

## Capítulo 1

# Distribución espacial de *Rubus* spp. en Colombia

## Exploración de la diversidad biológica y climática presente en Colombia para *Rubus* spp.

### Diversidad biológica y climática de mora en Colombia

Colombia, un país situado en el noroeste de América del Sur, es uno de los lugares más biodiversos del planeta. Su ubicación geográfica privilegiada y su diversidad climática han dado lugar a una amplia gama de ecosistemas, hábitats y especies de flora y fauna, que van desde las selvas tropicales amazónicas hasta los páramos de los Andes y las costas del océano Pacífico y del océano Atlántico. Según estimaciones, Colombia posee aproximadamente 200.000 especies de flora y fauna (Arbeláez-Cortés, 2013), siendo el tercer país más biodiverso a nivel mundial (Butler, 2020), a pesar de representar solo el 0.8% de la superficie terrestre del planeta.

Dentro de toda diversidad biológica que tiene el país, hay muchas especies de plantas, entre ellas la mora (*Rubus* spp.), que tienen su centro de origen en la zona andina (Balslev & Luteyn, 1992), donde crecen en climas de frío a frío moderado, la mayor parte de las veces en forma silvestre, con un alto índice de cruzamiento natural y de variabilidad entre plantas (Cardona & Bolaños-Benavides, 2019). En Colombia, la mora sobresale entre las especies cultivadas por la variabilidad en tamaño,



color, calidad del fruto, sabor dulce y su alto contenido de antioxidantes (Zamorano et al., 2007). Su mayor potencial genético productivo se expresa a altitudes entre los 1.200 y 3.500 m s. n. m., y a nivel comercial se cultiva entre los 1.800 y 2.400 m s. n. m. (Zamorano et al., 2007). En este piso térmico de los 2.000 a 2.300 m s. n. m. la mora es menos afectada por enfermedades, de tal manera que cuando el cultivo se ubica en el piso que le corresponde, es más productivo (Erazo, 1983).

Las diferentes regiones climáticas del país han permitido que la mora se adapte y prospere en diversos entornos, siendo nichos favorables para su propagación las zonas frías de los Andes, pero también con reportes en las cálidas llanuras tropicales. En las zonas montañosas de Colombia, como el páramo, la mora ha sido históricamente cultivada por comunidades locales, aprovechando la diversidad de microclimas y suelos fértiles (Zamorano et al., 2007). Estas prácticas tradicionales de cultivo han sido transmitidas de generación en generación, contribuyendo a la preservación de la diversidad agrícola y la riqueza de variedades de mora.

El impacto de la diversidad climática en el cultivo de la mora en Colombia es una faceta crucial que ha influido en aspectos como la adaptación de la planta, la disponibilidad y calidad de las cosechas, así como en la variedad de especies cultivadas. La mora es una fruta que se adapta de manera notable a diferentes condiciones climáticas, lo que ha permitido su cultivo en una amplia gama de altitudes y regiones. Según los registros recopilados en este estudio desde la plataforma *Global Biodiversity Information Facility* – GBIF (<https://www.gbif.org/>), y la colección de germoplasma en AGROSAVIA, el registro de individuos de mora va desde los 12 m s. n. m. hasta los 4.843 m s. n. m.

Las diferentes regiones climáticas del país han permitido que la mora se adapte y prospere en diversos entornos, siendo nichos favorables para su propagación las zonas frías de los Andes, pero también con reportes en las cálidas llanuras tropicales.

En las regiones de mayor altitud, donde las temperaturas son más bajas, la planta se ha adaptado para tolerar el frío y puede soportar heladas moderadas. Por otro lado, en las zonas más cálidas y bajas, la mora ha desarrollado mecanismos para resistir las altas temperaturas y las sequías estacionales. Esta adaptabilidad ha sido esencial para su cultivo en diferentes regiones del país, lo que ha permitido a los agricultores aprovechar las ventajas de la diversidad climática y diversificar sus fuentes de ingresos. Además, la diversidad de especies cultivadas contribuye a la seguridad alimentaria, ya que se reducen los riesgos asociados con la dependencia de una sola variedad que podría verse afectada por enfermedades o condiciones climáticas adversas (Agar et al., 2011).



La diversidad climática de Colombia también ha influido en la disponibilidad y producción de moras a lo largo del año. En las regiones de mayor altitud, donde las temperaturas son más frescas, la mora puede tener ciclos de producción más largos y constantes, permitiendo una oferta estable durante gran parte del año (Cardona & Bolaños-Benavides, 2019). Por otro lado, en las regiones más cálidas y bajas, la mora no registra mayores zonas productivas al tener cosechas más estacionales debido a las variaciones en las estaciones de lluvias y sequías. Igualmente, la diversidad climática ha permitido el desarrollo de diferentes variedades de mora con características específicas, como el tamaño del fruto, el sabor y la resistencia a plagas y enfermedades. Esto ha proporcionado a los agricultores una mayor gama de opciones para seleccionar las variedades que mejor se adapten a sus condiciones locales y necesidades de mercado (Moreno-Medina & Casierra-Posada, 2021).

