

CAPÍTULO I
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

CAPÍTULO I

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. Características del bosque montano y tucumano-boliviano

Los **bosques montanos** abarcan diversos ecosistemas localizados en gradientes altitudinales, entre los 800 y los 3500 m.s.n.m. Dentro de estos, el **bosque tucumano-boliviano** se presenta como una subcategoría única, caracterizada por su distribución geográfica y composición florística particular. En este estudio, se evaluará la diversidad arbórea dentro del bosque montano, específicamente en el bosque tucumano-boliviano.

1.1.1. Características generales en América

El Bosque tucumano-boliviano forma parte de la ecorregión de las Yungas, que se extiende a lo largo de la vertiente oriental de los Andes desde Venezuela hasta el noreste de Argentina. Este bosque se caracteriza por su alta biodiversidad y su papel crucial en la regulación climática y la conservación de recursos hídricos. Los gradientes altitudinales, que van desde los 500 hasta los 3500 m.s.n.m., generan una gran heterogeneidad de hábitats, lo que favorece un alto recambio de especies y comunidades vegetales (Gonzáles & Vetaas, 2012; Cuesta *et al.*, 2009).

En las zonas más bajas, predominan los bosques tropicales y subtropicales siempreverdes, mientras que en altitudes intermedias y superiores se encuentran bosques nublados y caducifolios. Las familias *Myrtaceae* y *Lauraceae* son dominantes en estos ecosistemas, que también albergan una gran cantidad de epífitas, lianas y enredaderas (Hueck, 1978; Gonzáles & Vetaas, 2012).

1.1.2. El bosque tucumano-boliviano en Bolivia

En Bolivia, el bosque tucumano-boliviano se extiende principalmente por los departamentos de Santa Cruz, Chuquisaca y Tarija, cubriendo las laderas orientales de los Andes. Este bosque se encuentra entre los 450 y 2600 m.s.n.m., con una transición hacia el Chaco en las zonas más bajas y hacia los bosques montanos húmedos en las altitudes superiores (Brown & Grau, 2002; Navarro & Maldonado,

2002). Las precipitaciones son abundantes, con registros que superan los 1400 mm anuales en algunas áreas, y las temperaturas medias varían desde los 22°C en las zonas bajas hasta los 13°C en las altitudes más altas. Estas condiciones climáticas, combinadas con una topografía abrupta, favorecen la formación de quebradas húmedas y una alta diversidad de especies arbóreas, como *Alnus acuminata* (aliso), *Juglans australis* (nogal) y especies de la familia *Lauraceae* (Hueck, 1978).

1.1.3. El bosque tucumano-boliviano en Tarija

En el departamento de Tarija, este bosque se encuentra principalmente en la cuenca alta del río Bermejo y en áreas pertenecientes a la Serranía de San Antonio - Arce. Aquí, el bosque se caracteriza por una densa cobertura vegetal que incluye árboles emergentes que superan los 25 m de altura, así como una gran cantidad de epífitas y lianas. La diversidad de especies arbóreas disminuye con la altitud, pero se observa un pico de riqueza en altitudes intermedias, entre los 900 y 1200 m.s.n.m. (Gallegos *et al.*, 2019).

A nivel local el bosque de la zona presenta una composición florística dominada por especies adaptadas a las condiciones húmedas y frescas de las laderas montañosas. Estudios recientes han documentado la importancia de este bosque para la conservación de la biodiversidad y la regulación hídrica en la región, destacando su vulnerabilidad frente a actividades humanas como la deforestación y la agricultura intensiva (Gallegos *et al.*, 2019).

1.2. Estrategias de muestreo para el análisis ecológico

El muestreo forestal sistemático estratificado combina principios del diseño estadístico con criterios ecológicos, permitiendo una representación eficiente de la heterogeneidad ambiental y florística de un área determinada (Mostacedo & Fredericksen, 2000; BOLFOR, 1999). En este enfoque, el área de estudio se divide en estratos o gradientes definidos por variables ecológicas (por ejemplo, altitud, pendiente o tipo de vegetación), y dentro de cada uno se distribuyen sistemáticamente las unidades de muestreo.

El uso de transectos rectilíneos y en banda es una estrategia ampliamente empleada en estudios florísticos y estructurales por su facilidad de implementación y por permitir una cobertura eficiente del terreno (Mostacedo & Fredericksen, 2000). Estos transectos actúan como eje de referencia para la instalación de parcelas, cuyo tamaño y forma se ajustan en función del tipo de vegetación y el objetivo del estudio. Por ejemplo, Gentry (1995) empleó transectos de 2×50 m para evaluar árboles con DAP mayor a 2,5 cm, mientras que otros autores recomiendan parcelas de mayor tamaño (10×100 m o 20×50 m) para árboles con DAP superior a 10 cm, a fin de asegurar la representatividad estadística de la muestra (Mostacedo & Fredericksen, 2000).

En este tipo de diseño, la distribución sistemática de parcelas consiste en ubicar unidades de muestreo a intervalos regulares a lo largo del transecto, lo que reduce la posibilidad de sesgo espacial y mejora la cobertura del área (Mueller-Dombois & Ellenberg, 1974). Este enfoque es particularmente útil en zonas de topografía accidentada, ya que permite ajustar la ubicación de las parcelas sin comprometer la representación altitudinal del gradiente estudiado.

1.3. Composición y estructura florística

1.3.1. Composición florística

La composición florística se refiere a la lista de especies vegetales presentes en un ecosistema, incluyendo su clasificación taxonómica en familias, géneros y especies CATIE (2001).

La composición florística puede clasificarse en:

- **Riqueza de especies:** Número total de especies presentes en un área específica.
- **Diversidad de especies:** Incluye tanto la riqueza como la abundancia relativa de cada especie.
- **Distribución taxonómica:** Clasificación de las especies en familias y géneros, lo que permite identificar patrones ecológicos

1.3.2. Estructura florística

La estructura florística describe la organización espacial y dimensional de las especies vegetales en un ecosistema. Este concepto incluye la distribución proporcional de las etapas de crecimiento de las especies y su relación con los estratos de la vegetación (BOLFOR, 1998). Esta puede clasificarse en estructura horizontal y vertical:

1.3.2.1. Estructura horizontal

Se refiere al arreglo espacial de los árboles, considerando su ubicación, especie y dimensiones, las cuales están asociadas con su edad y desarrollo. Este patrón de distribución no es aleatorio, sino que responde a una serie de factores ecológicos, edáficos y biológicos que influyen en la organización del ecosistema. Está fuertemente determinada por las características del sitio (como el clima, el suelo, la pendiente, etc) y por la composición florística del bosque, es decir, las especies presentes y sus respectivas proporciones. Esta combinación de factores genera un patrón estructural específico para cada bosque, el cual representa una respuesta adaptativa del ecosistema a las condiciones locales (Valerio, & Salas, 1998).

a) Distribución diamétrica y Ley de De Liocourt

Según Valerio, & Salas (1998), en términos prácticos, la estructura horizontal se refleja en la distribución diamétrica del número de individuos por hectárea. En muchos bosques naturales, esta distribución suele adoptar una forma de "J" invertida, lo cual indica una mayor cantidad de árboles jóvenes (de menor diámetro) y una disminución progresiva hacia árboles más viejos y de mayor tamaño. Sin embargo, no todas las especies o bosques siguen este patrón, ya que algunas presentan distribuciones más irregulares debido a sus propias características ecológicas y dinámicas de regeneración.

De Liocourt propuso que, en un rodal manejado sosteniblemente, la cantidad de árboles en cada clase diamétrica disminuye progresivamente según una razón constante (q) entre clases consecutivas. Esta razón permite describir una distribución diamétrica con forma de curva exponencial decreciente (forma de J invertida). Cuando los datos de número de árboles por hectárea y su DAP se grafican en papel semilogarítmico, se

obtiene una línea recta, evidencia de una distribución exponencial. Esta ley ha sido fundamental en el manejo de **bosques irregulares**, donde estos están conformados por árboles de diversos tamaños y edades, distribuidos de forma mezclada, ya sea individualmente o en grupos, lo que impide clasificarlos en función de una edad específica (Araujo & Iturre, 2006).

A partir de las observaciones de De Liocourt, se desarrollaron modelos matemáticos que permiten describir y planificar la estructura de rodales irregulares. Según Fredericksen *et al.* (2001), el modelo exponencial básico se expresa como:

$$N = K * e^{(-a \cdot d)}$$

Donde:

N = Número de árboles por hectárea en una determinada clase diamétrica.

K = es una constante que indica la cantidad teórica de árboles por hectárea cuando el diámetro a la altura del pecho (DAP) es igual a cero.

e = es la base del logaritmo natural (constante de Euler).

a = es un parámetro que define la pendiente de la curva, indicando cuán rápido disminuye la cantidad de árboles a medida que aumenta el DAP.

d = es el valor promedio del diámetro correspondiente a cada clase diamétrica.

Además, se puede establecer el cociente de reducción q, mediante la expresión

$$q = \frac{Nn}{Nn + 1}$$

Donde N representan el número de árboles teóricos en dos clases diamétricas consecutivas.

b) Índice de valor de Importancia (IVI)

Según Lamprecht (1990), el Índice de Valor de Importancia (IVI), originalmente formulado por Curtis y McIntosh (1951) citado por Lamprecht (1990), es un método que permite evaluar y comparar el “**peso ecológico**” de cada especie dentro de un tipo de bosque específico. Este índice se calcula sumando tres parámetros:

- La **abundancia** se refiere al número de árboles por especie. Se distingue entre abundancia absoluta, que es el conteo total de individuos de una especie, y abundancia relativa, que corresponde al porcentaje que representa cada especie respecto al total de árboles muestreados (Lamprecht, 1990).
- La **dominancia** expresa el grado de cobertura o espacio que ocupa cada especie en el bosque. Tradicionalmente, se determina a partir de la suma de las proyecciones horizontales de las copas sobre el suelo. Sin embargo, debido a la complejidad estructural de los bosques tropicales y la dificultad para medir estas proyecciones, generalmente se utiliza el área basal como sustituto. El área basal, calculada a partir del diámetro del fuste, está altamente correlacionada con el tamaño de la copa, por lo que es un buen indicador de dominancia. La dominancia absoluta corresponde a la suma de las áreas basales de los individuos de una especie, y la dominancia relativa es el porcentaje que esta área basal representa del total del muestreo (Lamprecht, 1990).
- La **frecuencia** indica la presencia o ausencia de una especie en las parcelas de muestreo. La frecuencia absoluta se expresa en porcentaje, donde 100% significa que la especie está presente en todas las subparcelas. La frecuencia relativa se calcula como el porcentaje que representa la frecuencia absoluta de una especie en la suma de todas las frecuencias absolutas. La distribución de frecuencias proporciona una primera aproximación sobre la homogeneidad o heterogeneidad florística del bosque, donde altos valores en clases superiores indican una composición más homogénea (Lamprecht, 1990).

La obtención de valores similares de IVI para especies indicadoras sugiere una composición y estructura semejantes en los rodales estudiados (Lamprecht, 1990).

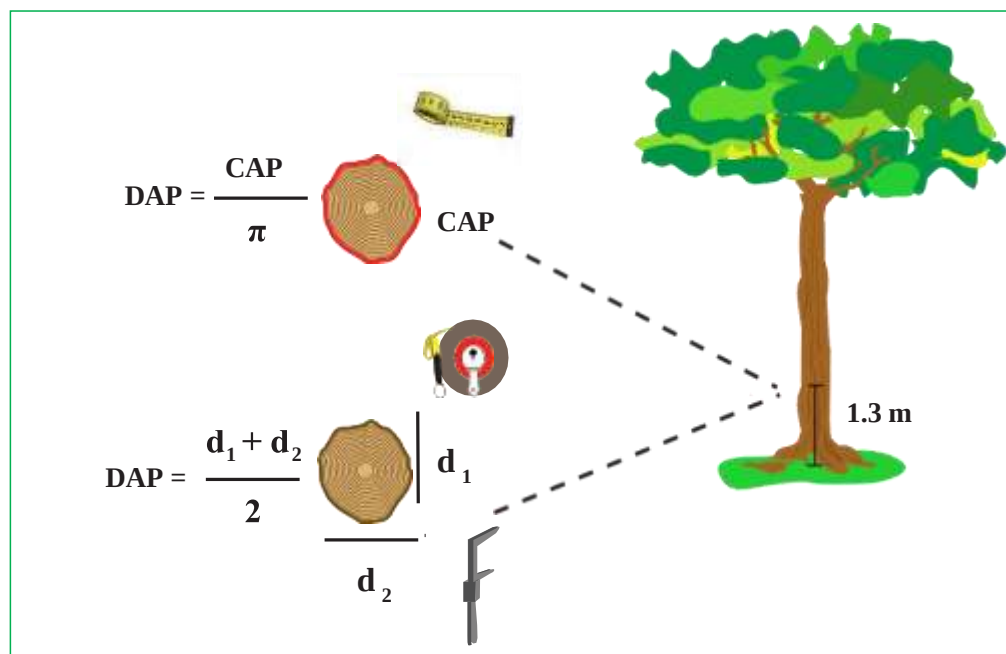
c) Variables para analizar la estructura horizontal

- **Diámetro a la Altura del Pecho (DAP)**

El **Diámetro a la Altura del Pecho (DAP)** es una medida estándar en estudios forestales que corresponde al diámetro del tronco del árbol medido a 1,3 metros sobre el nivel del suelo. Esta medida se utiliza para estimar variables estructurales del bosque, como la biomasa, volumen y estructura de la vegetación (Prodan *et al.*, 1997).

El DAP puede medirse con diferentes instrumentos, tales como la cinta métrica, que permite obtener la circunferencia a la altura del pecho, y posteriormente calcular el diámetro dividiendo entre π (3,1416), o mediante instrumentos como la forcípula finlandesa, que facilita la medición directa del diámetro, especialmente en árboles con formas irregulares de fuste (Gutiérrez, 2013).

Ilustración 1. Medición del Diámetro a la Altura de Pecho (DAP) a 1,3 metros

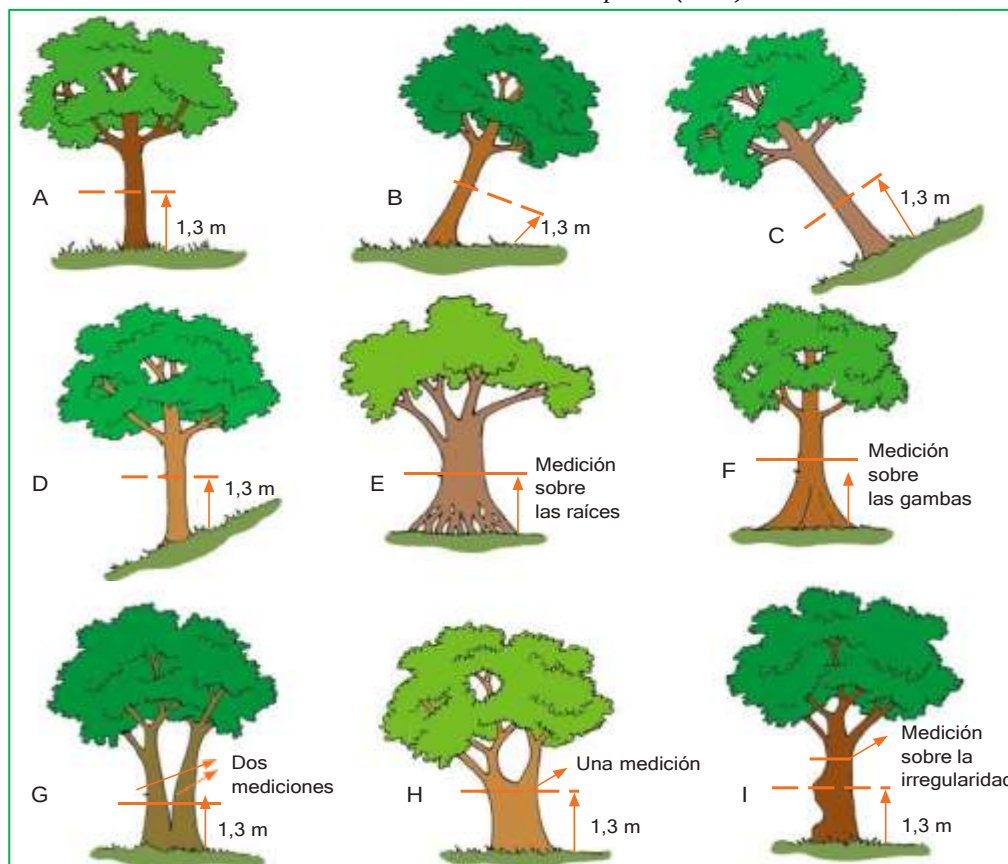


FUENTE: PGFC adaptado de Gutiérrez (2013)

Existen casos especiales que requieren criterios específicos al momento de medir el Diámetro a la Altura del Pecho, debido a la morfología irregular de algunos árboles:

- ✓ **Árbol en planicie (A):** Uno de los casos generales, se tomó las medidas a 1,3 metros, de cualquier de los lados del tronco del árbol.
- ✓ **Árbol inclinado en planicie (B):** Se tomó la medida el diámetro a 1,3 metros del suelo a lo largo del tronco, tomando la medida ubicándose por debajo de la base en la que se inclina el árbol, formando un ángulo.
- ✓ **Árbol inclinado en pendiente (C):** Para estos casos se mensuró el DAP a 1,3 metros, ubicando por encima de la base del árbol.
- ✓ **Árbol recto en pendiente (D):** En este caso se mensuró el DAP a 1,3 metros, ubicando por encima de la base del árbol.
- ✓ **Árbol con raíz aérea (E):** La medición del diámetro se realizó a 1,3 metros, a partir del límite entre el tronco y las raíces.

Ilustración 2. Medición del diámetro a la altura del pecho (DAP) de los árboles



FUENTE: Adaptado de Molina (2019).

1.3.2.2. Estructura vertical y estratificación del bosque

a) Estructura vertical

Según Fredericksen *et al.* (2001), la **estructura vertical** de un bosque se refiere a la distribución de los árboles a lo largo del perfil altitudinal del ecosistema. Esta organización depende tanto de las características propias de las especies que lo componen como de las condiciones micro climáticas que varían con la altura. Estas diferencias permiten que distintas especies se ubiquen en los niveles que mejor satisfacen sus requerimientos ecológicos y fisiológicos.

b) Estratificación arbórea

Los **estratos** corresponden a agrupaciones de árboles cuyas copas han alcanzado niveles energéticos adecuados para su pleno desarrollo, permitiéndoles expresar su forma arquitectónica de manera completa. En este análisis no se incluyen aquellos individuos en crecimiento que aún no se han establecido en un microambiente con suficiente disponibilidad de recursos. Un concepto clave en esta clasificación es el punto de **inversión morfológica**, definido como la altura a la que se inserta la primera rama gruesa de la copa de un árbol. Al trazar una superficie imaginaria uniendo estos puntos entre árboles del mismo nivel jerárquico, se delimita lo que se conoce como superficie de inversión morfológica. Asimismo, si se traza una superficie entre las partes superiores de las copas de árboles de un mismo nivel, se define la superficie de inversión ecológica. Los estratos del bosque se encuentran delimitados entre estas dos superficies, tanto morfológica y ecológica (Fredericksen *et al.*, 2001).

