por lo tanto, es fundamental interpretar los resultados de los modelos climáticos por parte de predictores entrenados y familiarizados con las características y limitaciones de los modelos.

Para enlazar el trabajo con esta introducción es necesario nombrar a un celebre matemático e ingenio francés Claude Louis Marie Henri Navier, en 1823 publica su trabajo esencial, *Sur les mouvements des fluides en ayant égard à l'adhésion des molécules*, en el que partiendo de un modelo molecular dedujo las importantes ecuaciones que describen el comportamiento de los fluidos llamados reales o viscosos (en contraposición a los ideales).<sup>2</sup>

Para esta misma época se debe citar también a otro célebre matemático, George Gabriel Stokes, quien las dedujo siguiendo un modelo de fluido como medio continuo. Y de este modo nace la ecuación de Navier – Stokes que resumidas serian algo así:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot (\nabla \bar{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \bar{u} + \bar{g} \pm \bar{F}$$

Donde la incógnita de esta ecuación es  $\bar{u}$  que representa un vector y justo ese vector es la velocidad el cual tiene componentes en  $x, y$  y  $z$ , de modo que  $\bar{u} = (u, v, w)$ , también está la presión  $P$ , pero como esta notada aquí es un escalar lo que significa que no cambian sus componentes en  $x, y$  y  $z$ , pero como esta multiplicado por el operador Nabla ( $\nabla$ ) el cual está definido así,  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$  que son las derivadas parciales en  $x, y$  y  $z$ , ósea que ese operador es un vector y si un vector se multiplica por un escalar el resultado es otro vector, está presente también la densidad del fluido, ( $\rho$ ) que en este contexto es de un fluido incomprensible, la viscosidad ( $\nu$ ) que es una propiedad del fluido que se resiste a la deformación o movimiento, esta  $g$  que es la gravedad del lugar donde reposa el fluido y dependiendo de la ubicación del plano cartesiano tendrá también los componentes en  $x, y$  y  $z$ , pero si se ubica en el espacio solo tendrá efecto en la componente  $z$  y finalmente están las fuerzas externas ( $\bar{F}$ ) que por lo general son las que perturban el fluido aumentándolo o disminuyéndolo, recordemos que este movimiento está definido por la velocidad ( $\bar{u}$ ).

Continuando con el análisis de la ecuación ya no tan simple dadas sus definiciones al separarla podemos hacer alusión a un término temporal ( $\frac{\partial \bar{u}}{\partial t}$ ), un término advectivo o convectivo ( $\bar{u} \cdot (\nabla \bar{u})$ ), un gradiente de presión ( $\nabla P$ ) y un término viscoso ( $\nu \nabla^2 \bar{u}$ ). Caballo (2013).

Es decir que la ecuación ya no tan inocente se debe expandir en términos de las componentes en  $x, y$  y  $z$ , quedando así:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u \partial u}{\partial x} + \frac{v \partial u}{\partial y} + \frac{w \partial u}{\partial z} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u \partial v}{\partial x} + \frac{v \partial v}{\partial y} + \frac{w \partial v}{\partial z} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{u \partial w}{\partial x} + \frac{v \partial w}{\partial y} + \frac{w \partial w}{\partial z} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned}$$

<sup>2</sup> [https://www.ecured.cu/Claude Louis Marie Henri Navier](https://www.ecured.cu/Claude_Louis_Marie_Henri_Navier)

en donde se mantiene los términos iniciales de la ecuación de Navier-Stokes (recordémoslos) término temporal  $\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)$ , un término advectivo o convectivo  $\left(\frac{u\partial u}{\partial x} + \frac{v\partial u}{\partial y} + \frac{w\partial u}{\partial z}\right)$ , un gradiente de presión  $\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}\right)$  y un término viscoso  $\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)$  ignorando la gravedad y las fuerzas externas.