Así, frente a un escenario inminente de cambio climático, la capacidad de la mora para adaptarse a diferentes condiciones climáticas ha sido una ventaja en la resiliencia de los cultivos frente a eventos extremos como sequías o inundaciones. Por ello, es necesario la conservación *in situ* y *ex situ* de dicha diversidad biológica de mora en los bancos de germoplasma vegetal (Zhang et al., 2017).



## Glosario

**Ex situ:** En conservación es el mantenimiento de algunos componentes de la biodiversidad fuera de sus hábitats naturales.

## Conservación de la diversidad biológica de mora en Colombia

A pesar de la riqueza de biodiversidad en Colombia, esta también enfrenta desafíos significativos en términos de conservación. La expansión agrícola, la deforestación, la minería ilegal y otras actividades humanas amenazan los hábitats naturales y ponen en peligro muchas especies, incluida la mora. La pérdida de biodiversidad puede tener efectos negativos en la seguridad alimentaria, la salud del ecosistema y el bienestar de las comunidades locales.

La cCG de mora salvaguarda la diversidad genética de especies de *Rubus* cultivadas y silvestres que podría perderse debido a cambios ambientales, urbanización y homogeneización de los cultivos comerciales (Cerón et al., 2021).

El acceso a estas valiosas accesiones permite a los científicos y agricultores explorar y utilizar rasgos genéticos específicos para mejorar los cultivos comerciales (Espinosa-Bayer et al., 2009). La selección de variedades con resistencia a enfermedades, tolerancia a condiciones climáticas extremas y mayor contenido nutricional puede



Llevar a la producción de cultivos más resilientes y nutritivos, lo que es esencial para enfrentar la creciente demanda de alimentos en un mundo con una población en aumento. Por otro lado, los expertos en mejoramiento genético de cultivos, los fitomejoradores, utilizan técnicas de cruzamiento y selección para transferir genes de variedades silvestres o locales a cultivares comerciales, mejorando su adaptación a diversas condiciones ambientales y aumentando su productividad y calidad.

En el presente estudio se recopilaron registros de la existencia de especies silvestres y domesticadas de mora (*Rubus* spp.) con información geográfica precisa, disponibles en los **datos de pasaporte** de la cccg de mora, y también en repositorios abiertos como GBIF y Botanical Information and Ecology Network – BIEN (Maitner et al., 2018), que recopilan la información que está protegida en herbarios y museos. A partir de la georreferenciación exacta de los registros de mora por todo el territorio nacional, información ambiental de los climas nativos y modernas herramientas de inteligencia artificial, se realizó la construcción del mapa de distribución de mora (*Rubus* spp.) en Colombia.

## Construcción del mapa de distribución de *Rubus* spp. en Colombia mediante métodos de inteligencia artificial

La agronomía es una disciplina científica que desafía constantemente a los expertos en agricultura a mejorar la productividad de los cultivos, garantizar la seguridad alimentaria y promover la sostenibilidad agrícola en un mundo en constante cambio. En este contexto, el uso de accesiones de bancos de germoplasma, herbarios y museos, junto con el modelamiento de la distribución espacial por inteligencia artificial, han llegado a ser una herramienta esencial para enfrentar los desafíos en mención.

La exploración de nueva diversidad en mora permitirá identificar rasgos genéticos deseables, como resistencia a enfermedades, tolerancia a sequías, o altos rendimientos, que pueden ser introducidos en variedades de cultivos para mejorar su desempeño y sostenibilidad. Por otro lado, al cruzar accesiones con características deseadas, los fitomejoradores pueden desarrollar nuevas variedades que se



### Glosario

#### **Datos de pasaporte:**

Conjunto de datos relativos al origen de una accesión. De fundamental importancia son el nombre de la especie, la localidad, la fecha de colecta o procedencia, el estado del material (silvestre o cultivado) y el número personal del recolector. Datos deseables son las condiciones del hábitat y de la ecología local, así como anotaciones de la planta en sí, como altura y color de la flor, entre otras.



adaptan mejor a las condiciones locales y cambiantes del clima. Esto es especialmente importante para garantizar la continuidad productiva de la mora en un mundo donde el cambio climático representa un desafío creciente para la agricultura.