La superficie superior del bosque, conocida como **dosel**, tiene un aspecto irregular debido a la integración de diferentes fases sucesionales en altura. Esta superficie presenta propiedades aerodinámicas que le permiten resistir los efectos del viento sin daños severos. En ella destacan los árboles **emergentes**, especies adaptadas a condiciones microclimáticas más extremas, como mayor exposición al viento y menor humedad relativa (Fredericksen *et al.*, 2001).

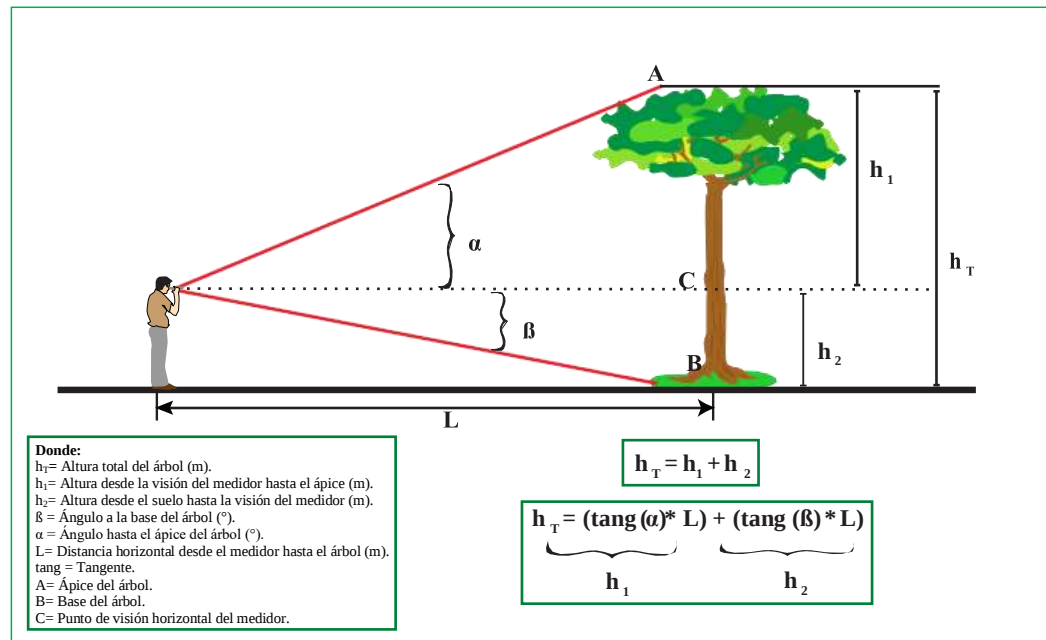
d) Variables para analizar la estructura vertical

- **Altura total**

La altura total (HT) es una de las variables estructurales más importantes para caracterizar la estructura del bosque, ya que permite describir la arquitectura del dosel y comprender la dinámica ecológica de las especies arbóreas. Esta se define como la distancia vertical desde la base del árbol, en contacto con el suelo, hasta el ápice o cima, entendido como la parte más alta de la copa que constituye la prolongación del eje principal del tronco (Juárez Félix, 2014).

La medición de la altura puede realizarse mediante métodos directos o indirectos, siendo estos últimos los más comúnmente empleados en campo debido a las limitaciones logísticas. Los métodos indirectos utilizan instrumentos ópticos como clinómetros, que estiman la altura con base en ángulos visuales desde una distancia determinada. También se han desarrollado aplicaciones móviles, como el Clinómetro Forestal, que permiten calcular de manera rápida y precisa la altura total del árbol, combinando tecnología y facilidad de uso en campo (Dauber, 1999; Gutiérrez, 2013).

Ilustración 3. Mensuración de la altura total del árbol



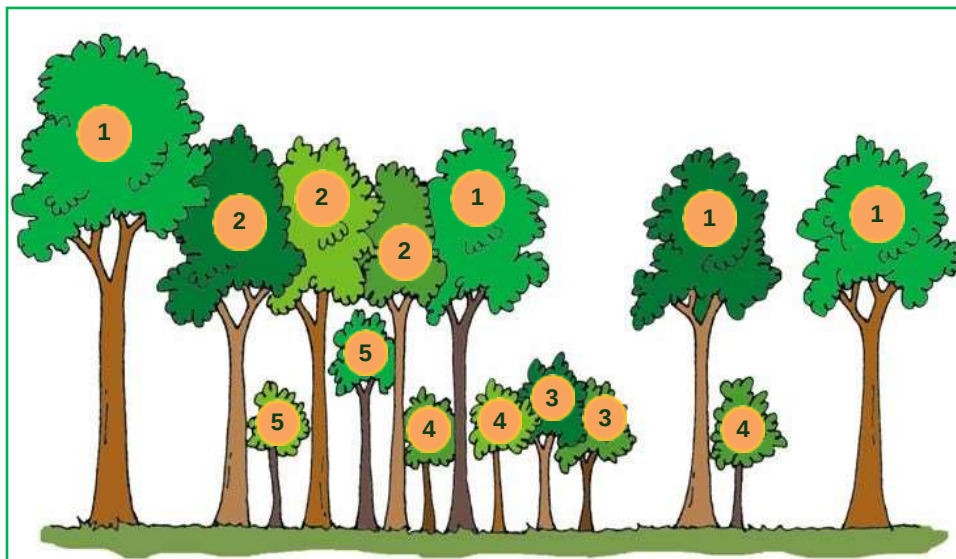
FUENTE: Adaptado de Gutiérrez (2013).

- **Iluminación y la posición de la copa**

La evaluación de la iluminación y la posición de la copa permite entender el grado de competencia lumínica entre los árboles en el bosque, aspecto clave para interpretar patrones de crecimiento y dinámica del dosel. Según adaptación de Dawkins (1958), citado por Manzanero y Pinelo (2003), se reconocen cinco categorías que integran la posición en el dosel y la cantidad de luz recibida:

- 1. Emergentes con luz plena:** Copas completamente expuestas, con luz vertical y lateral, ubicadas por encima del dosel dominante, sin interferencia de otras copas cercanas.
- 2. Codominantes con luz vertical:** Copas iluminadas desde arriba, pero con sombreado lateral causado por copas adyacentes de igual o mayor altura.
- 3. Bajo el dosel con luz parcial:** Copas parcialmente iluminadas desde arriba, ubicadas bajo cobertura forestal que bloquea parcialmente la entrada de luz.
- 4. Con luz lateral:** Copas sin acceso a luz vertical directa, pero que reciben algo de iluminación desde los lados debido a claros o interrupciones en el dosel.
- 5. Suprimidos sin luz:** Copas completamente sombreadas, situadas bajo un dosel cerrado, sin recibir luz directa desde ninguna dirección.

Ilustración 4. Exposición de luz en la copa



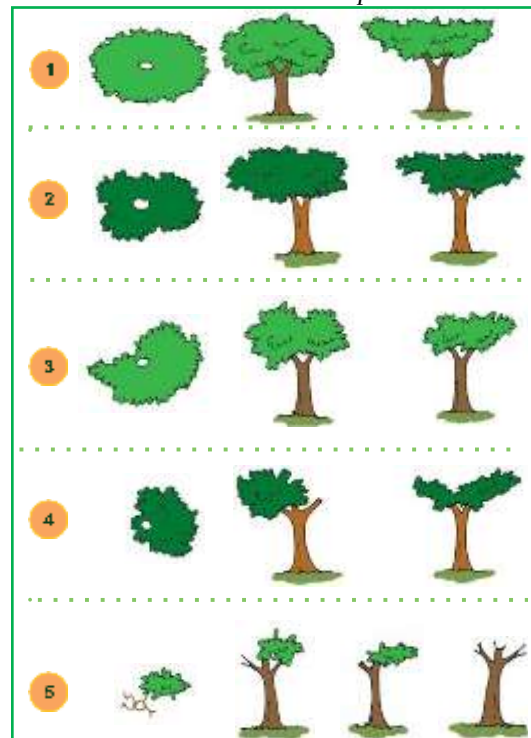
FUENTE: Adaptado de Molina (2019).

- **Forma de la copa**

La forma de la copa es un indicador esencial de la capacidad del árbol para captar luz, lo que influye directamente en su crecimiento y desarrollo. Según la clasificación propuesta por Dawkins (1958) y modificada por Hutchinson (1993), citado por BOLFOR (1999), se reconocen cinco clases.

1. **Copa perfecta**, con forma circular completa y simétrica;
2. **Copa con buena forma**, de contorno algo irregular con defectos leves como ramas secas o ligera asimetría;
3. **Copa claramente asimétrica y rala**, con follaje escaso y distribución desigual;
4. **Copa pobre**, con fuerte asimetría y pocas ramas principales; y
5. **Vivo sin copa o con copa muy pobre**, donde el árbol presenta una copa extremadamente reducida o solo algunas ramas vivas.

Ilustración 5. Forma de copa de los árboles



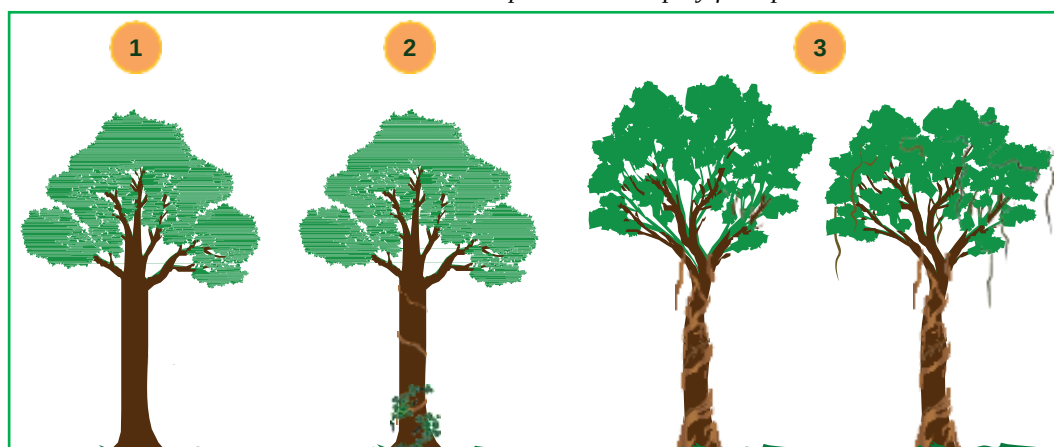
FUENTE: Adaptado de Molina (2019).

- **Grado de competencia de lianas en árboles**

Las lianas representan un factor de competencia importante en los bosques, ya que interfieren con la disponibilidad de luz, agua y nutrientes, afectando el crecimiento y aumentando la mortalidad de los árboles. Además, pueden provocar deformaciones mediante el estrangulamiento del fuste. Para evaluar esta competencia, se aplicó una escala cualitativa basada en Mostacedo y Fredericksen (2000), adaptada por Molina (2019), que clasifica el grado de infestación de la siguiente manera:

- 1. Árbol libre de lianas:** Sin lianas presentes en el fuste ni en la copa.
- 2. Lianas presentes sin afectación:** Lianas en el fuste sin estrangulamiento y/o menos de $\frac{1}{3}$ de la copa cubierta, sin afectar el crecimiento.
- 3. Lianas afectando potencialmente:** Lianas con estrangulamiento en el fuste y/o más de $\frac{1}{3}$ de la copa cubierta, afectando potencialmente el crecimiento.
- 4. Lianas en fuste y copa sin impacto:** Lianas presentes en ambas partes, pero sin afectar el crecimiento terminal.
- 5. Lianas cubriendo totalmente la copa:** La copa está completamente cubierta por lianas, afectando severamente el crecimiento terminal.

Ilustración 6. Grados de competencia en copa y fuste por lianas



FUENTE: Adaptado de Molina (2019).

1.4. La dinámica arbórea y su importancia

La dinámica arbórea es un proceso clave en la ecología forestal, vinculado al éxito de la regeneración natural, la cual depende de factores ecológicos como la fructificación, la viabilidad de las semillas y la tolerancia a la luz. Según Lamprecht (1990), las especies arbóreas pueden clasificarse en heliófitas, esciófitas y hemisciófitas, según sus requerimientos de iluminación, lo que condiciona su establecimiento y desarrollo en distintos ambientes del bosque.

La **regeneración natural** es un componente clave de la dinámica arbórea. Se define como el proceso por el cual nuevos individuos de especies forestales se establecen en un área sin intervención humana directa, a través de la diseminación de semillas o medios vegetativos naturales. Este proceso puede ocurrir en diferentes situaciones, como en espacios sin alteraciones previas, en áreas que han sufrido perturbaciones como incendios o en montes tratados por cortas de regeneración (Serrada, 2003).

Según Fredericksen *et al.* (2001), la regeneración natural se clasifica en categorías según el tamaño y desarrollo de los individuos, que se describen a continuación:

- **Plántula:** Individuos con menos de 30 cm de altura, correspondientes a la etapa inicial tras la germinación.
- **Brinzal:** Árboles entre 0,3 m y menos de 1,5 m de altura, en una fase temprana de establecimiento.
- **Latizal Bajo:** Individuos de más de 1,5 m de altura y DAP menor a 5 cm, con crecimiento avanzado en altura, pero poco diámetro.
- **Latizal Alto:** Árboles con DAP entre 5 y 10 cm, en proceso de engrosamiento y ocupando posiciones intermedias.
- **Fustal:** Individuos con DAP entre 10 y 20 cm, más desarrollados, con estructura robusta y crecimiento sostenido.

En lo cual, el éxito de la regeneración depende de la viabilidad de las semillas, condiciones ambientales y la tolerancia a la luz de cada especie (Lamprecht, 1990).

1.5. Gremios ecológicos y estados sucesionales

1.5.1. Gremios ecológicos

Según Fredericksen *et al.* (2001), los gremios ecológicos son agrupaciones de especies que comparten características similares en cuanto a sus requerimientos ecológicos, especialmente relacionados con factores ambientales como la disponibilidad de luz, agua y nutrientes del suelo.

Una de las variables más empleadas para establecer los gremios ecológicos es la **tolerancia a la sombra**, ya que permite determinar cómo las especies responden a las condiciones de luz en las distintas fases de sucesión ecológica del bosque. Esta característica está estrechamente vinculada con el momento en que las especies aparecen o predominan durante el proceso de regeneración natural, lo que se conoce como estado sucesional. En este sentido, las especies que colonizan rápidamente los ambientes abiertos y alterados, inmediatamente después de una perturbación, suelen ser intolerantes a la sombra y se agrupan en el gremio ecológico de las **pioneras o heliófitas**. Estas especies requieren condiciones de alta luminosidad para establecerse, crecer y desarrollarse (Fredericksen *et al.*, 2001).

Por otro lado, existen especies que presentan cierta tolerancia a la sombra y no necesitan de grandes alteraciones en el bosque para regenerarse. Estas forman parte del gremio ecológico de las **no pioneras o esciófitas**. Es importante destacar que, si bien las esciófitas son capaces de crecer en ambientes sombreados, esto no significa que sean intolerantes a la luz solar; de hecho, muchas de estas especies pueden desarrollarse mejor bajo iluminación completa. Sin embargo, en las etapas iniciales de sucesión, cuando el hábitat está más expuesto a la luz solar debido a la apertura del dosel, las esciófitas son menos frecuentes, ya que las heliófitas tienden a establecerse y competir de manera más efectiva bajo estas condiciones (Fredericksen *et al.*, 2001).

Con base en la tolerancia a la sombra y su papel en la sucesión ecológica, las especies arbóreas se clasifican en cuatro gremios principales:

- **Heliófitas efímeras:** son especies muy intolerantes a la sombra, de rápido crecimiento y corta vida, que se establecen en ambientes muy alterados durante las etapas iniciales de la sucesión.
- **Heliófitas durables:** son también intolerantes a la sombra, pero de vida larga, que logran desarrollarse hasta ocupar posiciones dominantes en el dosel superior del bosque.
- **Esciófitas parciales:** son especies que presentan cierta tolerancia a la sombra y requieren la formación de claros para desarrollarse plenamente.
- **Esciófitas totales:** son especies altamente tolerantes a la sombra, capaces de sobrevivir y crecer bajo el dosel cerrado del bosque durante largos periodos.

Los gremios ecológicos agrupan especies con requerimientos similares, especialmente respecto a la luz, mostrando cómo se adaptan, compiten y se establecen en distintas fases del desarrollo forestal, influyendo directamente en la sucesión, dinámica y estructura del ecosistema.

1.6. Gradientes altitudinales y su impacto de la diversidad

Un gradiente altitudinal es la variación de la elevación en un paisaje determinado, lo que influye significativamente en la composición y distribución de las especies vegetales. Estos gradientes generan cambios en factores ambientales, lo que repercute en la diversidad arbórea (Körner, 2007).

Según Rahbek (2005), la riqueza de especies tiende a disminuir a medida que aumenta la altitud, debido a condiciones climáticas más adversas y una menor disponibilidad de recursos. Sin embargo, en algunos casos, se ha observado un pico de diversidad en altitudes intermedias, asociado a una combinación de factores ambientales favorables (Grytnes & Vetaas, 2002).

Además, otros factores como la competencia interespecífica, la disponibilidad de nutrientes y la historia evolutiva de las especies también juegan un papel crucial en la estructuración de las comunidades arbóreas a diferentes altitudes (Malhi *et al.*, 2010).

1.7. La diversidad arbórea

La **diversidad arbórea** se refiere a la variedad y heterogeneidad de especies de árboles presentes en un ecosistema, lo que incluye su diversidad genética, específica y ecosistémica. Según Moreno (2001), la biodiversidad puede definirse como la variabilidad entre los organismos vivos de todos los ecosistemas, así como los complejos ecológicos de los que forman parte.

Por otro lado, Nuñez *et al.* (2003) describe la biodiversidad como el número total de especies de animales, plantas y microorganismos que habitan en un área específica. Este enfoque resalta la riqueza de especies como un indicador clave de la diversidad biológica en un entorno determinado.

1.7.1. Formas de medir la diversidad

1.7.1.1. Componentes de la diversidad

La diversidad, como una propiedad inherente de las comunidades ecológicas, ha sido objeto de numerosos estudios que buscan definir parámetros que la caractericen de manera precisa. Sin embargo, debido a la interrelación que existe entre las comunidades en un paisaje, resulta difícil delimitarlas claramente. En consecuencia, se ha desarrollado un enfoque que divide la biodiversidad en tres componentes principales:

- **Diversidad alfa (α):**

La diversidad alfa representa la riqueza de especies dentro de una comunidad ecológica homogénea. Está influenciada directamente por factores ambientales locales y las interacciones poblacionales. A nivel local, la relación entre el área y el número de especies juega un papel importante, ya que, en general, un área más grande tiende a albergar una mayor cantidad de especies (Moreno, 2001).