La segunda ley de Newton no puede estar lejos de esta ecuación, pues el concepto fuerza ya está inmerso, veamos por qué. Al analizar a fondo en la ecuación el miembro izquierdo  $\left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u\partial u}{\partial x} + \frac{v\partial u}{\partial y} + \frac{w\partial u}{\partial z}\right)$  vemos que hay cambios en la velocidad y justo ese es el significado de la aceleración, el cambio en la velocidad se da en  $x$ ,  $y$  y  $z$ , para la componente  $u$  asociada a  $x$ ; y la otra parte de la ecuación  $\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)\right)$  esta asociada a las fuerzas y esfuerzos, es decir que cuando el fluido se acelera este termino  $\left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u\partial u}{\partial x} + \frac{v\partial u}{\partial y} + \frac{w\partial u}{\partial z}\right)$  se encarga de crear esa aceleración en el computador en las modelaciones matemáticas que se hagan, pero si por el contrario el fluido presenta desaceleraciones es por el termino  $\left(\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)\right)\right)$  que comienza a disipar esa velocidad, es decir la parte izquierda la acelera y la parte derecha la disipa y el gradiente de presión que está asociados a las fuerzas normales, en este caso verticales; de este modo la aceleración y la resistencia necesitan de algo para mantenerse en equilibrio y es allí donde entra el numero  $Re = \frac{f_i}{f_v}$  que consiste en ver las fuerzas inerciales sobre las fuerzas viscosas, pero esto ya lo había propuesto Sir Isaac Newton cuando estableció que  $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ , en resumen lo que aquí se propone son la aplicación a los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica aun volumen de un fluido determinado, hasta aquí íbamos bien solo que las ecuaciones de Navier-Stokes que son las que determinan el comportamiento de algunos fluidos son uno de los siete problemas del milenio, sin embargo no todo está perdido porque hay modificaciones especiales que se le pueden hacer a las ecuaciones para usarlas como predictoras del clima ya que hablamos de un fluido, para no terminar antes de empezar me permitiré citar un fragmento tomado de <https://acortar.link/aagsFR>

*“El meteorólogo Edward Lorenz se planteó en los años sesenta del siglo pasado la siguiente cuestión: resueltas las ecuaciones de Navier-Stokes, ¿podríamos predecir el tiempo meteorológico con mayor precisión y a más largo plazo? ¿Cómo es posible que conociendo exactamente las ecuaciones que rigen la circulación atmosférica y las condiciones de partida no se llegue a predecir con un grado de fiabilidad aceptable el tiempo que hará tres días después?”*

Para responder esta pregunta debemos traer a colación el termino meteorología, palabra que proviene del griego μετέωρον metéōron ‘alto en el cielo’, ‘meteoró’; y λόγος lógos ‘conocimiento’, ‘tratado’, así se convierte en la ciencia atmosférica interdisciplinaria que estudia el estado del tiempo, el medio atmosférico, los fenómenos meteorológicos y las leyes que los rigen con apoyo de disciplinas auxiliares como la física y la química de la atmósfera y la química de la atmósfera.

Si bien es cierto que los meteorólogos no le atinaban al clima hace unos años lo que aquí se quiere es que hacerlo con un margen de error mínimo y con una predicción de por lo menos una semana y nuestro punto a favor es que en los años treinta hubo un matemático francés llamado Jean Leray quien se tomó un valioso tiempo en intentar la solución de las ecuaciones y su resultado se resumió en que si existen dichas soluciones y además son únicas alrededor de un punto defendiendo conceptos que se aproximan a la solución débilmente y aprobando su existencia, el detalle está en encontrarlas ya que hay un concepto que hace muy complicada la solución y es la turbulencia.

Según Acosta (2013) lo complicado radica en que hoy día no existe una explicación matemática rigurosa de como un fluido pasa de tener un flujo regular a obtener o presentar un flujo turbulento, si se conoce el termino rotacional, aunque es algo similar no explica correctamente el comportamiento ya que el rotacional en contexto matemático este cuantifica la rotación de un fluido.

De otro lado Jean Leray matemático francés, que trabajó en ecuaciones diferenciales parciales y topología algebraica propuso la conjetura que el fenómeno de la turbulencia podría estar relacionada con la existencia de las soluciones del sistema de ecuaciones.