## Modelamiento de la distribución espacial de mora

El modelamiento de la distribución espacial es una técnica que integra datos de capas ambientales y de georreferenciación de especies para predecir su distribución geográfica y la idoneidad de los hábitats. En el campo de la agronomía, esta herramienta ha demostrado ser valiosa para comprender cómo los cultivos se adaptan a diferentes condiciones ambientales y pueden responder al cambio climático.

Mediante el modelamiento de la distribución espacial, los investigadores pueden identificar las áreas geográficas donde los cultivos son más propensos a desarrollarse, y aquellas zonas que podrían enfrentar desafíos. Este conocimiento es esencial para tomar decisiones informadas sobre las variedades que se pueden cultivar en diferentes regiones, y para anticipar cómo los patrones climáticos cambiantes pueden afectar la producción agrícola en el futuro. También es posible identificar áreas geográficas en las cuales establecer bancos de germoplasma *ex situ* para conservar la diversidad genética en situaciones de emergencia, y desarrollar estrategias de manejo y conservación de recursos genéticos para garantizar la disponibilidad y viabilidad de las accesiones en el largo plazo.


La inteligencia artificial (IA) se refiere a la utilización de algoritmos y técnicas de aprendizaje automático para crear modelos matemáticos y estadísticos que pueden simular y predecir comportamientos complejos de sistemas. Estos modelos se utilizan en una amplia gama de campos como la economía, la meteorología, la ingeniería, entre otros; para analizar datos, tomar decisiones, optimizar procesos y pronosticar resultados futuros. La IA en el modelamiento ha permitido un avance significativo en la precisión y capacidad predictiva de los modelos, impulsando la toma de decisiones más informadas y eficientes. De este modo, al analizar datos climáticos y topográficos, la IA puede predecir las áreas geográficas donde un cultivo específico puede prosperar mejor. Esto es especialmente útil para la planificación de la agricultura a gran escala, la selección de sitios adecuados para la expansión agrícola y la adaptación a los cambios climáticos.

Para acceder a la información de capas ambientales, como entradas al modelamiento por IA, se construyó un código personalizado con el software estadístico R v. 4.0.3 (R Core Team, 2023), utilizando los



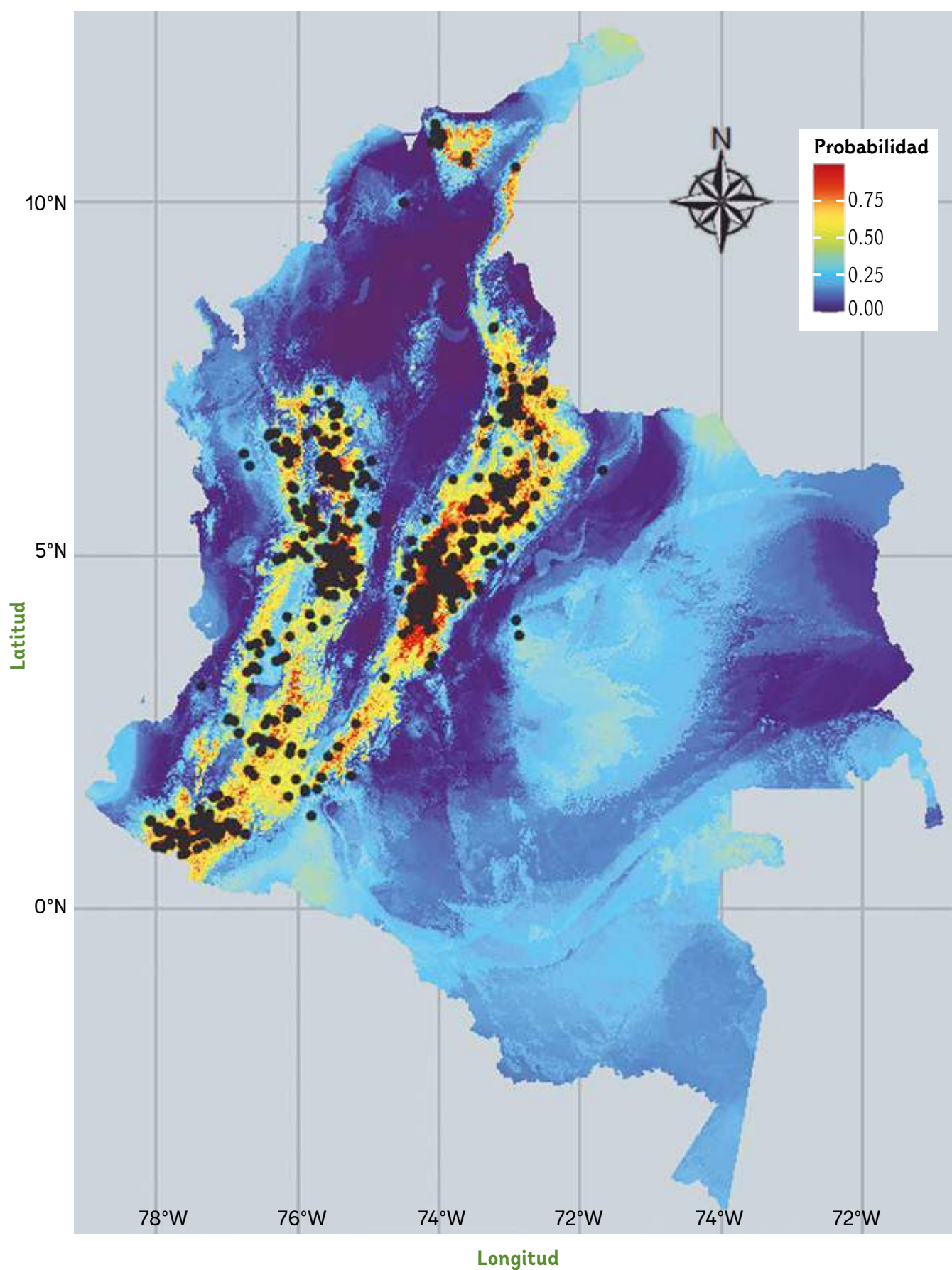
paquetes raster y ggspatial de una resolución de 30 segundos (~1 km<sup>2</sup>). Es decir, se dividió todo el territorio nacional en cuadrículas de 1 km<sup>2</sup> donde se dispusieron los promedios de diferentes variables ambientales. Estos datos climáticos se consultaron en la base de datos ambiental Rasters for Ecological Modeling – ENVIREM dataset (<https://envirem.github.io/#varTable>), un compilado de variables predictoras para el modelado de distribución espacial referentes a índices de estrés abiótico, como estrés por sequía (altas y bajas precipitaciones), y estrés por calor (altas y bajas temperaturas).