- **Diversidad beta (β)**

Este componente mide los cambios en la composición de especies entre distintas comunidades o hábitats a lo largo de un gradiente ambiental o espacial. La diversidad

beta proporciona información clave sobre la heterogeneidad del paisaje, al identificar el grado de diferenciación entre comunidades ecológicas (Moreno, 2001).

- **Diversidad gamma (γ)**

La diversidad gamma se refiere a la diversidad total de especies dentro de una región amplia que incluye múltiples comunidades. Representa la integración de la diversidad alfa y beta, ofreciendo una perspectiva más amplia de la biodiversidad a nivel regional o de paisaje (Moreno, 2001).

- **Diversidad delta (δ)**

Se refiere a la diferenciación geográfica a gran escala, considerando comparaciones entre regiones climática y biológicamente distintas (Whittaker 1956 y 1960) citado por (SIMEF, 2020).

- **Diversidad épsilon (ϵ)**

Representa la diversidad a nivel regional extenso, incluyendo múltiples paisajes y ecosistemas que abarcan varias unidades de diversidad gamma y expresa la riqueza biogeográfica total (Whittaker 1956 y 1960) citado por (SIMEF, 2020).

1.7.2. Métodos para medir la diversidad

- **Riqueza de especies:** Propuesta por Whittaker (1972), esta medida evalúa el número total de especies presentes en una comunidad. Es un enfoque directo para describir la biodiversidad, pero no considera cómo están distribuidas estas especies ni su importancia relativa dentro de la comunidad.
- **Estructura de la comunidad:** Este método se enfoca en la distribución proporcional de las especies, evaluando la dominancia, que refleja la prevalencia de ciertas especies, y la equidad, que mide cuán uniformemente están distribuidas las especies dentro de la comunidad (Moreno, 2001).

Según Magurran (2008), la elección de un método para medir la biodiversidad depende del contexto del estudio y la información disponible.

1.8. Importancia de los bosques montanos

Los bosques montanos son ecosistemas de vital importancia debido a su papel en la regulación del ciclo hidrológico, la conservación de la biodiversidad y la mitigación del cambio climático. Según Hamilton (2002), estos bosques actúan como reservorios de agua, regulando el flujo hídrico y reduciendo el riesgo de inundaciones en las zonas bajas. Además, son esenciales para la captura de carbono, contribuyendo significativamente a la reducción de gases de efecto invernadero (Bruijnzeel *et al.*, 2011). Según Cuesta *et al.* (2009), el bosque montano es un ecosistema frágil y esencial por su notable biodiversidad, su función en el ciclo hidrológico al captar humedad de los bancos de nubes, y su contribución al equilibrio climático mediante el almacenamiento de carbono. Además, sustenta a millones de personas al garantizar el suministro de agua en los Andes Tropicales. Ante las amenazas del cambio climático y la transformación del uso del suelo, su conservación se vuelve estratégica para mantener la estabilidad ecológica y climática de la región.

1.9. Casos de estudios relevantes en la región de Tarija

Zenteno-Ruiz & López (2010) realizaron un estudio pionero en una hectárea de bosque tucumano-boliviano en Bolivia, caracterizando su composición, abundancia y estructura. Encontraron un bosque diverso y poco perturbado, con riqueza y diversidad similares o superiores a otros bosques secos de la región. Además, analizaron por primera vez los patrones espaciales de los árboles, que resultaron mayormente aleatorios con cierta agregación en las especies.

Gallegos *et al.* (2019) estudiaron la diversidad arbórea del bosque tucumano-boliviano en la alta cuenca del río Bermejo (Tarija), analizando la variación de la diversidad alfa, beta y gamma en un gradiente altitudinal de 650 a 2600 m.s.n.m. En 13 parcelas de 0,1 ha registraron 2758 individuos y 143 especies, con un pico de riqueza entre 900 y 1200 m.s.n.m. y una disminución entre 1700 y 2000 m.s.n.m. La diversidad beta fue alta dentro y entre formaciones, mostrando un fuerte recambio de especies influenciado por altitud y pendiente.

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO II

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Descripción de la zona de estudio

2.1.1. Ubicación y delimitación

El área de estudio se encuentra ubicada en el predio denominado El Sevillar, situado dentro de la comunidad de San Antonio, correspondiente al Distrito 11 del municipio de Padcaya, en la provincia Arce del departamento de Tarija, al sur de Bolivia. El predio se localiza a una altitud media de 700 metros sobre el nivel del mar, con coordenadas geográficas 22°22'28" de latitud sur y 64°07'14" de longitud oeste.

Desde el centro de la ciudad de Tarija, capital departamental, la distancia hasta el área de estudio es de aproximadamente 246 kilómetros, siguiendo la carretera que conecta esta ciudad con el municipio de Bermejo. En cambio, desde la ciudad de Bermejo, el acceso es más directo, con una distancia estimada de 53 kilómetros. El trayecto desde Bermejo hacia San Antonio se realiza tomando la carretera internacional N° 33, en dirección noroeste. Aproximadamente 50 metros antes de finalizar el tramo pavimentado.

El terreno en cuestión es de propiedad privada, perteneciente a Ana María Alemán y Concepción Velásquez Ramos, quienes cuentan con la documentación legal correspondiente, debidamente registrada. Según la información proporcionada por los propietarios y el Instituto Nacional de Reforma Agraria (INRA), el predio está identificado con el código catastral N° 6020170000000. Posee una superficie total de 72,63 hectáreas y un perímetro de 6,90 kilómetros, conforme a los registros catastrales vigentes. De acuerdo con esta misma fuente, el predio colinda al norte con la propiedad “El Astillero”, al sur con “El Gavilán”, al este con la República de Argentina y al oeste con la comunidad de Urucurenda.

El nombre del predio, El Sevillar, se origina en la abundante presencia de la especie arbórea *Anadenanthera colubrina*, conocida localmente como cebil, la cual domina gran parte de la estructura forestal del sitio (**Ver Mapa N° 1, Anexo cartográfico**).

2.1.2. Características físicas y topográficas

2.1.2.1. Rango altitudinal y relieve

El área de estudio presenta una distribución altitudinal escalonada en tres gradientes claramente definidos según el Modelo de Elevación Digital (MED) de AlosPALSAR (2023). El **gradiente inferior**, que abarca altitudes entre 519 y 600 m.s.n.m., se distingue por un relieve más suave y accesible. El **gradiente intermedio**, comprendido entre los 600 y 800 m.s.n.m., refleja una zona de transición morfológica con pendientes moderadas. Finalmente, el **gradiente superior**, que se extiende desde los 800 hasta los 1148 m.s.n.m., muestra un relieve más abrupto y escarpado, asociado a una mayor complejidad topográfica (**véase mapas N° 2 y 3, Anexo cartográfico**).

2.1.2.2. Pendientes y formas del terreno

Según el Modelo de Elevación Digital de AlosPALSAR (2023), el área de estudio presenta un relieve abrupto dominado por pendientes escarpadas, con una pendiente media del 20,43%. Las zonas onduladas se localizan en sectores intermedios, mientras que las superficies planas son mínimas (**véase mapa N° 4, Anexo cartográfico**).

2.1.2.3. Orientación solar de las laderas

La exposición solar varía según el gradiente altitudinal y la topografía compleja del área estudiada. En el gradiente inferior predominan laderas orientadas al este y suroeste; en el intermedio, hacia el este, noreste y sureste; y en el superior, hacia el sureste, noreste y este (**véase Mapa N° 5, Anexo cartográfico**).

2.1.2.4. La fisiografía

Según una clasificación adaptada del MDS (2004), el área de estudio forma parte del paisaje Subandino y comprende tres unidades fisiográficas principales bien definidas: llanura coluvio-aluvial en zonas bajas con depósitos recientes, pie de monte como zona de transición con pendientes suaves, y serranía con relieves escarpados vinculados a estructuras tectónicas importantes (**véase mapa N° 6, Anexo cartográfico**).

2.1.2.5. Hidrografía

Según la metodología de Pfafstetter (MMAYA, 2010), la red hidrográfica del área pertenece a la Cuenca de La Plata (código 8 y 85), integrándose a la Cuenca del Bermejo (858) y sus subcuencas 8587 y 85876. En cuanto a la red de drenaje, en las zonas escarpadas los cursos de agua son rectilíneos, profundos y encajonados por la fuerte pendiente. En áreas intermedias, el flujo pierde velocidad y el drenaje se vuelve sinuoso. En las partes bajas y planas, cerca de cauces o terrazas aluviales, se favorece la infiltración del agua. El principal arroyo es la quebrada “*La Juca*”, que desemboca en el río Grande de Tarija (**véase mapa N° 7, Anexo cartográfico**).

2.1.2.6. Suelos y capacidad de uso

2.1.2.6.1. Textura

Según datos de SoilGrids (2023), la textura dentro del área de estudio se clasifica predominantemente como franco-arenosa, con ligeras variaciones a lo largo del gradiente altitudinal. En general, los suelos presentan proporciones cercanas al 27% de arcilla, entre 40 y 41% de arena y 31 a 32% de limo, mostrando una textura equilibrada y adecuada para el desarrollo vegetal (**véase mapas N° 8, 9 y 10, Anexo cartográfico**).

2.1.2.6.2. Densidad aparente

Según SoilGrids (2023), la densidad aparente del suelo se mantiene constante a lo largo del gradiente, con un promedio de 1,13 g/cm³, indicando una estructura suelta a moderadamente compacta que favorece la penetración radicular y la retención de humedad sin comprometer la porosidad (**véase mapa N° 11, Anexo cartográfico**).

2.1.2.6.3. Potencial de hidrógeno (pH)

Según SoilGrids (2023), el pH del suelo se mantiene estable y ligeramente ácido a lo largo del gradiente altitudinal, con promedio de 5,6, típico de suelos con alta materia orgánica y condiciones húmedas de zonas montañosas, sin representar limitación significativa para el desarrollo vegetal (**véase mapa N° 12, Anexo cartográfico**).

2.1.2.6.4. Carbono orgánico y reserva de carbono

Según SoilGrids (2023), el contenido de carbono orgánico y la reserva de carbono en el suelo disminuyen con la altitud, con valores superiores al 6% y 78 58 toneladas por hectárea respectivamente en los sectores bajos, y cerca del 4,6% y 58 toneladas por hectárea, en las zonas más elevadas (**véase mapas N° 13 y 14, Anexo cartográfico**).

2.1.2.7. Geología

Según GEOBOL (1978), la geología del área de estudio está dominada por dos unidades geológicas principales. La primera unidad corresponde al periodo Paleógeno - Neógeno (Pg-Ng), y está compuesta por areniscas, lentes de conglomerados, lutitas y limolitas. La segunda unidad geológica, correspondiente al Triásico (Tr), se encuentra en la Faja Subandina y está constituida principalmente por areniscas, conglomerados, arcilitas, calizas y yeso. En cuanto a la **geología estructural**, el área presenta una falla geológica que afecta la geología superficial y los procesos hidrogeológicos, mientras que un anticlinal cercano a 300 metros del área de estudio, influye en la distribución de las capas rocosas y el patrón de drenaje (**véase mapa N° 15, Anexo cartográfico**).

2.1.3. Clima y condiciones meteorológicas

2.1.3.1. Temperatura

Según datos proporcionados por NASA (2023), la **temperatura máxima** promedio anual dentro del área de estudio se sitúa en 41,61°C, con los meses más cálidos concentrados entre septiembre y octubre, cuando los valores pueden superar los 40°C. Por otro lado, los meses más frescos se registran generalmente en abril y mayo, con máximas en torno a los 32°C.

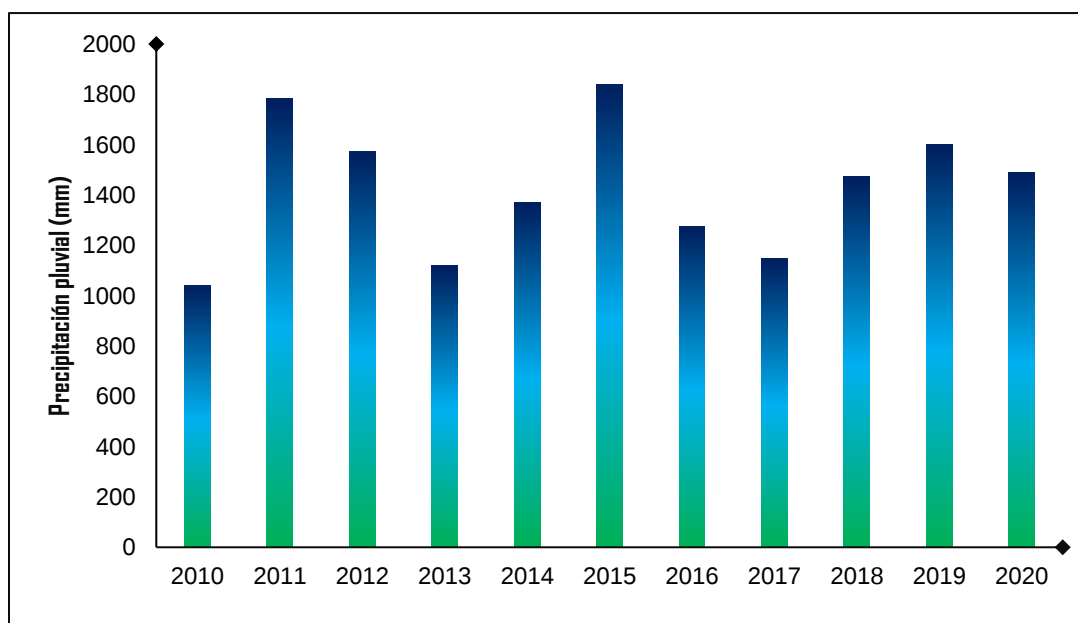
La **temperatura media** anual se mantiene alrededor de los 22,23°C, con máximos mensuales promedio que alcanzan los 25,72°C durante los meses de octubre, noviembre y diciembre, mientras que los valores más bajos se observan en mayo, junio y julio, con medias cercanas a los 17°C (**véase mapa N° 16, Anexo cartográfico**).

En cuanto a la **temperatura mínima**, el promedio anual se ubica en 2,36°C, aunque con una amplitud térmica considerable. Las mínimas más bajas ocurren en junio y julio, con promedios cercanos a los 3°C y con registros extremos por debajo de los 2°C. En contraste, los meses más cálidos, como enero y febrero, presentan mínimas promedio alrededor de los 16°C.

2.1.3.2. Precipitación

Según Evaluación de Recursos S.A. (EVARSA) (2024), donde en la parte inferior del área de estudio se instaló una estación pluviométrica que registró una precipitación media anual de **1427,87 mm**, evidenciando la alternancia entre años húmedos y secos. La mayor concentración de lluvias ocurre entre enero y marzo, durante la temporada lluviosa, acumulándose la mayor parte de la precipitación anual, con enero y marzo como los meses más lluviosos. De abril a agosto, la región presenta una estación seca prolongada con lluvias mínimas o nulas. A partir de septiembre, las precipitaciones aumentan gradualmente hasta alcanzar su pico en el primer trimestre del siguiente año (véase Gráfico 1 y Mapa N° 17, Anexo cartográfico).

Gráfico 1. Precipitación anual del área de estudio



FUENTE: Elaboración propia, con datos de EVARSA (2024).

2.1.3.3. Humedad relativa

Según datos proporcionados por NASA (2023), la humedad relativa en el área de estudio presenta una marcada estacionalidad, con un promedio anual que varía entre el 51% y el 61%. Los meses más húmedos se concentran a inicios de año, especialmente durante enero, febrero y marzo, cuando los valores pueden superar el 80%, coincidiendo con la temporada lluviosa. En contraste, los meses más secos, como julio y agosto, presentan niveles mínimos de humedad relativa, oscilando entre 32% y 42%.

2.1.3.4. Dirección y velocidad de los vientos

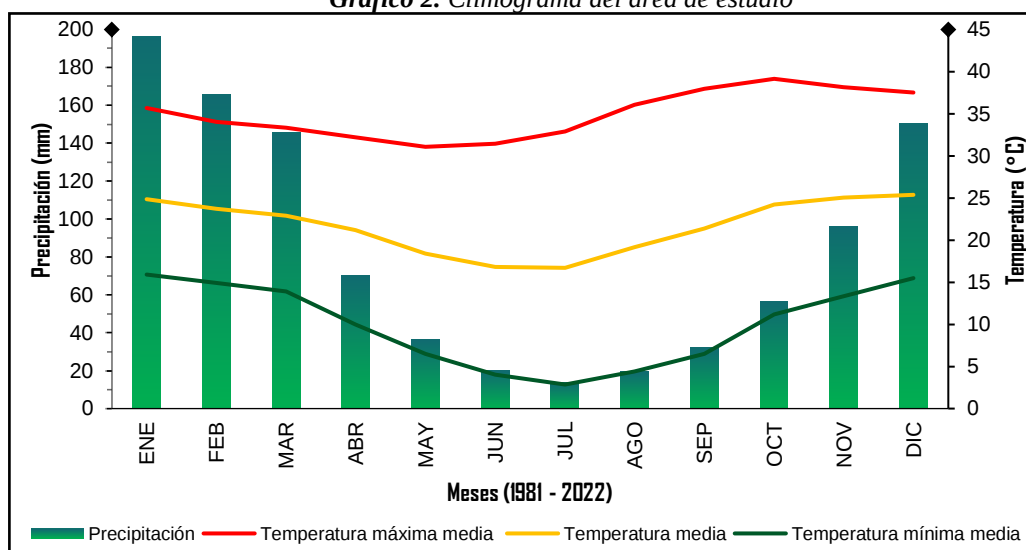
Según NASA (2023), la velocidad del viento en el área de estudio varía entre 3,6 y 5,9 km/h. Los vientos más intensos se registran en la estación seca, de junio a septiembre, con un promedio de 5,9 km/h. En cambio, durante la temporada húmeda, especialmente en febrero y marzo, la velocidad disminuye a entre 3,6 y 4,2 km/h, indicando una atmósfera más estable y calmada. A lo largo del año el viento predominante sopla del **Sureste (SE)**, con ligeras variaciones hacia el **Este-Sureste**.

2.1.3.5. Climograma

El climograma del área de estudio muestra el régimen térmico y pluvial anual, evidenciando la interacción entre precipitación y temperatura. Las lluvias se concentran entre enero y marzo, alcanzando un pico de 165,5 mm en febrero. Desde abril, la precipitación disminuye notablemente, con mínimos entre junio y agosto de 2,0 a 0,3 mm, marcando una temporada seca que se extiende hasta septiembre. Luego, las lluvias comienzan a incrementarse nuevamente hacia noviembre y diciembre, completando el ciclo anual.