Como lo nuestro es analizar un modelo basado en estas ecuaciones con las condiciones que ya mencionare en su momento debemos tener en cuenta que para este modelo climático se considera la esfera terrestre rodeada de una malla en las que cada una de las celdas que la forman se leerán como latitud y longitud, y es necesario añadir allí factores tales como altitud y presión atmosférica, en ese orden de ideas nuestro predio a analizar y gracias a Google Eart es este:

**Figura 2.**

*Granja el Tibar*



**Fuente:** Tomado de Google Eart.

**Tabla 1.**

*Datos geográficos de la granja el Tibar*

Unidad Agroambiental el Tibar	
Perímetro	Aproximadamente 1120.65 m
Área	Aproximadamente 66.765,7 m <sup>2</sup>
Posición entrada	5° 19'37'' N 73° 47'30'' S
Altura	2.551 msnm
Posición perimetral	(73°47'32.5 W, 5°19'36.8''N)
	(73° 47'21'' W, 5° 19'32'' N)
	(73° 47'19'' W, 5° 19'37'' N)
	(73° 47'30.5'' W, 5° 19'42.2'' N)

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

Para el modelo como tal utilizaremos las siguientes variables:

- Temperatura del aire la cual se medirá en un rango de -40 a 60 °C.
- La humedad relativa se medirá entre 1 a 99%.
- Presión atmosférica se medirá entre 300 y 110 hpa.
- Velocidad del viento se medirá entre 0 y 50 m/s.
- Pluviometría se medirá desde 0 hasta 9999 mm.
- Punto de Rocío se medirá en °C.
- Sensación térmica se medirá en °C.

### 3.1. Análisis y modelo

#### 3.1.1. Modelo matemático

Luego de leer el artículo funciones elementales (2010), y a Torres (2015) se evidencia que existe un modelo matemático que se conoce como el modelo de la atmósfera de la Comisión Técnica Mixta de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). Este modelo se llama modelo atmosférico estándar o “Modelo Atmosférico Internacional” (International Standard Atmosphere, ISA), según Campos (1978) existen también modelos meteorológicos más detallados y específicos que incluyen variables tales como, temperatura, humedad, temperatura, presión, velocidad del viento, punto de rocío, sensación térmica y promedio de lluvia, se suelen utilizar modelos numéricos de predicción del tiempo, como el modelo WRF (Weather Research and Forecasting) o el modelo ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Estos modelos utilizan ecuaciones matemáticas complejas y datos observacionales para simular y predecir el comportamiento de la atmósfera en términos de temperatura, humedad, velocidad del viento, punto de rocío, sensación térmica y precipitación. Según López (2001).

**Tabla 2.**

*Criterios para determinar la intensidad de precipitación débil, moderada o fuerte.*

Variable	Rango	Intensidad
Llovizna	$i < 0,1 \text{ mm h}^{-1}$	Débil
	$0,1 \leq i < 0,5 \text{ mm h}^{-1}$	Moderada
	$i \geq 0,5 \text{ mm h}^{-1}$	Fuerte
Lluvia (también chubasco)	$i < 2,5 \text{ mm h}^{-1}$	Débil
	$2,5 \leq i < 10,0 \text{ mm h}^{-1}$	Moderada
	$10,0 \leq i < 50,0 \text{ mm h}^{-1}$	Fuerte
	$i \geq 50,0 \text{ mm h}^{-1}$	Violenta <sup>5</sup>
Nieve (también chubasco)	$i < 1,0 \text{ mm h}^{-1}$ (equivalente en agua)	Débil
	$1,0 \leq i < 5,0 \text{ mm h}^{-1}$ (equivalente en agua)	Moderada
	$i \geq 5,0 \text{ mm h}^{-1}$ (equivalente en agua)	Fuerte

Fuente: tomada de <https://acortar.link/yH23YP>

Para sintetizar esta información se hizo un estudio preliminar con 5820 líneas de datos cada línea con 11 variables con tres modelos: regresión logística, random forest y decisión trees. La variable de objetivo es tv1 (tiempo de lluvia) que es categórica en la que dice llueve o no llueve en una hora, se podrá hacer lo mismo con otra selección de variable que se desee. Lo que se mide en este caso es la probabilidad de que llueva o no en la hora.

Las variables explicativas son todas numéricas excepto dirección del viento y si es mañana o tarde, lo que nos sirve en el modelo para establecer la posición de la posible lluvia ya que hay indicios que unas variables pueden ser significativas o importantes para encontrar los efectos en la probabilidad del evento lluvia. Los modelos nos ayudan a seguir el proceso de factores afectando la predicción de lluvia, para ello se utilizarán los datos recolectados junto con los históricos desde el año 2020 con las siguientes formulas teniendo en cuenta las siguientes variables y sus condiciones.