En este estudio, el modelamiento de la distribución espacial por medio de IA se realizó a partir de las variables ambientales mediante siete diferentes familias de funciones de aprendizaje de máquina (bosques aleatorios, bosques boosting, vecinos más cercanos, bayesiano, logística, máquina de soporte vectorial y análisis discriminante lineal), siguiendo un código personalizado del entorno de programación R impulsado por el paquete R Caret. Para el modelamiento se dividieron los datos en un conjunto de entrenamiento y un conjunto de validación. El 80 % se utilizó para entrenar el modelo y el 20 % se implementó para probar qué tan preciso fue el modelo. El modelo construido a partir del enfoque de inteligencia artificial bosques aleatorios, fue el de mayor precisión, con un valor de 80 % de probabilidad de encontrar un registro usando variables ambientales. A partir de este modelo, se generó un mapa de distribución de las especies de mora en el territorio nacional, las cuales representan la probabilidad estimada de presencia de la mora (*Rubus* spp.) en diferentes regiones del país (figura 2). Este mapa, dadas las condiciones ambientales actuales, evidencia la preferencia de *Rubus* spp. por distribuirse a lo largo de las cordilleras de los Andes, donde potencialmente se encuentre la mayor diversidad útil para enriquecer los bancos de germoplasma. Lo anterior coincide con los lugares de avistamiento de la mora (puntos negros).

Este modelamiento de la distribución espacial mediante IA es coherente con reportes de zonas óptimas de crecimiento de mora entre los 1.200 y 3.500 m s. n. m., y de áreas de cultivo a nivel comercial entre los 1.800 y 2.400 m s. n. m. (Zamorano et al., 2007). Así, este mapa podría ayudar a los científicos a evaluar cómo el cambio climático puede afectar la distribución y la abundancia de cultivos en el futuro. Este modelamiento de la distribución espacial proporcionará información valiosa para la formulación de estrategias de adaptación y mitigación en la agricultura, así como para identificar áreas donde una especie cultivada o silvestre tiene el potencial de crecer y desarrollarse, lo cual puede ser útil para la conservación de especies en peligro o en riesgo de extinción, y la búsqueda de nuevo germoplasma mediante colectas dirigidas. 



**Figura 2.** Modelamiento de la distribución espacial de mora (*Rubus* spp.) mediante el algoritmo de IA bosques aleatorios (*random forest*), e índices ambientales de estrés por sequía y estrés por calor. Las zonas rojas representan la alta probabilidad de presencia y las zonas azules la baja probabilidad.



**Fuente:** Elaboración propia





Fotografía: Carlos Enrique Velásquez Arroyo.