Las temperaturas máximas varían entre 31,9°C en mayo y un pico de 42°C en octubre a diciembre, marcando la transición hacia la temporada cálida. La media mensual va de 17°C en junio (el mes más frío) a 26,1°C en enero, con un repunte hacia septiembre y octubre. Las mínimas descienden hasta 3,1°C en julio, pero comienzan a subir desde agosto, alcanzando 15,6°C en diciembre (**véase Gráfico 2**).

Gráfico 2. Climograma del área de estudio



FUENTE: Elaboración propia, con datos de NASA (2023).

2.1.4. Características ecológicas y biológicas

2.1.4.1. Zona de vida

En cuanto a las zonas de vida, siguiendo la clasificación de Holdridge (1967) adaptada por Navarro & Maldonado (2002), la Serranía San Antonio se ubica dentro de la zona de vida denominada **Bosque Húmedo Montano Bajo Tropical**.

2.1.4.2. Formación vegetal

Según Navarro y Maldonado (2004), el área de estudio se encuentra dentro de la región andina tropical, específicamente en la provincia biogeográfica boliviano-tucumana. Esta región se caracteriza por la presencia de bosques montanos húmedos, conocidos localmente como Yungas, los cuales presentan una alta biodiversidad y un elevado grado de endemismo (véase mapa N° 18).

2.1.4.3. Flora

La vegetación presente en el área de estudio fue analizada según su forma de vida vegetal, permitiendo clasificar a las especies en categorías como fanerófitas (árboles y palmeras), nanofanerófitas y microfanerófitas (arbustos), hierbas (geófitas), epífitas, lianas (fanerófitas trepadoras), helechos (pteridofitas) y musgos (briofitas).

2.1.4.3.1. Vegetación arbórea - Fanerófitas

El área de estudio presenta las siguientes especies arbóreas:

Tabla 1. Flora arbórea registrada en el área de estudio

Nombre vernacular	Nombre científico	Familia
Urundel	<i>Astronium urundeuva</i> (Allemão) Engl.	Anacardiaceae
Chonta	<i>Acrocomia aculeata</i> (Jacq.) Lodd. ex Mart.	Areaceae
Palo bobo	<i>Tessaria integrifolia</i> Ruiz & Pav.	Asteraceae
Guaranguay	<i>Jacaranda mimosifolia</i> D.Don	Bignoniaceae
Lapacho rosado	<i>Tabebuia impetiginosa</i> (Mart. ex DC.) Standl.	Bignoniaceae
Lapacho amarillo	<i>Tabebuia heteropoda</i> (A:D:C:) Sandw.	Bignoniaceae
Lapacho amarillo	<i>Tabebuia serratifolia</i> (Vahl) G.Nicholson	Bignoniaceae
Lapacho amarillo	<i>Tabebuia chrysantha</i> (Jacq.) G.Nicholson	Bignoniaceae
Afata	<i>Cordia trichotoma</i> (Vell.) Arráb. ex Steud.	Boraginaceae
Lanza blanca	<i>Patagonula americana</i> L.	Boraginaceae
Lanza monteña	<i>Saccellium lanceolatum</i> Humb. & Bonpl.	Boraginaceae
Trema	<i>Trema micrantha</i> (L.) Blume	Cannabaceae
Amarillo	<i>Terminalia triflora</i> (Griseb.) Lillo	Combretaceae
Lecherón	<i>Sebastiania brasiliensis</i> Spreng.	Euphorbiaceae
Quemadillo	<i>Cnidoscolus vitifolius</i> (Mill.) Pax & K.Hoffm.	Euphorbiaceae
Tabaquillo rosado	<i>Croton densiflorus</i> Pax & K.Hoffm.	Euphorbiaceae
Leche-leche	<i>Sapium haematospermum</i> Müll.Arg.	Euphorbiaceae
Carnavalito	<i>Cassia carnavali</i> Speg.	Fabaceae
Cebil	<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell. Conc.) Benth.	Fabaceae
Espinillo	<i>Vachellia sieberiana</i> (DC.) Kyal. & Boatwr.	Fabaceae
Pacará	<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	Fabaceae
Pacay	<i>Inga edulis</i> Mart.	Fabaceae
Pacay mono	<i>Inga marginata</i> Willd.	Fabaceae
Pacay amargo	<i>Inga saltensis</i> Burkart	Fabaceae
Quina colorada	<i>Myroxylon peruiferum</i> L.f.	Fabaceae
Roble	<i>Amburana cearensis</i> (Allemão) A.C.Sm.	Fabaceae
Tipa blanca	<i>Tipuana tipu</i> (Benth.) Kuntze	Fabaceae
Tusca	<i>Acacia aroma</i> Gillies ex Hook. & Arn.	Fabaceae
Garrancho	<i>Acacia etilis</i> Speg.	Fabaceae
Vilcarán	<i>Piptadenia viridiflora</i> (Kunth) Benth.	Fabaceae
Virapita	<i>Peltophorum dubium</i> (Spreng.) Taub.	Fabaceae
Aegiphila	<i>Aegiphila saltensis</i> Moldenke	Lamiaceae
Laurel de río	<i>Ocotea puberula</i> (L.C.Rich.) Nees	Lauraceae

Nombre vernacular	Nombre científico	Familia
Laurel amarillo	<i>Nectandra angusta</i> Rohwer	Lauraceae
Laurel de falda	<i>Phoebe porphyria</i> (Griseb.) Mez	Lauraceae
Cascarilla	<i>Heliocarpus popayanensis</i> Kunth	Malvaceae
Luchán	<i>Ceiba chodatii</i> (Hassl.) Britten & Baker f.	Malvaceae
Hoja de anta	<i>Miconia calvescens</i> DC.	Melastomataceae
Cedrillo	<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	Meliaceae
Cedro	<i>Cedrela lilloi</i> C.DC.	Meliaceae
Goma	<i>Ficus</i> sp.	Moraceae
Alpamato	<i>Myrcianthes pseudomato</i> (D.Legrand) McVaugh	Myrtaceae
Arrayán	<i>Eugenia moraviana</i> O.Berg	Myrtaceae
Arrayán de cerro	<i>Blepharocalyx salicifolius</i> (Kunth) O.Berg	Myrtaceae
Guayabo	<i>Psidium guajava</i> L.	Myrtaceae
Mato	<i>Myrcianthes pungens</i> (O.Berg) D.Legrand	Myrtaceae
Yuruma	<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R.Br. ex Roem. & Schult.	Myrtaceae
Barbasco	<i>Phyllanthus acuminatus</i> Vahl	Phyllanthaceae
Cordoncillo hoja	<i>Piper amalago</i> L.	Piperaceae
Matico	<i>Piper aduncum</i> L.	Piperaceae
Mandor	<i>Coccoloba tiliacea</i> Jacq.	Polygonaceae
Membrillo	<i>Ruprechtia laxiflora</i> Meisn.	Polygonaceae
Palo blanco	<i>Calycophyllum multiflorum</i> Griseb.	Rubiaceae
Virreina del monte	<i>Pogonopus tubulosus</i> (DC.) K.Schum.	Rubiaceae
Sauco andino	<i>Sambucus peruviana</i> Kunth	Rutaceae
Sauco	<i>Zanthoxylum coco</i> Gillies ex Hook. & Arn.	Rutaceae
Guarumá	<i>Casearia sylvestris</i> Sw.	Salicaceae
Sauce criollo	<i>Salix humboldtiana</i> Willd.	Salicaceae
Ala de cóndor	<i>Cupania vernalis</i> Cambess.	Sapindaceae
Chal chal	<i>Allophylus edulis</i> (A.St.-Hil., A.Juss. & Cambess.) Radlk.	Sapindaceae
Suiquillo	<i>Diatenopteryx sorbifolia</i> Radlk.	Sapindaceae
Aguay	<i>Chrysophyllum gonocarpum</i> (Mart. & Eichler) Engl.	Sapotaceae
Tabaquillo blanco	<i>Solanum riparium</i> Pers.	Solanaceae
Capulín	<i>Styrax argenteus</i> C.Presl	Styracaceae
Perilla	<i>Phyllostylon rhamnoides</i> Taub.	Ulmaceae
Tala	<i>Celtis spinosa</i> Spreng.	Ulmaceae
Itapalla	<i>Urera baccifera</i> (L.) Gaudich. ex Wedd.	Urticaceae

FUENTE: Killeen et al. (1993) y Paniagua (1999) citado por Palomeque (2012).

2.1.4.3.2. Vegetación arbustiva – Nanofanerófitas y microfanerófitas

Este grupo está conformado por especies leñosas de menor porte, con alturas generalmente inferiores a 5 metros. Predominan en el sotobosque y áreas abiertas. Algunas especies identificadas incluyen:

Tabla 2. Flora arbustiva registrada en el área de estudio

Nombre vernacular	Nombre científico	Familia
Mora de sangre	<i>Rivina umilis</i>	<i>Phytolaccaceae</i>
Boton de oro	<i>Tithinia diversifolia</i>	<i>Asteraceae</i>
Chilca	<i>Baccharis salicifolia</i>	<i>Asteraceae</i>
Matico ribereño	<i>Piper sp.</i>	<i>Piperaceae</i>
Hediondilla monteña	<i>Psychotria carthagenensis</i>	<i>Rubiaceae</i>
Ajicillo rojo	<i>Dicliptera sp.</i>	<i>Acanthaceae</i>
Tártago	<i>Rscinus comunis</i>	<i>Euphorbiaceae</i>
Coto-coto	<i>Solanum consimile</i>	<i>Solanaceae</i>
Azafran	<i>Cnicothamnus lorentzii</i>	<i>Asteráceae</i>
Aguedita	<i>Caesaria sylvestris</i>	<i>Flacourtiaceae</i>
Quechualia fulta	<i>Vernonia fulta</i>	<i>Asteraceae</i>
Higuerilla	<i>Oreopanax kuntzei</i>	<i>Araliaceae</i>
Chirimolla de monte	<i>Amphilophium pannosum</i>	<i>Bignoniaceae</i>
Carne de vaca	<i>Clethra scabra</i>	<i>Clethraceae</i>
Celosa	<i>Mimosa sp</i>	<i>Leg.- Mim</i>
Hediondilla monteña	<i>Psychotria carthagenensis</i>	<i>Rubiaceae</i>
Coralillo	<i>Hamelia patens</i>	<i>Rubiaceae</i>
Guiraquiyo	<i>Manettia cordifolia</i>	<i>Rubiaceae</i>
Zarza mora	<i>Rubus imperialis</i>	<i>Rosaceae</i>

FUENTE: Identificación propia, basada en Paniagua (1999), citado por Palomeque (2012).

2.1.4.3.3. Vegetación herbácea – geofitas

Las geofitas son plantas herbáceas perennes que sobreviven a condiciones adversas mediante órganos subterráneos. En el área de estudio se identificaron especies como:

Tabla 3. Flora herbácea registrada en el área de estudio

Nombre vernacular	Nombre científico	Familia
Hierba	<i>Aphelandra hieronymi</i>	<i>Acanthaceae</i>
Alfilla flor anaranjada	<i>Dicliptera cf jujuyensis</i>	<i>Acanthaceae</i>
alfilla	<i>Justicia sp.</i>	<i>Acanthaceae</i>
Hierba de cesta	<i>Oplismenus undulatifolius</i>	<i>Marantaceae</i>
Maranta	<i>Maranta arundinacea</i>	<i>Marantaceae</i>
Pasto bajo	<i>Oplismenus hirtellus</i>	<i>Poaceae</i>
Alfilla flor blanca	<i>Justicia goudotii</i>	<i>Acanthaceae</i>
Borragilla	<i>Ageratum conyzoides</i>	<i>Asteraceae</i>

Nombre vernacular	Nombre científico	Familia
Cebollin	<i>Cyperus sp</i>	<i>Cyperaceae</i>
Afatilla	<i>Sida acuta</i>	<i>Malvaceae</i>
Arbolito	<i>Iresine sp</i>	<i>Amaranthaceae</i>
Redondita	<i>Hydrocotyle sp</i>	<i>Araliaceae</i>
Jazmin	<i>Madevilla laxa</i>	<i>Apocynaceae</i>
Margarita naranja	<i>Pseudogynoxys benthamii</i>	<i>Asteraceae</i>
Saitilla	<i>Bidens sp</i>	<i>Asteraceae</i>
Sueldaconsuelda	<i>Pseudelephantopus spiralis</i>	<i>Asteraceae</i>
Enredadera	<i>Anredera tucumanensis</i>	<i>Basellaceae</i>
cenizo o quihuilla	<i>Chenopidium álbum</i>	<i>Chenopodiaceae</i>
Cedron	<i>Cymbopogon citratus</i>	<i>Graminaceae</i>
Pasto chato comun	<i>Axonopus fissifolius</i>	<i>Poaceae</i>
Pasto camalote	<i>Urochloa plantaginea</i>	<i>Poaceae</i>
Yerba mora	<i>Solanum atriplicifolium</i>	<i>Solanaceae</i>
Cola de zorro	<i>Setaria sp.</i>	<i>Poaceae</i>
Pasto pata de gallo	<i>Anredera tucumanensis</i>	<i>Poaceae</i>

FUENTE: Identificación propia, basada en Paniagua (1999), citado por Palomeque (2012).

2.1.4.3.4. Epifitas

Las epífitas son plantas que crecen sobre otras sin parasitarlas, utilizando sus tallos o ramas como soporte. Dentro del área se identificaron especies de bromelias y cactáceas como:

Tabla 4. Flora epífita registrada en el área de estudio

Nombre vernacular	Nombre científico	Familia
Orquídea verde	<i>Encyclia argentinensis</i>	<i>Orchidaceae</i>
Orquídea patito	<i>Oncidium bifolium</i>	<i>Orchidaceae</i>
Tanque o payú	<i>Tillandsia maxima</i>	<i>Bromeliaceae</i>
Epifita rosada	<i>Tillandsia didisticha</i>	<i>Bromeliaceae</i>
Phayo	<i>Vriesea spp.</i>	<i>Bromeliaceae</i>
Cabeza de bruja	<i>Rhipsalis tucumanensis</i>	<i>Cactaceae</i>

FUENTE: Identificación propia, basada en Paniagua (1999), citado por Palomeque (2012).

2.1.4.3.5. Lianas - Fanerófitas trepadoras

Las lianas son plantas trepadoras leñosas que utilizan árboles y arbustos como soporte para alcanzar la luz. Entre las especies registradas destacan:

Tabla 5. Flora trepadora o lianosa registrada en el área de estudio

Nombre vernacular	Nombre científico	Familia
Enredadera	<i>Smilax campestris</i>	<i>Smilacaceae</i>
Uña de gato	<i>Dolichandra unguis-cati</i>	<i>Bignoniaceae</i>
Barba de viejo	<i>Clematis hankena</i>	<i>Ranunculaceae</i>
Bejuco común	<i>Seerjania glabrata</i>	<i>Sapindaceae</i>
Garabato	<i>Bytheria catalpifolia</i>	<i>Malvaceae</i>
Jamaicajama	<i>Triumfetta sp.</i>	<i>Malvaceae</i>
Enredadera	<i>Anredera tucumanensis</i>	<i>Basellaceae</i>
Beguco guiador	<i>Manettia cf cordifolia</i>	<i>Rubiaceae</i>

FUENTE: Identificación propia, basada en Paniagua (1999), citado por Palomeque (2012).

2.1.4.3.6. Helechos - Pteridófitas

Los helechos conforman un grupo de plantas sin flores, comunes en ambientes húmedos y sombreados. En el área se identificaron especies como:

Tabla 6. Flora pteridofita registrada en el área de estudio

Nombre vernacular	Nombre científico	Familia
Helecho	<i>Asplenium argentinum</i>	<i>Aspleniaceae</i>
Helecho	<i>Asplenium auritum</i>	<i>Aspleniaceae</i>
Helecho	<i>Asplenium laetum</i>	<i>Aspleniaceae</i>
Helecho	<i>Blechnum occidentale</i>	<i>Blechnaceae</i>
Helecho	<i>Bolbitis serratifolia</i>	<i>Dryopteridaceae</i>
Helecho	<i>Doryopteris concolor</i>	<i>Pteridaceae</i>
Helecho macho	<i>Pteridium aquilinum</i>	<i>Dennstaedtiaceae</i>

FUENTE: Identificación propia, basada en Paniagua (1999), citado por Palomeque (2012).

2.1.4.4. Fauna

La fauna registrada en el área de estudio es diversa y representativa de varios grupos taxonómicos, incluyendo mamíferos, aves, reptiles, anfibios y peces.

2.1.4.4.1. Mamíferos

En el área de estudio se registraron diversas especies de mamíferos, que fueron clasificadas dentro de diferentes familias:

Tabla 7. Fauna mastozoológica registrada en el área de estudio

Nombre vernacular	Nombre científico	Familia
Comadreja	<i>Didelphis albiventris</i>	<i>Didelphidae</i>
Sariguella enana	<i>Gracilianus agilis</i>	<i>Didelphidae</i>
Perezoso	<i>Bradypus variegatus</i>	<i>Bradypodidae</i>
Mulita	<i>Dasypus novemcinctus</i>	<i>Dasypodidae</i>
Hualacato	<i>Euphractus sexcinctus</i>	<i>Dasypodidae</i>
Oso hormiguero	<i>Tamandua tetradáctila</i>	<i>Myrmecophagidae</i>
Murciélago	<i>Noctilio leporinus</i>	<i>Noctilionidae</i>
Mono negro	<i>Ateles chamek</i>	<i>Cebidade</i>
Zorro	<i>Cercocyon thous</i>	<i>Canidae</i>
León	<i>Puma concolor</i>	<i>Felidae</i>
Gato onzar	<i>Lynchaillurus pajeros</i>	<i>Felidae</i>
Nutria	<i>Eira barbara</i>	<i>Mustelidae</i>
Zorrillo	<i>Conepatus chinga rex</i>	<i>Mustelidae</i>
Jurón	<i>Galictis cuja</i>	<i>Mustelidae</i>
Tejon	<i>Nasua nasua</i>	<i>Procyonidae</i>
Maruato	<i>Procyon cancrivorus</i>	<i>Procyonidae</i>
Anta	<i>Tapirus terrestris</i>	<i>Tapiridae</i>
Rocio, majano	<i>Tayassu pecari</i>	<i>Tayassuidae</i>
Jabalí, rocío	<i>Tayassu tajacu</i>	<i>Tayassuidae</i>
Carpincho	<i>Hydrochoerus hydrochaeris</i>	<i>Tayassuidae</i>
Corzuela rosada	<i>Mazama americana</i>	<i>Cervidae</i>
Corzuela blanca	<i>Mazama gouazoubira</i>	<i>Cervidae</i>
Ardilla	<i>Sciurus ignitus</i>	<i>Sciuridae</i>
Ratón	<i>Mus musculus</i>	<i>Muridae</i>
Rata	<i>Rattus rattus</i>	<i>Muridae</i>
Uturungo	<i>Coendu prehensilis</i>	<i>Erethizontidae</i>
Acuti	<i>Dasyprocta sp.</i>	<i>Dasyproctidae</i>
Liebre	<i>Silvilagus brasiliensis</i>	<i>Leporidae</i>

FUENTE: Identificación propia, basada en Bernal (1999), citado por Palomeque (2012).