**Tabla 3.**

*Variables por analizar en el modelo predictor*

Temperatura Interna(°C)	Humedad Interna (%)	Temperatura Externa(°C)	Humedad Externa (%)	Presión Relativa (mmHg)	Presión Absoluta (mmHg)	Velocidad del viento(m/s)	Lluvia mes (mm)
TI	HI	TE	HE	R	PA	VV	LLM
Ráfaga (m/s)	Dirección del viento	Punto de Rocío(°C)	Sensación Térmica (°C)	Lluvia hora (mm)	Lluvia 24 horas (mm)	Lluvia semana (mm)	Lluvia Total (mm)
RA	DV	PR	ST	LL	LLD	LLS	LLT

**Fuente:** Elaboración propia (2024).

**Figura 3.**

*Formato del modelo a utilizar*

$$\log \left[ \frac{P(tv1 = 1)}{1 - P(tv1 = 1)} \right] = \alpha + \beta_1(TI) + \beta_2(HI) + \beta_3(TE) + \beta_4(HE) + \beta_5(PR) + \beta_6(PA) + \beta_7(VV) + \beta_8(RA) + \beta_9(DV_2) + \beta_{10}(DV_3) + \beta_{11}(DV_4) + \beta_{12}(DV_5) + \beta_{13}(DV_6) + \beta_{14}(DV_7) + \beta_{15}(DV_8) + \beta_{16}(DV_9) + \beta_{17}(DV_{10}) + \beta_{18}(DV_{11}) + \beta_{19}(DV_{12}) + \beta_{20}(DV_{13}) + \beta_{21}(DV_{14}) + \beta_{22}(DV_{15}) + \beta_{23}(DV_{16}) + \beta_{24}(Procio) + \beta_{25}(ST) + \beta_{26}(am. pm_{pm})$$

$$\log \left[ \frac{\widehat{P(tv1 = 1)}}{1 - \widehat{P(tv1 = 1)}} \right] = 27.4532 + 0.2891(TI) + 0.079(HI) + 0.7191(TE) + 0.4069(HE) + 0.6578(PR) - 1.0493(PA) + 0.2424(VV) - 0.0805(RA) + 1.8183(DV_2) + 1.3081(DV_3) + 1.6468(DV_4) + 0.4817(DV_5) + 1.1857(DV_6) + 2.2409(DV_7) + 1.818(DV_8) - 12.6777(DV_9) + 2.665(DV_{10}) + 2.0028(DV_{11}) + 1.202(DV_{12}) + 0.5322(DV_{13}) + 2.2645(DV_{14}) + 1.248(DV_{15}) + 1.6434(DV_{16}) - 0.5732(Procio) + 0.6336(ST) + 1.3597(am. pm_{pm})$$

**Fuente:** Programa R-study. 2024

La función logaritmo nos da los valores necesarios para el objetivo de lluvia en una hora. Después de alimentar el modelo, entonces tenemos los resultados del análisis de los datos tanto históricos como en tiempo real con sus respectivos coeficientes.

**Figura 4.**

*Coefficientes*

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z )
(Intercept)	27.4532	130.0363	0.2111	0.8328
TI	0.2891	0.1527	1.8932	0.0583 .
HI	0.0790	0.0400	1.9744	0.0483 *
TE	0.7191	0.9880	0.7278	0.4667
HE	0.4069	0.0837	4.8645	1.1473e-06 ***
PR	0.6578	0.1840	3.5753	0.0003 ***
PA	-1.0493	0.2039	-5.1469	2.6487e-07 ***
DV9	-12.6777	670.6689	-0.0189	0.9849
DV10	2.6650	1.0142	2.6277	0.0086 **

**Fuente:** Programa R-study (2024).

Ahora observamos el resumen dadas las condiciones necesarias y suficientes después del ajuste para datos desde el 2020 hasta la fecha

**Figura 5.**

*Coefficientes a usar en el modelo predictivo*

Null Deviance	df	Residual Deviance	df Residual	AIC	Dispersion	Iterations
714.5072	3819	373.5846	3793	427.5846	1	18

Min	1Q	Median	3Q	Max
-2.1779	-0.0948	-0.0281	-0.0072	4.4358

**Fuente:** Programa R-study (2024).

Por último, hacemos la predicción basados en el porcentaje que entrega el modelo, en este caso hay un 60% de probabilidad que llueva en las próximas horas.