2.1.4.4.2. Aves

Durante el trabajo de campo, se identificaron diversas especies de aves en el área de estudio:

Tabla 8. Ornitofauna registrada en el área de estudio

Nombre vernacular	Nombre científico	Familia
Carcancho	<i>Coragyps atratus</i>	<i>Cathartidae</i>
Pato torrentero	<i>Merganetta armata</i>	<i>Anatidae</i>
Pava	<i>Penelope obscura</i>	<i>Cracidae</i>
Paloma torcaza	<i>Columba sp.</i>	<i>Columbidae</i>
Loro andino	<i>Bolborhynchus aymara</i>	<i>Psittacidae</i>
Loro quiriví	<i>Myiopsitta monachus</i>	<i>Psittacidae</i>
Lechuza	<i>Tyto alba</i>	<i>Tytonidae</i>
Pájaro carpintero	<i>Piculus chrysochloros</i>	<i>Picidae</i>
Tucán	<i>Ramphastos toco</i>	<i>Ramphastidae</i>
Picaflor	<i>Chlorostilbon mellisuga</i>	<i>Trochilidae</i>
Pato marroquito	<i>Anas platalea</i>	<i>Anatidae</i>
Perdis mediano	<i>Crytorellus sovi</i>	<i>Tinamidae</i>
Ulincha	<i>Columbrina picui</i>	<i>Columbidae</i>
Urraca	<i>Cyanocorax chrysops</i>	<i>Cathartidae</i>
Vinchuquero	<i>Picumnus dorbignyanus</i>	<i>Picidae</i>

FUENTE: Identificación propia, Sarmiento (1999); Bernal (1999) citado por Palomeque (2012).

2.1.4.4.3. Reptiles y anfibios

En esta sección se presentan las especies de reptiles y anfibios detectadas en el área de estudio:

Tabla 9. Herpetofauna registrada en el área de estudio

Nombre vernacular	Nombre científico	Familia
Lagartija	<i>Liolaemus alticolor</i>	<i>Tropiduridae</i>
Acero	<i>Tachymenis peruviana</i>	<i>Colubridae</i>
Cascabel	<i>Crotalus durissus</i>	<i>Crotalidae</i>
Yarará	<i>Bothrops neuwiedii</i>	<i>Viperidae</i>
Yacaré	<i>Caiman yacaré</i>	<i>Alligatoridae</i>
Iguana	<i>Salvator rufescens</i>	<i>Teiidae</i>

FUENTE: Identificación propia, basada en Bernal (1999), citado por Palomeque (2012).

2.1.4.4.4. Peces

En la región del área de estudio se registraron diversas especies de peces en cuerpos de agua, principalmente en el Río Grande de Tarija y adyacentes:

Tabla 10. Ictiofauna registrada en el área de estudio

Nombre vernacular	Nombre científico	Familia
Mujarra	<i>Acrobrycon tarijae</i>	Characidae
Churuma	<i>Pterygoplichthys ambrosettii</i>	Loricariidae
Patis - llauza	<i>Pimelodus albicans</i>	Pimelodidae
Bagre	<i>Pimelodus sp.</i>	Pimelodidae
Sábalo	<i>Prochilodus lineatus</i>	Prochilodontidae
Robal	<i>Paulicea lutkeni</i>	Pimelodidae
Surubí	<i>Pseudoplatystoma corruscans</i>	Pimelodidae
Pacú	<i>Colossoma macropomum</i>	Serrasalminidae
Dorado	<i>Salminus brasiliensis</i>	Characidae
Boga	<i>Megaleporinus obtusidens</i>	Anostomidae
Chanco armado	<i>Pterodoras granulosus</i>	Doradidae
Yandurubí	<i>Eigenmannia virescens</i>	Sternopygidae
Anguila	<i>Synbranchus madeirae</i>	Synbranchidae

FUENTE: Identificación propia, basada en Bernal (1999), citado por Palomeque (2012).

2.1.5. Aspectos antropológicos y socioambientales

2.1.5.1. Uso actual del suelo y actividades económicas

El uso actual del suelo está dominado por el bosque natural, que abarca el 94,54% del área (68,67 ha). Las actividades económicas predominantes son de tipo agropecuario y se desarrollan a pequeña escala. Se identifican cultivos agrícolas (3,19%), plantaciones de cítricos (0,42%) y crianza de animales domésticos como porcinos, gallinas y equinos. Estas actividades son de subsistencia y responden a las capacidades de uso limitadas del territorio.

2.1.5.2. Plan de Uso del Suelo (PLUS) y zonificación agroecológica

Según el Plan de Uso del Suelo (PLUS) definido por ZONISIG (2002), la mayor parte del territorio (89,53%, equivalente a 65,04 ha) está clasificada como zona de protección con uso agrosilvopastoril limitado, con el objetivo de conservar el bosque y permitir solo actividades de bajo impacto. El 10,47% restante (7,6 ha) corresponde a zonas de uso agrícola intensivo, donde se permite un manejo más intensivo del suelo.

2.1.5.3. Usos tradicionales del bosque

El bosque ha sido históricamente una fuente importante de recursos naturales para las comunidades locales. Se practicó la extracción selectiva de especies maderables de alto valor como el cedro, quina, lapacho, urundel y cebil. En los últimos años, el uso del bosque se ha enfocado en actividades tradicionales como la recolección de leña, postes, plantas medicinales, frutos silvestres y la caza furtiva.

2.1.5.4. Impactos antrópicos sobre el ecosistema

El ecosistema ha sido afectado por actividades humanas históricas como la tala selectiva y, más recientemente, por incendios forestales severos ocurridos en los años 2021 y 2022. Estos incendios impactaron aproximadamente el 40% del área total, afectando especialmente a especies como *Anadenanthera colubrina* (cebil). Los incendios de 2021 dañaron principalmente las zonas altas del gradiente altitudinal, mientras que en 2022 el daño fue más intenso en las zonas bajas. Como consecuencia, se ha dificultado el acceso al bosque debido al crecimiento denso de herbáceas, arbustos, lianas y árboles chamuscados.

2.2. Materiales y equipos

Los materiales, herramientas y equipos empleados para poder desarrollar el estudio, se describen a continuación:

2.2.1. Materiales de campo

- Cinta métrica
- Forcípula
- Hipsómetro Blume – Leiss
- Clinómetro Florestal, aplicación móvil de Android
- Planilla de campo
- Tijera telescópica
- Flexómetro
- Wincha
- Cámara fotográfica

2.2.2. Equipo de orientación en campo

- Mapas cartográficos
- Imágenes satelitales
- Brújula
- Navegador GPS (Global Positioning System)

2.2.3. Equipo de gabinete

- Software Arc GIS
- Software Excel
- Software RStudio
- Software PAST
- Hardware (Laptop)

2.3. Metodología

2.3.1. Tipo de investigación

El estudio es de tipo descriptivo-explicativo y cuantitativo, ya que caracteriza la diversidad arbórea y analiza su relación con factores ambientales como la altitud, la temperatura y la precipitación. Es un estudio de campo y no experimental, basado en la observación y el análisis de datos sin manipular variables, proporcionando resultados objetivos sobre cómo los factores del gradiente altitudinal influyen en la biodiversidad.

Además, sigue un diseño observacional y correlacional, con el propósito de establecer patrones y relaciones entre la riqueza florística y los factores ambientales en diferentes altitudes. Este enfoque permite comprender mejor cómo los cambios en la altitud afectan la composición y diversidad arbórea en la región estudiada.

2.3.2. Diseño de investigación

La presente investigación se enmarca dentro del enfoque no experimental y tiene como objetivo analizar la diversidad arbórea del área de estudio. Para ello, se emplearon métodos cuantitativos y análisis estadísticos rigurosos con el fin de evaluar la variabilidad de los datos obtenidos.

2.3.3. Variables

En esta investigación, la **variable independiente** fue la altitud (m.s.n.m.), mientras que las variables **dependientes** incluyeron indicadores de diversidad alfa, como la riqueza específica, los índices de Shannon-Wiener y Simpson, y de diversidad beta, evaluados mediante los índices de Morisita-Horn y Jaccard. Además, se consideraron variables ambientales como la temperatura y la precipitación.

Se trabajó con **variables cuantitativas** relacionadas con la estructura del árbol, tales como el número de individuos, el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura total y el área basal. Por otro lado, también se incluyeron **variables cualitativas**, como la

salud de la copa, la ausencia de enredaderas (bejucos) en el árbol, y el estado fitosanitario del fuste y del árbol en general, entre otras.

2.3.4. Población

Se consideró el **número de individuos arbóreos** presentes en el gradiente altitudinal dentro del predio, distribuidos en sus respectivas familias filogenéticas.

2.3.5. Muestra

Se seleccionaron 15 Parcelas Temporales de Muestreo, cada una con dimensiones de 20 x 50 metros (equivalentes a 0,1 hectáreas), dentro del predio estudiado. Estas parcelas fueron distribuidas estratégicamente a lo largo del transecto principal, asegurando una representación adecuada de las variaciones presentes en el gradiente altitudinal.

2.3.6. Técnicas

Se aplicó la técnica de **observación sistemática**, la cual, consiste en la percepción directa de los atributos del árbol, donde tiene el objetivo de obtener información numérica ya sea medida o estimada de las variables de la estructura del árbol.

2.4. Procedimiento

Con el propósito de alcanzar los objetivos propuestos en el marco de la presente investigación, se diseñó una estrategia metodológica estructurada en tres etapas secuenciales y complementarias:

2.4.1. Etapa 1: Organización y planificación previa (Precampo)

Antes de iniciar el trabajo de campo, se llevó a cabo una minuciosa fase de organización y planificación para asegurar que todas las actividades se desarrollaran de manera eficiente y sistemática.

Primero, se realizó una revisión bibliográfica de estudios previos sobre la vegetación y biodiversidad de la región, explorando diferentes metodologías de muestreo en gradientes altitudinales. A continuación, se diseñó la estratificación altitudinal y se determinaron las ubicaciones de los transectos y parcelas. Con la ayuda de un sistema de información geográfica (SIG), se delimitaron las unidades fisiográficas y se trazó un transecto altitudinal principal, distribuyendo las Parcelas Temporales de Muestreo (PTM). También se planificó la logística, definiendo rutas de acceso, un cronograma de actividades y los materiales necesarios para el trabajo en el campo.

2.4.2. Etapa 2: Recolección y procesamiento de datos en campo

Entre octubre y diciembre de 2024, se llevó a cabo el trabajo de campo en el área de estudio, comenzando con la instalación de parcelas y la recolección de datos dasométricos y florísticos. Se aplicó una metodología de muestreo forestal sistemático estratificado, fundamentada en las diferencias estructurales de la vegetación a lo largo de un gradiente altitudinal, siguiendo las pautas de Mostacedo y Fredericksen (2000) y el BOLFOR (1999), adaptadas a las condiciones particulares del lugar.

Se identificaron tres gradientes altitudinales en función de las características fisiográficas y de vegetación del sitio, los cuales fueron definidos como:

Tabla 11. Distribución de los gradientes altitudinales

Gradiente	Descripción	Rango de altitud (m.s.n.m.)
Inferior	Vegetación de terraza aluvial influencia por el río	519 a 600
Intermedio	Bosques de ladera	600 a 800
Superior	Bosques de cima de montaña	800 a 1148

FUENTE: Clasificación propia.

Se utilizó un diseño de muestreo basado en **Parcelas Temporales de Muestreo (PTM)**, el cual fue adaptado del modelo de parcelas de **Gentry (1995)** ajustándose a las condiciones del terreno, facilitando evaluación florística.

Las parcelas se distribuyeron de manera sistemática a lo largo de un transecto de 3200 metros de longitud, con una separación aproximada de 200 metros entre cada una, lo que permitió instalar un total de 15 unidades. Cada parcela tenía dimensiones de 20 metros de ancho por 50 metros de largo, equivalentes a 1000 m² o 0.1 hectáreas por parcela. La intensidad de muestreo fue del 2,18%, lo que equivale a un total de 1,5 hectáreas muestreadas dentro del área de bosque, el cual representa 68,67 hectáreas.

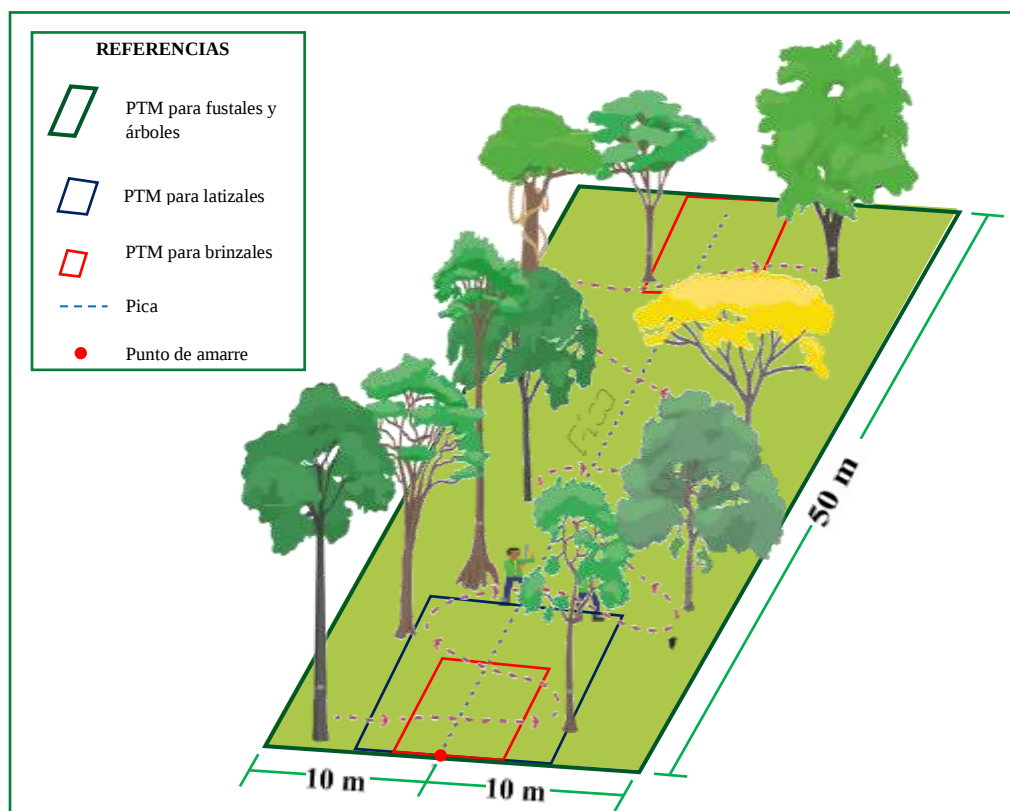
Sin embargo, a las condiciones topográficas complejas y la densidad de la vegetación baja, no fue posible instalar las parcelas en los puntos predeterminados por el Sistema de Información Geográfica (SIG), se priorizó *in situ* la accesibilidad y la seguridad en el terreno reubicando las parcelas a sitios más llanos y accesibles dentro del área circundante, asegurando a sí la continuidad del gradiente altitudinal y la representatividad de las condiciones ambientales.

En cada Parcela Temporal de Muestreo (PTM) se registró información dasométrica de todos los individuos leñosos con un diámetro a la altura del pecho (DAP) igual o mayor a 10 cm, junto con sus respectivas identidades taxonómicas. Para evaluar la **regeneración natural**, se adaptó además la metodología propuesta por BOLFOR (1999), enfocada en la medición de individuos juveniles, específicamente latizales y

brinzales. Para este fin, se instalaron subparcelas pequeñas dentro de cada unidad de muestreo, diseñadas según las siguientes categorías:

- **Latizales:** Incluyeron individuos con un DAP mayor o igual a 5 cm y menor a 10 cm ($5 \text{ cm} \leq \text{DAP} < 10 \text{ cm}$), registrados en subparcelas de 5 x 5 metros (25 m^2), equivalentes a la unidad conocida como 1/4 de cadena. En este caso, se instaló una subparcela para latizales, situada al inicio de la pica principal.
- **Brinzales:** Se consideraron aquellos individuos con un DAP menor a 5 cm y una altura mayor o igual a 1,30 m ($\text{DAP} < 5 \text{ cm}$; $H \geq 1,30 \text{ m}$). Estos fueron registrados en subparcelas de 2 x 2 metros (4 m^2), equivalentes a la unidad denominada miliacre. En cada parcela, se instalaron dos subparcelas para brinzales, ubicadas estratégicamente al inicio y al final de la pica (véase **Ilustración 7** y **Mapa N° 2, Anexo Cartográfico**).

Ilustración 7. Diseño de la PTM para el levantamiento florístico



FUENTE: Elaboración propia, con diseño adaptado de IBIF (2022).

2.4.2.1. Obtención dasométrica de la estructura del bosque

En cada Parcela Temporal de Muestreo (PTM) se registró información dasométrica de todos los individuos leñosos con diámetro a la altura del pecho (DAP) ≥ 10 cm. Cada árbol fue identificado por su nombre científico, familia y nombre común, lo que permitió delimitar con precisión el conjunto de árboles adultos presentes. Con base en el DAP se clasificaron los fustales (10–20 cm) y se registró, además, la regeneración natural constituida por brinzales y latizales (DAP < 10 cm). Se documentó también una especie de palmera y varios arbustos, lo que aporta una visión integral de la diversidad vegetal del área. Las planillas de recopilación de campo se presentan para fustales y árboles (**ver Anexo 1**), brinzales y latizales (**ver Anexo 2**).

A continuación, se presentan las variables estructurales que se midieron para cada individuo:

- **Identificación del árbol (ID)**

Se asignó un número único a cada árbol muestreado dentro de la parcela, esta identificación fue aparte, tanto para brinzales, latizales y fustales.

- **Identificación de la especie**

Para la determinación de las especies forestales, se utilizaron los métodos dendrológico y botánico, observando características morfológicas específicas de los individuos mediante claves dicotómicas y bibliografía especializada.

- **Ubicación geográfica de los árboles**

La ubicación geográfica de los árboles y palmeras se definió utilizando un sistema de coordenadas UTM, tomando como punto de referencia el amarre ubicado en el centro de inicio de cada parcela, con una distribución de 10 metros hacia la izquierda y 10 metros hacia la derecha. A partir de este punto, se trazó una pica central orientada hacia el norte, con una longitud de 50 metros. Posteriormente, se realizó un rastreo sistemático de los árboles en patrón de zigzag, registrando las coordenadas relativas y datos dasométricos. Para el eje x , las distancias se catalogaron como negativas si los

árboles se encontraban a la izquierda de la pica, y como positivas si estaban hacia la derecha. En el caso del eje y, las distancias fueron positivas debido a la orientación norte de las parcelas. Finalmente, en el análisis de gabinete, se sumaron las mediciones obtenidas desde el punto de amarre, logrando establecer las coordenadas precisas.

- **Diámetro a la Altura del Pecho (DAP)**

Para la obtención del DAP, se midió a 1,3 metros sobre el nivel del suelo utilizando dos instrumentos principales: la forcípula finlandesa y la cinta métrica. La forcípula, que consta de un brazo recto y otro parabólico graduado, permitió obtener medidas directas del diámetro en troncos con formas irregulares. Se tomaron dos mediciones perpendiculares a 90° y se calculó el promedio para cada árbol. La cinta métrica se utilizó principalmente para secciones de fuste circulares, midiendo la circunferencia a la altura del pecho (CAP) y calculando el diámetro dividiendo entre π . Este método se evitó en troncos irregulares para evitar sobreestimaciones.

- **Medición de alturas**

En este tipo de bosque, la determinación de la altura de los árboles con alta precisión fue desafiante debido a la dificultad de identificar claramente la parte superior de las copas, especialmente en árboles con follaje denso.

La altura total (HT) y la altura de fuste (HC) se midieron una sola vez durante la instalación de las parcelas utilizando un clinómetro para determinar los ángulos de inclinación desde la base del árbol hasta el ápice y la bifurcación principal; estos ángulos se aplicaron en las fórmulas propuestas por Dauber (1999), calculando la altura total como la diferencia entre los ángulos al ápice y al pie multiplicada por la distancia horizontal al árbol, y la altura de fuste como la diferencia entre los ángulos a la bifurcación principal y al pie, multiplicada también por la distancia horizontal. Adicionalmente, se empleó la aplicación móvil *Clinómetro Florestal* para facilitar y agilizar estos cálculos sin procedimientos manuales. En casos de visibilidad limitada del ápice o inaccesibilidad de la distancia horizontal, se utilizó un jalón de 2 metros como referencia para estimar la altura proporcionalmente. Para la regeneración natural, se registró únicamente la altura total con un flexómetro.

- **Evaluación de la exposición solar de la copa**

Con el objetivo de caracterizar la exposición solar en el dosel y su relación con la estructura del bosque, se evaluó cada individuo arbóreo mediante observación directa en campo, considerando dos aspectos: el grado de iluminación y la posición de la copa. Para ello, se aplicaron las clasificaciones cualitativas propuestas por Dawkins (1958), adaptadas por BOLFOR & PROMABOSQUE y Molina (2019), que integran la cantidad y dirección de la luz recibida (vertical y lateral) y la ubicación del árbol en el estrato vertical del bosque.

- **Evaluación de la forma de copa**

Durante el trabajo de campo, se registró la forma de la copa de cada árbol mediante observación visual directa, aplicando la escala cualitativa adaptada de Dawkins (1958) y Hutchinson (1993), citado por BOLFOR (1999), que clasifica las copas en cinco categorías según su simetría y desarrollo.

- **Evaluación del grado de competencia de lianas**

Durante el trabajo de campo, se registró la presencia e intensidad de infestación por lianas y/o bejucos en cada árbol muestreado. Para ello, se aplicó una escala cualitativa basada en Mostacedo y Fredericksen (2000), adaptada por Molina (2019), que clasifica el grado de competencia en cinco categorías, considerando la cobertura de la copa, la presencia de estrangulamiento en el fuste y el impacto sobre el crecimiento terminal del árbol.

2.4.3. Etapa 3: Análisis de datos y evaluación en gabinete

Con los datos obtenidos en campo se procedió al análisis estructural y de diversidad florística en gabinete. Este análisis comprende los siguientes aspectos:

2.4.3.1. Análisis de la estructura horizontal

Para su determinación horizontal de la vegetación arbórea, se utilizaron las siguientes fórmulas para determinar estas variables.

a) Abundancia: Permite determinar el número de individuos de cada especie por unidad de área. Se clasifican en dos:

Aa = Número de individuos de una especie

$$Ar (\%) = \frac{\text{Abundancia absoluta de la especie}}{\sum \text{de abundancias absolutas}} * 100$$

b) Dominancia: Representa la cobertura del área basal de cada especie. Las fórmulas son:

$$Da = \sum \frac{\pi}{4} (DAP)^2 \text{ de cada especie}^*$$

$$Dr (\%) = \frac{\text{Dominancia absoluta de la especie}}{\text{Área basal total}} * 100$$

C) Frecuencia: Determina la aparición o ausencia de especies en el área de muestreo. Se calcula utilizando la siguiente fórmula:

Fa = Número de parcelas donde se encuentra la especie

$$Fr (\%) = \frac{\text{Frecuencia absoluta de la especie}}{\sum \text{de frecuencias absolutas}} * 100$$

d) Índice de Valor de Importancia

Es un índice que integra la abundancia, dominancia y frecuencia relativa de cada especie, permitiendo determinar su peso o importancia ecológica dentro de una comunidad vegetal.

*Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) en metros y área basal (G) en metros cuadrados.

Y su fórmula de cálculo es la siguiente:

$$IVI = \frac{Ar(\%) + Dr(\%) + Fr(\%)}{3}$$

2.4.3.2. Estructura vertical

Se evaluó la estructura vertical del bosque mediante una clasificación propia en tres estratos: **suprimidos** (<10 m), **codominantes** (10–20 m) y **emergentes** (>20 m). El análisis se complementó con observaciones sobre exposición solar, forma de la copa, presencia de lianas y bejucos, y la asignación de cada especie a su gremio ecológico.

2.4.4. Evaluación de la diversidad

2.4.4.1. Diversidad alfa (α)

Para el análisis de la diversidad alfa (α) se calculó lo siguiente:

- **Riqueza de especies (S):**

O riqueza específica es la forma más sencilla de medir la biodiversidad, ya que se basa únicamente en el número de especies presentes, sin tomar en cuenta el valor de importancia de las mismas.

$$S = \sum p_i^0$$

Donde:

S es la riqueza de especies o riqueza específica.

P_i es la proporción de individuos de una especie i respecto al número total de individuos en la comunidad.

$$P_i = \frac{n_i}{N}$$

n_i es el número de individuos de una especie i .

N es el número total de individuos en la comunidad.

- **Índice de Shannon-Wiener**

Mide la diversidad de especies en una comunidad, teniendo en cuenta tanto la riqueza específica como la equitatividad, es decir, la distribución uniforme de los individuos entre las especies. Cuanto mayor sea el valor del índice, mayor será la diversidad.

La ecuación para su cálculo es:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \cdot \ln(p_i)$$

Donde:

$\ln$ = Logaritmo natural

A continuación, se presenta la Tabla 6, la cual muestra los rangos de valoración:

Tabla 12. Rangos de clasificación de la diversidad de Índice de Shannon-Wiener

Rangos	Significado	Interpretación
0 – 1,35	Diversidad baja	Pocas especies domina la comunidad; la equitatividad es baja.
1,36 – 3,5	Diversidad media	Existe una variedad razonable de especies y cierta equitatividad.
>3,5	Diversidad alta	Las especies están equitativamente distribuidas y la riqueza es alta.

FUENTE: Adaptado de Aguirre (2019).

- **Índice de dominancia de Simpson (D)**

Manifiesta la probabilidad de que dos individuos tomados al azar de una parcela sean la misma especie. Está fuertemente influido por la importancia de las especies dominantes.

La ecuación para su cálculo es:

$$D = \sum_{i=1}^S P_i^2$$

Donde: p_i es la importancia relativa de la especie i en la comunidad

Los resultados se interpretan usando la siguiente escala de significancia:

Tabla 13. Clasificación de Índice de dominancia de Simpson (D)

Rangos	Significado	Interpretación
0 – 0,33	Diversidad baja	Distribución equitativa entre las especies; dominancia baja.
0,34 – 0,66	Diversidad moderada	Mezcla equilibrada con ciertas especies más abundantes.
0,66 - 1	Diversidad alta	Dominio de pocas especies con baja equitatividad.

FUENTE: Adaptado de Aguirre (2019).

A continuación, se muestran los principales índices de diversidad alfa, indicando que miden, su tipo y los rangos posibles de valores:

Tabla 14. Índices de diversidad alfa: características, tipo y rangos de valores

Índice	¿Qué mide?	Tipo de índice	Rango de valores
Riqueza de especies (S)	Número total de especies presentes	Riqueza	Desde 1 hasta S (número total)
Shannon-Wiener (H')	Diversidad considerando riqueza y equitatividad de especies	Heterogeneidad	0 a $\ln(S)$
Simpson (D)	Probabilidad de que dos individuos seleccionados al azar sean la misma especie	Dominancia	0 a 1

FUENTE: Elaboración propia.

- **Análisis de la relación diversidad-altitud**

Se aplicaron **regresiones lineales y polinomiales** de segundo grado para analizar la relación entre la altitud (variable independiente) y los índices de diversidad alfa: riqueza específica (S), índice de Shannon-Wiener (H') e índice de dominancia de Simpson (D). Esto permitió evaluar las tendencias en la diversidad a lo largo del gradiente altitudinal.

- **Análisis de varianza de los índices de diversidad por altitud**

Además, se aplicó un **análisis de varianza (ANOVA)** de una vía para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas en los valores de los índices de diversidad entre las distintas altitudes muestreadas.

2.4.4.2. Análisis de la diversidad (β)

La diversidad beta (β) describe el grado de recambio en la composición de especies entre diferentes sitios, formaciones vegetales o a lo largo de un gradiente ambiental. Su análisis permite evaluar la variación florística entre parcelas, proporcionando información clave sobre la heterogeneidad ecológica del área de estudio.

Para este análisis, se utilizaron dos índices de similitud:

a) Índice cualitativo:

- Índice de Jaccard

Este índice mide la similitud entre dos parcelas únicamente en función de la **presencia** o **ausencia de especies**, sin considerar cuántos individuos hay de cada una.

Es por eso que se le denomina un índice cualitativo, ya que no toma en cuenta la abundancia, solo si una especie está o no está presente.

La fórmula de cálculo es:

$$I_J = \frac{c}{a + b - c}$$

Donde:

a es el número de especies presentes en el sitio o parcela A

b es el número de especies presentes en el sitio o parcela B

c es el número de especies presentes en ambos sitios A y B

Su valor varía entre 0 (sin especies en común) y 1 (composición idéntica).

b) Índice cuantitativo

- **Índice de Morisita-Horn**

Este índice mide la disimilitud entre parcelas, lo cual incorpora la **abundancia relativa de las especies**, por lo que considera cuántos individuos hay de cada especie en cada parcela. Por este motivo, se clasifica como un índice cuantitativo, ya que trabaja con datos numéricos de conteo y no solo presencia/ausencia.

Este índice es especialmente útil para detectar similitudes reales entre comunidades donde algunas especies pueden ser dominantes, y es menos influenciado por especies raras.

La fórmula de cálculo es:

$$I_{M-H} = \frac{2 \sum (an_i \times bn_j)}{(da + db)aN \times bN}$$

Donde:

an_i = número de individuos de la i -ésima especie en el sitio A

bn_j = número de individuos de la j -ésima especie en el sitio B

$da = \sum an_i^2 / aN^2$

$db = \sum bn_j^2 / bN^2$

A continuación, se presenta la comparación entre los índices cualitativos y cuantitativos utilizados para evaluar la diversidad beta (β):

Tabla 15. Diferencia entre índices cualitativos y cuantitativos beta

Índice	Tipo de dato	¿Qué considera?	¿Por qué se clasifica así?
Jaccard	Cualitativo	Presencia o ausencia de especies	No usa cantidades; solo considera si una especie está o no.
Morisita-Horn	Cuantitativo	Abundancia relativa de especies	Usa conteos de individuos; detecta dominancia o rareza.

FUENTE: Elaboración propia.

Ambos índices fueron calculados para todas las combinaciones posibles de parcelas dentro y entre las distintas formaciones vegetales. A partir de estos cálculos, se generaron matrices de similitud que fueron analizadas y comparadas mediante herramientas de análisis multivariado en RStudio y PAST, con el objetivo de interpretar el recambio florístico entre parcelas a lo largo del gradiente altitudinal. Las herramientas aplicadas fueron:

- **Matriz de presencia-ausencia**

Permitió visualizar la ocurrencia de cada especie en cada parcela. Esta herramienta fue especialmente útil para identificar patrones de distribución de especies a lo largo del gradiente y sirvió como base para el cálculo de índices cualitativos como el de Jaccard.

- **Dendrogramas (análisis de conglomerados)**

Representaron los agrupamientos jerárquicos entre parcelas según su similitud florística. Las parcelas que compartían una mayor cantidad de especies o abundancias similares se agruparon más cercanamente, revelando posibles patrones ecológicos o de estructura vegetal.

- **Mapas de calor (heatmaps)**

Se visualizaron gráficamente los valores de similitud o disimilitud entre parcelas mediante escalas de colores. Esta herramienta permitió detectar visualmente bloques de alta similitud o contrastes marcados entre diferentes zonas del gradiente.

- **Análisis de Escalamiento No Métrico (Non-metric Multidimensional Scaling, NMDS)**

Se utilizó esta técnica multivariada para reducir la complejidad de las matrices de disimilitud a un espacio bidimensional, representando gráficamente las relaciones entre parcelas. Las parcelas cercanas en el gráfico mostraron composiciones florísticas más similares, mientras que las parcelas alejadas representaron comunidades más distintas.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis de la composición arbórea

3.1.1. Composición florística y cantidad de la población

Tabla 16. Especies forestales identificadas dentro del área de estudio

GRADIENTE INFERIOR					
Nombre vernacular	Nombre científico	Familia	ABUNDANCIA		
			N	N/ha	%
Cebil	<i>Anadenanthera colubrina</i>	Leguminosae	98	140	25,26
Lapacho amarillo	<i>Tabebuia heteropoda</i>	Bignoniaceae	45	64	11,60
Urundel	<i>Astronium urundeuva</i>	Anacardiaceae	29	41	7,47
Lapacho rosado	<i>Tabebuia impetiginosa</i>	Bignoniaceae	26	37	6,70
Virapita	<i>Peltopodium dubium</i>	Leguminosae	24	34	6,19
Ala de cóndor	<i>Cupania vernalis</i>	Sapindaceae	20	29	5,15
Suiquillo	<i>Diatenopteryx sorbifolia</i>	Sapindaceae	20	29	5,15
Mato	<i>Eugenia pungens</i>	Myrtaceae	19	27	4,90
Afata	<i>Cordia trichotoma</i>	Boraginaceae	14	20	3,61
Pacay	<i>Inga edulis</i>	Leguminosae	14	20	3,61
Cedro	<i>Cedrela lilloi</i>	Meliaceae	8	11	2,06
Amarillo	<i>Terminalia triflora</i>	Combretaceae	8	11	2,06
Luchán	<i>Ceiba chodatti</i>	Bombacaceae	6	9	1,55
Quemadillo	<i>Cnidioscolus vitifolius</i>	Euphorbiaceae	6	9	1,55
Laurel amarillo	<i>Ocotea poberula</i>	Lauraceae	6	9	1,55
Aguay	<i>Chrysophyllum gonocarpum</i>	Sapotaceae	5	7	1,29
Arrayan	<i>Eugenia moraviana</i>	Myrtaceae	5	7	1,29
Membrillo	<i>Ruprechtia laxiflora</i>	Polygonaceae	5	7	1,29
Tala	<i>Celtis spinosa</i>	Ulmaceae	4	6	1,03
Chonta	<i>Acromia aculeata</i>	Palmaceae	3	4	0,77
Viraro	<i>Ruprechtia laxiflora</i>	Polygonaceae	3	4	0,77
Arrayan de cerro	<i>Blepharocalix salicifolius</i>	Myrtaceae	2	3	0,52
Carnavalito	<i>Cassia carnavall</i>	Leguminosae	2	3	0,52
Mandor	<i>Coccoloba tiliaceae</i>	Polygonaceae	2	3	0,52
Goma	<i>Ficus sp.</i>	Moraceae	2	3	0,52
Laurel blanco	<i>Nectandra saligna</i>	Lauraceae	2	3	0,52
Lanza blanca	<i>Patagonula americana</i>	Boraginaceae	2	3	0,52
Garrancho	<i>Acacia fedeliana</i>	Leguminosae	1	1	0,26
Sauco	<i>Fagara coco</i>	Rutaceae	1	1	0,26
Laurel de falda	<i>Phoebe porphyria</i>	Lauraceae	1	1	0,26
Barbasco	<i>Phyllanthus acuminatus</i>	Phyllanthaceae	1	1	0,26
Tipa colorada	<i>Pterogyne nitens</i>	Leguminosae	1	1	0,26
Sauco andino	<i>Sambucus peruviana</i>	Rutaceae	1	1	0,26
Tabaquillo blanco	<i>Solanum riparium</i>	Solanaceae	1	1	0,26
Trema	<i>Trema micrantha</i>	Cannabaceae	1	1	0,26
SUBTOTAL			388	554	100