**Figura 6.**

*Resultado de la primera simulación*

Type of random forest	Number of trees	No. of variables tried at each split	OOB estimate of error rate
classification	500	3	1.44%

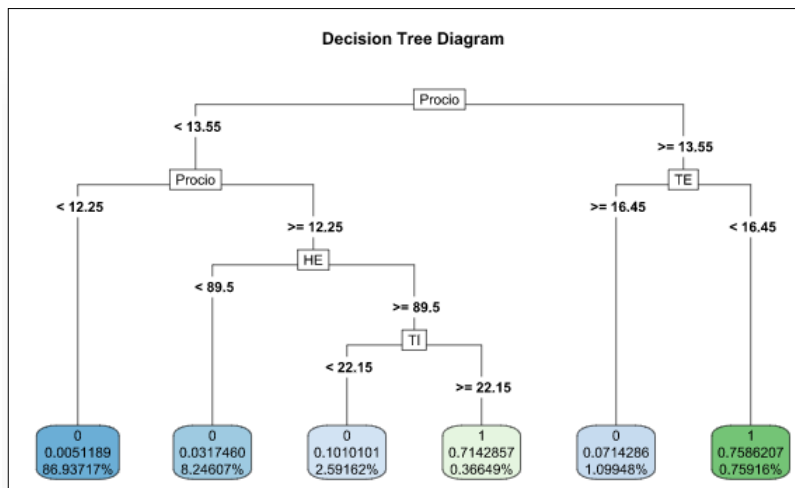
	0	1	class.error
0	3741	7	0.0019
1	48	24	0.6667

**Fuente:** Programa R-study (2024).

Para estar más seguros hacemos un árbol de decisión, este es el resultado donde le diagrama muestra como seria la probabilidad del evento de acuerdo con las variables más importantes PRocio, HE, TE and TI

**Figura 7.**

*Árbol de decisiones*



**Fuente:** Programa R-study (2024).

Así se puede evidenciar el comportamiento del clima en un lugar puntual, siempre y cuando se tengan los datos históricos y los de tiempo real, entre más datos la predicción será más exacta.

## 4. Conclusiones

El enfoque del artículo se centra en los fluidos y su relevancia en el cambio climático, la relación entre modelos matemáticos y la comprensión de procesos atmosféricos y su importancia para evaluar y prever el impacto del cambio climático en la Tierra.

El cambio climático es un fenómeno complejo que ha acelerado en los últimos dos siglos debido a la influencia de la vida moderna. Se destaca la necesidad de comprender y prever estas alteraciones para evaluar su impacto en el planeta, comenzando por lugares puntuales tales como se desarrolló en el proyecto planteado anteriormente.

Se abordaron factores como la radiación solar, la latitud, la altitud y la topografía que afectan la temperatura del aire y se exploró el balance calórico climático y la importancia de entender las fuerzas y flujos de calor para comprender los patrones climáticos.

Se introduce la ecuación de Navier-Stokes con algunas condiciones en un análisis matemático para que la página que se alimente y entregue el máximo de veracidad en los resultados ayudados por una herramienta matemática fundamental en la modelación de fluidos, aunque se destaca la complejidad y los límites en la predicción climática debido a la naturaleza caótica de la atmósfera.

A pesar de los avances tecnológicos y científicos, la predicción exacta del clima más allá de un límite de 2 a 3 semanas es desafiante debido a la naturaleza caótica de la atmósfera. Se enfatiza la necesidad de interpretar los resultados de los modelos climáticos y conocer sus limitaciones con rango de al menos una semana de predicción con el mínimo error posible.

Se menciona la historia de la meteorología y cómo figuras como Edward Lorenz plantearon preguntas cruciales sobre la capacidad de prever el clima. Aunque se reconoce la existencia de soluciones en las ecuaciones de Navier-Stokes, con condiciones especiales y específicas para los conceptos de la turbulencia que sigue siendo un desafío significativo.

Se presenta el Modelo Atmosférico Internacional como una herramienta estándar en la meteorología. Además, se describen las variables a considerar en un modelo climático, como la temperatura, humedad, presión atmosférica, velocidad del viento, pluviometría, punto de rocío y sensación térmica.

Se destaca la importancia de modelos climáticos precisos, especialmente a nivel local, para evitar consecuencias negativas como desertificación o fenómenos climáticos extremos. La investigación busca aplicar modelos matemáticos para prever cambios específicos en la región analizada.

Se presenta un modelo que prevé el clima el cual está a cambios dependiendo el desarrollo que tenga la investigación en curso.

## 6. Referencias

Acosta P. M. y Sierra, L. (2013) Evaluación de métodos de construcción de curvas IDF a partir de distribuciones de probabilidad y parámetros de ajuste. *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC*, 22(35), 25-33.

Campos, D. F. (1978) *Cálculo de las curvas IDF, a partir de registros de lluvia máxima en 24 horas y Relaciones Duración Lluvia Promedio*. 1a Ed., Subdirección Regional Noreste de Obras Hidráulicas e Ingeniería agrícola para el Desarrollo Rural. San Luis de Potosí, México

Carballo, N. C., Paredes Trejo, F. y Guevara, E. (2013). *Modelos matemáticos para la estimación de lluvias de diseño*, 1a Ed., Editorial Académica Española, Lexington KY, USA.

Correa, H. (2016). *Factores físicos que influyen en la ocurrencia de crecidas extremas*. 1a Ed., Editorial Académica Española, Berlín, Alemania (2016).

Funciones elementales 2010 <http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL001843.pdf>

Jiyane, J. y Zermeño, G. A. (2003). Aplicación del enfoque de evapotranspiración a equilibrio en la agricultura de riego en zonas áridas. *Agrociencia*, 37(6), 553-563.

López, E. J., Tijerina, C. H. L., Haro, A. G. y Arteaga, R. R. (2021). Calibración de fórmulas de evapotranspiración mediante un cultivo de alfalfa como referencia en el área de Montecillo, Estado de México. *Agrociencia*, 2, 55-77.

Modelos matemáticos 2009 tomado de [https://matema.ujaen.es/jnavas/web\\_modelos/pdf\\_mmb08\\_09/introduccion.pdf](https://matema.ujaen.es/jnavas/web_modelos/pdf_mmb08_09/introduccion.pdf)

Modelos matemáticos tomado de  
<https://www.mat.uson.mx/~jldiaz/Documents/Funcion/modelos-fasciculo17.pdf>

Muñoz, B. J. y Zamudio, H. (2018). Regionalización de ecuaciones para el cálculo de curvas de intensidad, duración y frecuencia mediante mapas de isolíneas en el departamento de Boyacá. *Tecnura*, 22(58), 53-64 <https://doi.org/10.14483/22487638.14295>

Pardo, A. y Ruiz, M. (2002). *SPSS 11 Guía para el análisis de datos*. España: Editorial McGraw Hill Interamericana.

Pizarro, R. A. (2013). *Abarza y otros doce autores, Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para las regiones Metropolitana, Maule y Biobío. Intensidades desde 15 minutos hasta 24 horas*. Santiago de Chile: Unesco.

Sepúlveda, O. Z. (2015). Suárez y otros tres autores. Estudio del comportamiento e impacto de la climatología sobre el cultivo de la papa y del pasto en la región central de Boyacá empleando los sistemas dinámicos. *Ciencia en Desarrollo*, 6(2), 215-224.

Torres Curth, M. (2015). *Los reyes de la pasarela, modelos matemáticos en las ciencias*. - 1a ed. Fundación de Historia Natural Félix de Azara.

Vielma, N. (2003). *Factores Atmosféricos que afectan la Tecnología Óptica de Espacio Libre*. Universidad Dr. Rafael Belloso Chacín (URBE).

Villaman, P. R., Tijerina, C. H. L., Quevedo, N. A. y Crespo, P. G. (2001). Comparación de algunos métodos micro meteorológicos para estimar la evapotranspiración. *Revista Interamericana Terra*, 19(3), 281-29.