GRADIENTE INTERMEDIO					
Nombre vernacular	Nombre científico	Familia	ABUNDANCIA		
			N	N/ha	%
Lapacho amarillo	<i>Tabebuia heteropoda</i>	<i>Bignoniaceae</i>	30	75	17,86
Cebil	<i>Anadenanthera colubrina</i>	<i>Leguminosae</i>	24	60	14,29
Lapacho rosado	<i>Tabebuia impetiginosa</i>	<i>Bignoniaceae</i>	17	43	10,12
Afata	<i>Cordia trichotoma</i>	<i>Boraginaceae</i>	16	40	9,52
Urundel	<i>Astronium urundeuva</i>	<i>Anacardiaceae</i>	13	33	7,74
Suiquillo	<i>Diatenopteryx sorbifolia</i>	<i>Sapindaceae</i>	11	28	6,55
Ala de cóndor	<i>Cupania vernalis</i>	<i>Sapindaceae</i>	10	25	5,95
Virapita	<i>Peltopodium dubium</i>	<i>Leguminosae</i>	9	23	5,36
Luchán	<i>Ceiba chodatti</i>	<i>Bombacaceae</i>	5	13	2,98
Cedro	<i>Cedrela lilloi</i>	<i>Meliaceae</i>	4	10	2,38
Arrayan	<i>Eugenia moraviana</i>	<i>Myrtaceae</i>	4	10	2,38
Mato	<i>Eugenia pungens</i>	<i>Myrtaceae</i>	4	10	2,38
Membrillo	<i>Ruprechtia laxiflora</i>	<i>Polygonaceae</i>	4	10	2,38
Laurel amarillo	<i>Ocotea poberula</i>	<i>Lauraceae</i>	3	8	1,79
Viraro	<i>Ruprechtia laxiflora</i>	<i>Polygonaceae</i>	3	8	1,79
Aguay	<i>Chrysophyllum gonocarpum</i>	<i>Sapotaceae</i>	2	5	1,19
Hoja de anta	<i>Miconia calvescens</i>	<i>Melastomataceae</i>	2	5	1,19
Amarillo	<i>Terminalia triflora</i>	<i>Combretaceae</i>	2	5	1,19
Chonta	<i>Acromia aculeata</i>	<i>Palmaceae</i>	1	3	0,60
Arrayan de cerro	<i>Blepharocalyx salicifolius</i>	<i>Myrtaceae</i>	1	3	0,60
Carnavalito	<i>Cassia carnaval</i>	<i>Leguminosae</i>	1	3	0,60
Laurel de falda	<i>Phoebe porphyria</i>	<i>Lauraceae</i>	1	3	0,60
Vilcarán	<i>Piptadenia viridiflora</i>	<i>Leguminosae</i>	1	3	0,60
SUBTOTAL			168	420	100
GRADIENTE SUPERIOR					
Nombre vernacular	Nombre científico	Familia	ABUNDANCIA		
			N	N/ha	%
Cebil	<i>Anadenanthera colubrina</i>	<i>Leguminosae</i>	33	83	24,81
Afata	<i>Cordia trichotoma</i>	<i>Boraginaceae</i>	13	33	9,77
Lapacho amarillo	<i>Tabebuia heteropoda</i>	<i>Bignoniaceae</i>	10	25	7,52
Laurel amarillo	<i>Ocotea poberula</i>	<i>Lauraceae</i>	9	23	6,77
Suiquillo	<i>Diatenopteryx sorbifolia</i>	<i>Sapindaceae</i>	8	20	6,02
Ala de cóndor	<i>Cupania vernalis</i>	<i>Sapindaceae</i>	6	15	4,51
Pacay	<i>Inga edulis</i>	<i>Leguminosae</i>	6	15	4,51
Lapacho rosado	<i>Tabebuia impetiginosa</i>	<i>Bignoniaceae</i>	6	15	4,51
Urundel	<i>Astronium urundeuva</i>	<i>Anacardiaceae</i>	5	13	3,76
Mandor	<i>Coccoloba tiliaceae</i>	<i>Polygonaceae</i>	5	13	3,76
Itapalla	<i>Urera caracasana</i>	<i>Urticaceae</i>	5	13	3,76
Chal chal	<i>Allophylus edulis</i>	<i>Sapindaceae</i>	3	8	2,26
Aguay	<i>Chrysophyllum gonocarpum</i>	<i>Sapotaceae</i>	3	8	2,26
Cascarilla	<i>Heliocarpus popayanensis</i>	<i>Tiliaceae</i>	3	8	2,26
Lanza monteña	<i>Saccellium lanceolatum</i>	<i>Boraginaceae</i>	3	8	2,26
Luchán	<i>Ceiba chodatti</i>	<i>Bombacaceae</i>	2	5	1,50
Tabaquillo rosado	<i>Croton densiflorus</i>	<i>Solanaceae</i>	2	5	1,50
Sauco	<i>Fagara coco</i>	<i>Rutaceae</i>	2	5	1,50
Tabaquillo blanco	<i>Solanum riparium</i>	<i>Solanaceae</i>	2	5	1,50

Nombre vernacular	Nombre científico	Familia	ABUNDANCIA		
			N	N/ha	%
Tala	<i>Celtis spinosa</i>	<i>Ulmaceae</i>	1	3	0,75
Quemadillo	<i>Cnidoscolus vitifolius</i>	<i>Euphorbiaceae</i>	1	3	0,75
Lanza blanca	<i>Patagonula americana</i>	<i>Boraginaceae</i>	1	3	0,75
Laurel de falda	<i>Phoebe porphyria</i>	<i>Lauraceae</i>	1	3	0,75
Vilcarán	<i>Piptadenia viridiflora</i>	<i>Leguminosae</i>	1	3	0,75
Yuruma	<i>Rapanea letevirens</i>	<i>Myrtaceae</i>	1	3	0,75
Dominguillo	<i>Trichilia claussenii</i>	<i>Meliaceae</i>	1	3	0,75
SUBTOTAL			133	333	100
TOTAL			689	-	100
PROMEDIO			-	436	-

FUENTE: Killeen et al. (1993) y Paniagua (1999) citado por Palomeque (2012).

Según la **Tabla 16 (anterior)**, el inventario registró 689 individuos distribuidos en 44 especies identificadas, frente a las aproximadamente 70 observadas visualmente, lo que refleja una alta riqueza florística limitada por el alcance del muestreo.

Al analizar la composición arbórea a lo largo del gradiente altitudinal, en el **gradiente inferior** *Anadenanthera colubrina* (cebil) representa un 25,26%, siguen en importancia *Tabebuia* spp. (lapachos) que en conjunto alcanzan el 18,30%, *Astronium urundeuva* (urundel) representando el 7,47% y *Peltophorum dubium* (virapita) con 6,19%.

En el **gradiente intermedio**, después de *Tabebuia heteropoda* (lapacho amarillo) con equivalente al 17,86% y *Anadenanthera colubrina* (cebil) con un 14,29%, sobresalen *Tabebuia impetiginosa* (lapacho rosado) alcanzando el 10,12 % y *Cordia trichotoma* (afata) con un aporte del 9,52%.

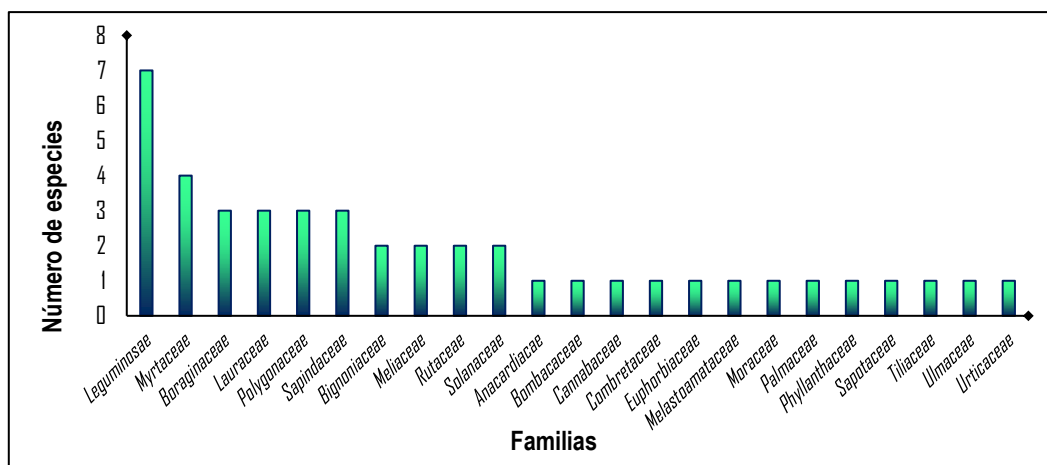
En el **gradiente superior**, además del *Anadenanthera colubrina* (cebil) con una representatividad del 24,81%, *Cordia trichotoma* (afata) alcanza un 9,77%, seguido de *Tabebuia heteropoda* (lapacho amarillo) con una representatividad del 7,52%. Por otro lado, *Diatenopteryx sorbifolia* (suiquillo) se ubica con un 6,02% y *Cupania vernalis* (ala de cóndor) representa un 4,51%.

El resto de las especies, con abundancias inferiores al 1% y apenas unos pocos individuos por hectárea, muestra una distribución escasa pero constante que, aunque enriquece la diversidad florística, las hace especialmente vulnerables a perturbaciones y exige acciones de monitoreo y conservación focalizada.

3.1.2. Análisis comparativo de familias y géneros botánicos

En el área de estudio se registraron 23 familias botánicas, evidenciando una buena diversidad taxonómica. La familia más representativa fue *Leguminosae*, con 7 especies, seguida de *Myrtaceae*, *Boraginaceae*, *Lauraceae* y *Sapindaceae*, con 3-4 especies cada una. Las demás familias tuvieron una o dos especies (véase Gráfico 3).

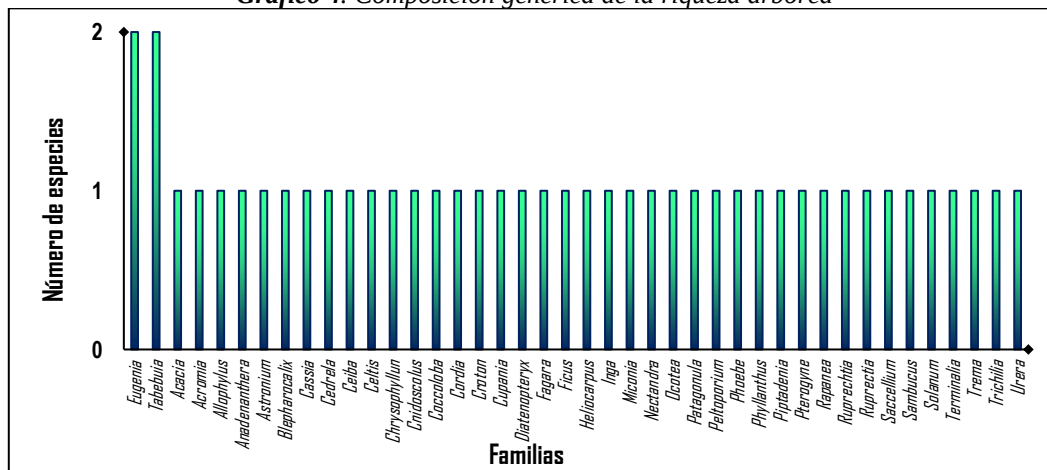
Gráfico 3. Composición botánica según agrupación familiar



FUENTE: Elaboración propia

Se identificaron 42 géneros, de los cuales 40 están representados por una sola especie, lo que refleja una alta diversidad específica por género. Solo dos géneros como *Eugenia* y *Tabebuia* presentan dos especies cada uno (véase Gráfico 4).

Gráfico 4. Composición genérica de la riqueza arbórea



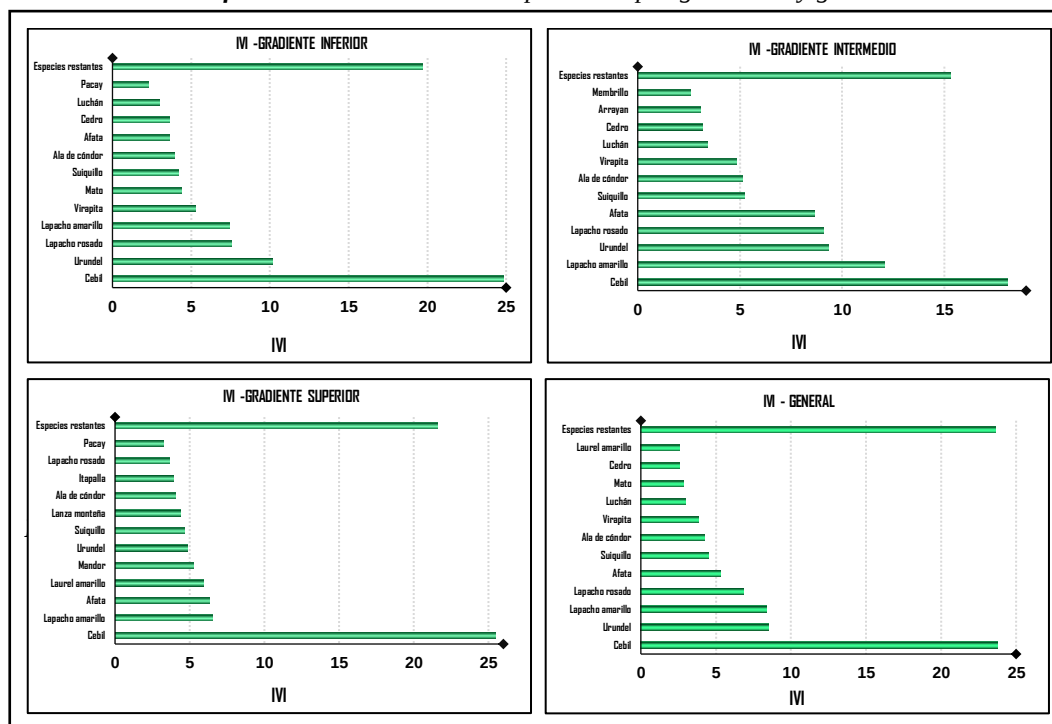
FUENTE: Elaboración propia

3.2. Análisis de la estructura horizontal y vertical

3.2.1. Análisis de la estructura horizontal

3.2.1.1. Índice de Valor de Importancia (IVI)

Gráfico 5. Índice de valor de importancia por gradientes y general



FUENTE: Elaboración propia.

Según el **Gráfico 5** (anterior) y datos expuestos en el **Anexo 4**, al analizar el Índice de Valor de Importancia (IVI), que integra los parámetros de abundancia relativa (AR), dominancia relativa (DR) y frecuencia relativa (FR), se realizó un análisis comparativo por gradiente altitudinal para una mejor comprensión de la estructura forestal.

En el **gradiente inferior**, *Anadenanthera colubrina* (cebil) se destaca como la especie estructuralmente y ecológica más importante representando el 24,86%, seguida por *Astronium urundeuva* (urundel) con 10,15%, *Tabebuia spp.* (lapachos) con 15% y el 50% faltante esta relegado por las demás especies del gradiente.

En el **gradiente intermedio**, se observa una distribución más equitativa entre especies, donde *Anadenanthera colubrina* (cebil) también lidera con un 18,09%, pero con una

menor diferencia respecto a otras especies como *Tabebuia heteropoda* (lapacho amarillo) equivalente al 12,09%, *Astronium urundeuva* (urundel) con un 9,32%, *Tabebuia impetiginosa* (lapacho rosado) alcanza un 9,81% y *Cordia trichotoma* (afata) en menor proporción con un 8,67%, lo que indica una mayor diversidad estructural. Las demás especies restantes representan el 42,71%.

Finalmente, en **el gradiente superior**, vuelve a destacarse la dominancia de *Anadenanthera colubrina* (cebil) con un 25,5%, seguido por *Tabebuia heteropoda* (lapacho amarillo) representando el 6,52% y *Cordia trichotoma* (afata) con un 6,34%. Las especies faltantes del gradiente representan un 61,65%, configurando una estructura más concentrada en torno a estas especies.

Estos resultados evidencian que, si bien *Anadenanthera colubrina* (cebil) mantiene un papel ecológico protagónico a lo largo del gradiente, la diversidad estructural varía, siendo mayor en el nivel intermedio y más restringida en los extremos altitudinales.

3.2.1.2. Distribución diamétrica de la estructura poblacional arbórea

A partir del **Gráfico 6 (siguiente)** y los datos expuestos del **Anexo 5**, se confirma que, en los tres gradientes altitudinales, la estructura poblacional del bosque sigue la típica forma de “J” invertida, descrita por De Liocourt (1898) y modelada por Meyer (1952), lo que refleja un ecosistema con buena regeneración y dinámica natural. A medida que el diámetro aumenta, el número de individuos disminuye, como resultado de la competencia, la mortalidad y otros procesos ecológicos.

En el **gradiente inferior** predominan con fuerza las clases más pequeñas, con 234 árboles por hectárea en la primera clase, y la densidad cae de manera exponencial hasta menos de dos individuos por hectárea en los diámetros mayores, reflejando un relevo juvenil activo y escaso número de árboles grandes.

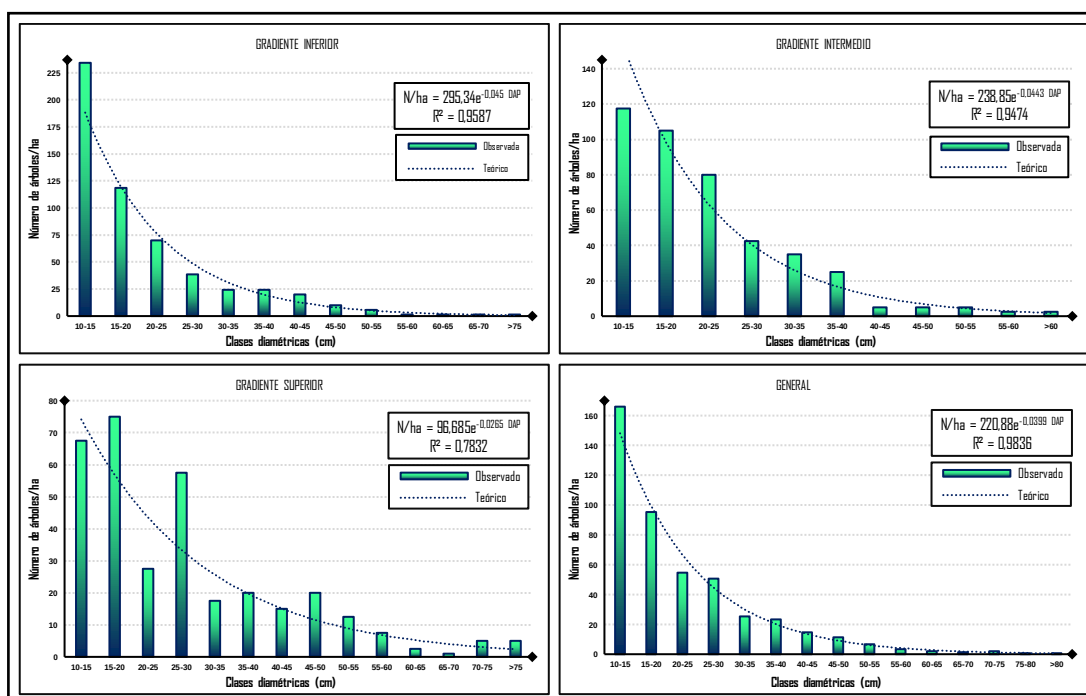
En el **gradiente intermedio**, mantiene igualmente una “J” invertida, aunque de forma menos pronunciada, donde la densidad inicial supera el centenar de árboles por hectárea y se atenúa gradualmente en los diámetros superiores mayores a 60 cm, donde

la densidad se reduce hasta tan solo 3–5 individuos por hectárea, lo que sugiere un bosque más maduro y menos perturbado con buena continuidad de generación natural.

Finalmente, en el **gradiente superior** la pendiente se suaviza todavía más, la densidad arranca en valores moderados para luego descender de forma sostenida, estabilizándose en torno a unas pocas unidades en las clases más grandes, lo que pone de manifiesto una regeneración más restringida bajo condiciones ambientales más rigurosas y un predominio de cohortes de mayor edad.

Los ejemplares de mayor grosor correspondieron a *Anadenanthera colubrina* (cebil), *Astronium urundeuva* (urundel), *Tabebuia* spp. (lapachos) y *Ceiba chodatti* (luchán).

Gráfico 6. Distribución de individuos por clase diamétrica



FUENTE: Elaboración propia.

En conjunto, el gradiente inferior exhibe mayor reclutamiento juvenil y escaso número de árboles grandes; el gradiente intermedio presenta mayor presencia de tamaños medios y continuidad de regeneración; y el gradiente superior muestra regeneración más limitada y predominio de cohortes adultas en condiciones más exigentes.

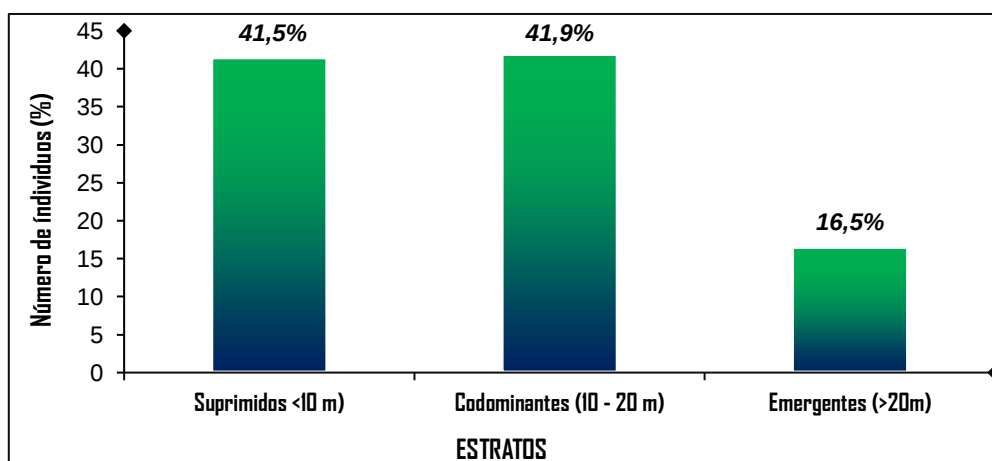
3.2.2. Análisis de la estructura vertical

3.2.2.1. Evaluación de la estructura vertical del estrato arbóreo

Se realizó una evaluación de la estructura vertical del bosque, utilizando una clasificación propia en tres estratos: **suprimidos** (menor a 10 metros), **codominantes** (entre 10 y 20 metros) y **emergentes** (mayor a 20 metros).

De un total de 689 individuos muestreados, el estrato codominante fue el más representativo, con un 41,94% de los árboles, seguido por el estrato suprimido con el 41,51%. El estrato emergente presenta un 16,55% (véase el Gráfico 7 y Anexo 11).

Gráfico 7. Clasificación del estrato arbóreo según la altura total



FUENTE: Elaboración propia.

A continuación, se presenta la descripción de cada uno de los estratos verticales identificados en el bosque evaluado:

- **Suprimidos (<10 m):** Compuesto por árboles jóvenes, especies arbustivas y ejemplares de menor porte. Predominan especies como *Tabebuia heteropoda* (lapacho amarillo), *Cupania vernalis* (ala de cóndor) y *Inga edulis* (pacay). Las alturas varían entre 4 y 9 metros, reflejando una alta regeneración natural y diversidad estructural. Este estrato alberga tanto especies heliófitas efímeras como esciófitas parciales a casi totales.
- **Codominantes (10–20 m):** Estrato más abundante, con especies de porte intermedio como *Tabebuia heteropoda* (lapacho amarillo) y *Cordia trichotoma*.

(afata). Estas especies son heliófitas durables, que requieren luz pero toleran sombra en sus primeras etapas. Este estrato define la estructura del dosel y regula la cantidad de luz que llega a los estratos inferiores.

- **Emergentes (>20 m):** Compuesto por árboles grandes como *Anadenanthera colubrina* (cebil) y *Ceiba chodatii* (luchán), que superan el dosel. Aunque es el menos representado en número, este estrato alberga especies heliófitas durables, adaptadas a condiciones de alta luminosidad y abiertas, reflejando una sucesión avanzada y un bosque con estructuras verticales consolidadas.

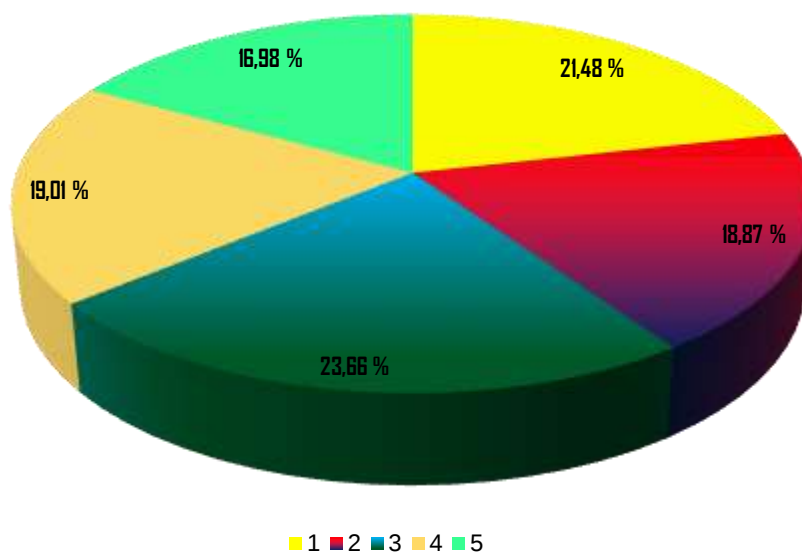
3.2.3. Evaluación de la exposición solar en la estructura arbórea

El análisis de la distribución de la luz en los árboles muestreados revela patrones que se corresponden estrechamente con la estructura vertical del bosque, reflejando cómo la posición en el dosel influye directamente en el acceso a la radiación solar y, por ende, en las estrategias ecológicas de las especies:

- La **Categoría 1 (Emergentes)** agrupa al 21,48% de los árboles, todos ubicados por encima del dosel, en una posición dominante que les permite recibir luz solar directa desde todos los ángulos. Predominan especies heliófitas durables como *Anadenanthera colubrina* (cebil), *Astronium urundeuva* (urundel), *Tabebuia spp.* (lapachos) y *Ceiba chodatti* (luchán). Estas coinciden con las especies identificadas en el estrato emergente, lo que demuestra una estrecha relación entre iluminación plena y dominancia vertical.
- La **Categoría 2 (Plena iluminación superior)** representa el 18,87% y corresponde a individuos ubicados justo por debajo del nivel emergente, con acceso directo a la luz desde arriba. Muchas de estas especies forman parte del estrato codominante, y son típicamente heliófitas durables que han alcanzado posiciones elevadas sin llegar a sobresalir del dosel.

- La **Categoría 3 (Alguna iluminación superior)**, con el 23,66%, es la más representativa. Incluye árboles parcialmente sombreados por copas superiores, como *Cedrela spp.* (cedros), que forman parte del dosel medio. Estas especies, presentes en el estrato codominante, se desarrollan bien en condiciones de luz intermedia, manteniendo un equilibrio entre tolerancia a la sombra y necesidad de luminosidad.
- En la **Categoría 4 (Alguna luz lateral)** se encuentra el 19,01% de los individuos, ubicados en posiciones donde la luz solar llega principalmente desde los lados, como sucede en bordes de claros o en zonas densas del bosque. Estas condiciones suelen presentarse en árboles de porte medio o bajo, dentro del estrato suprimido.
- Finalmente, la **Categoría 5 (Ausencia de luz)**, que comprende el 16,98%, está conformada por individuos ubicados bajo un dosel denso, sin acceso directo a la radiación solar. Aquí predominan especies como *Eugenia moraviana* (arrayán), *Eugenia pungens* (mato), *Chrysophyllum gonocarpum* (aguay), *Inga edulis* (pacay) y *Cnidoscolus vitifolius* (quemadillo), todas pertenecientes al gremio de las esciófitas (véase el Gráfico 8).

Gráfico 8. Clasificación de exposición solar en el dosel forestal



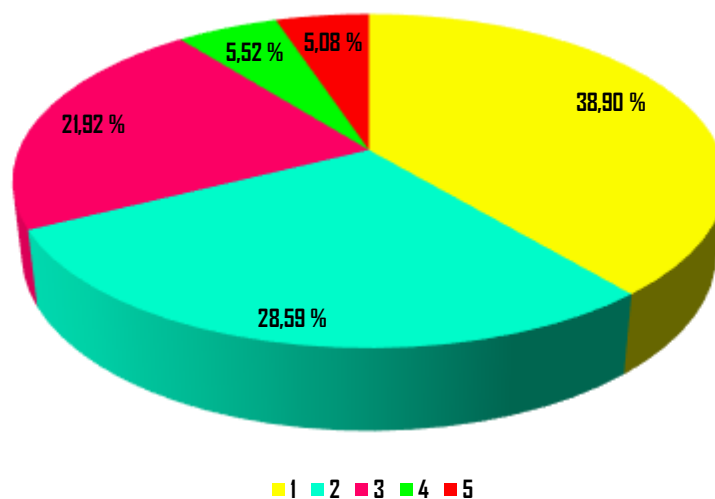
FUENTE: Elaboración propia.

3.2.4. Evaluación estructural de las copas arbóreas

Se realizó un análisis estructural de las copas para todo el arbolado del área de estudio. A continuación, se describen las características observadas en cada categoría evaluada:

- **Categoría 1 – Perfecta:** Es la categoría más representativa con un 38,90%, con copas simétricas, completas y vigorosas, indicando buen estado fisiológico. Figuran especies como *Astronium urundeuva* (urundel), *Ceiba chodatti* (luchan), *Saccellium lanceolatum* (lanza montaña) y *Ficus sp.* (goma).
- **Categoría 2 – Buena:** Representa el 28,59% de los árboles, cuya copa presenta ligeras irregularidades, como ramas muertas o asimetrías menores.
- **Categoría 3 – Tolerable:** Agrupa el 21,92% de los individuos, con copas ralas o deformadas. Destaca el *Anadenanthera colubrina* (cebil), que, pese a su gran porte, muestra estrés por alta competencia y disturbios.
- **Categoría 4 – Pobre:** Con apenas un 5,52%, los árboles presentan copas reducidas y asimétricas, con pérdida de ramificación y evidente estrés.
- **Categoría 5 – Muy Pobre:** Corresponde al 5,08% de los árboles, con copas muy degradadas, reducidas a una o pocas ramas. Predominan *Urera caracasana* (itapalla), *Miconia calvescens* (hoja de anta) y otras (véase el Gráfico 9).

Gráfico 9. Clasificación en las formas de copa del dosel forestal



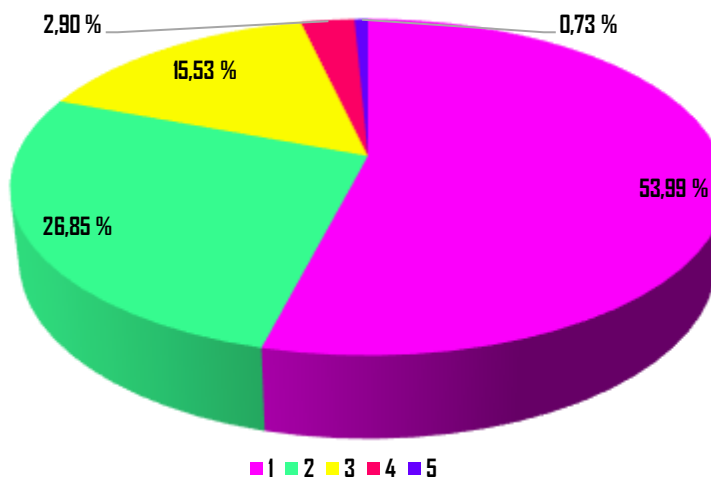
FUENTE: Elaboración propia.

3.2.5. Evaluación de la carga de lianas en la arquitectura arbórea

Se evaluó esta condición en todo el estrato arbóreo del área de estudio, clasificando el grado de infestación por lianas en distintas categorías:

- **Categoría 1 – Árbol libre de lianas:** Representa el 53,99%, con casi cuatro de cada diez árboles libres de enredaderas en el fuste y la copa. Especies de mirtáceas, *Ceiba chodatti* (luchán), *Astronium urundeuva* (urundel), *Cedrela liloi* (cedro) y *Coccoloba tiliaceae* (mandor) destacan en esta categoría.
- **Categoría 2 – Lianas presentes sin afectación:** Representa el 26,85%, correspondiendo a árboles con infestación incipiente, generalmente limitada al fuste o a menos de un tercio de la copa.
- **Categoría 3 – Lianas afectando potencialmente:** Representa el 15,53%, con árboles que presentan estrangulamiento parcial del fuste o cobertura significativa de la copa, afectando la fotosíntesis y el crecimiento. Especies clave como *Anadenanthera colubrina* (cebil) y otras predominan en este grupo.
- **Categoría 4 – Lianas en fuste y copa sin impacto claro:** Representa el 2,90% de los árboles, con presencia de lianas en el fuste y copa de los individuos.
- **Categoría 5 – Lianas cubriendo totalmente la copa:** Aquí el 0,73% de los árboles del bosque presentan esta condición más crítica (véase el Gráfico 10).

Gráfico 10. Categorías de interferencia de lianas en árboles



FUENTE: Elaboración propia.

3.3. Análisis de la dinámica del bosque

3.3.1. Análisis de regeneración natural

3.3.1.1. Evaluación de la abundancia y composición en brinzales

Tabla 17. Abundancia de la regeneración en brinzales por gradiente altitudinal

Gradiente	PTM	Abundancia/PTM	Abundancia/ha	Abundancia/ha (%)
Inferior	1	13	12679	40,7
	2	11		
	3	9		
	4	9		
	5	10		
	6	8		
	7	11		
Intermedio	8	15	11563	37,2
	9	10		
	10	4		
	11	8		
Superior	12	5	6875	22,1
	13	7		
	14	7		
	15	3		
TOTAL		128	-	100
PROMEDIO		-	10372	-

FUENTE: Elaboración propia

Según la **Tabla 17** y el **Gráfico 11**, cuyos datos fuentes se presentan en el **Anexo 6**, la regeneración natural de brinzales muestra una disminución progresiva a medida que aumenta la altitud en el gradiente evaluado, tal como se describe a continuación:

En el **gradiente inferior** se registró la mayor cantidad de brinzales, con 12679 individuos por hectárea, lo cual equivale al 44,96% del total general. Donde alberga una regeneración particularmente intensa, dominada por especies como *Eugenia moraviana* (arrayán) con una representación del 28,14%, *Anadenanthera colubrina* (cebil) con 26,74%, *Cordia trichotoma* (afata) con 14,08%, *Cedrela lilloi* (cedro) con 9,85% y *Tabebuia heteropoda* (lapacho amarillo) con una representatividad del 2,82%.

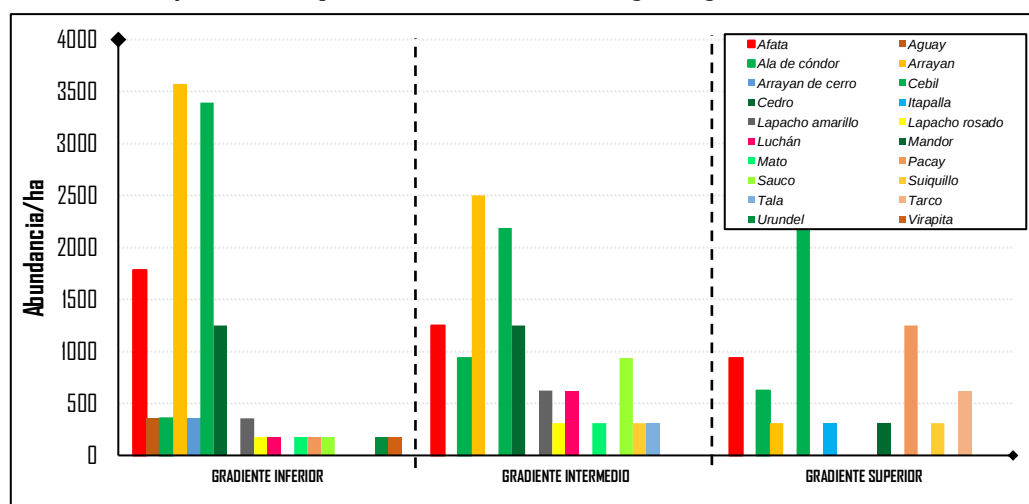
En el **gradiente intermedio**, la densidad de brinzales mostró una leve disminución con respecto al nivel inferior, alcanzando 11563 individuos por hectárea, correspondiente al 41,01% del total. A pesar de esta reducción, la regeneración continúa siendo

considerable, destacando especies como *Eugenia moraviana* (arrayán) con 21,62%, *Anadenanthera colubrina* (cebil) con 18,92 % y *Cordia trichotoma* (afata) con 10,81%.

Por último, en el **gradiente superior** se registró la menor regeneración de brinzales, con 6875 individuos por hectárea, lo que representa únicamente el 24,03% del total. En esta zona destacan *Anadenanthera colubrina* (cebil) como especie dominante con el 31,82%, seguida por *Cordia trichotoma* (afata) con 13,64% y *Jacaranda mimosifolia* (tarco) con 9,09%. Este descenso se debe a condiciones adversas en zonas altas, como frío, viento y el pisoteo del ganado bovino.

Cabe destacar que, aunque no se cuantificaron **plántulas**, se observó visualmente una alta densidad de estas en especies como *Anadenanthera colubrina* (cebil), *Cedrela spp.* (cedro) y *Tabebuia spp.* (lapachos), especialmente bajo los árboles madre, lo que sugiere una germinación masiva. Sin embargo, esta abundancia no se tradujo en una regeneración significativa de brinzales ni latizales, probablemente debido a que estas especies son altamente heliófitas, como *Anadenanthera colubrina* (cebil), que requieren alta luminosidad para desarrollarse. La regeneración fue más evidente en claros más abiertas, como los márgenes de los caminos, mientras que *Astronium urundeuva* (urundel) mostró una regeneración escasa.

Gráfico 11. Composición de brinzales a lo largo del gradiente altitudinal



FUENTE: Elaboración propia.

3.3.1.2. Evaluación de la abundancia y composición en latizales

Tabla 18. Abundancia de la regeneración en latizales por gradiente altitudinal

Gradiente	PTM	Abundancia/PTM	Abundancia/ha	Abundancia/ha (%)
Inferior	1	10	3257	44,9
	2	11		
	3	9		
	4	7		
	5	7		
	6	4		
	7	9		
Intermedio	8	8	2800	38,6
	9	8		
	10	9		
	11	3		
Superior	12	4	1200	16,5
	13	2		
	14	2		
	15	4		
TOTAL		128	-	100
PROMEDIO		-	2419	-

FUENTE: Elaboración propia

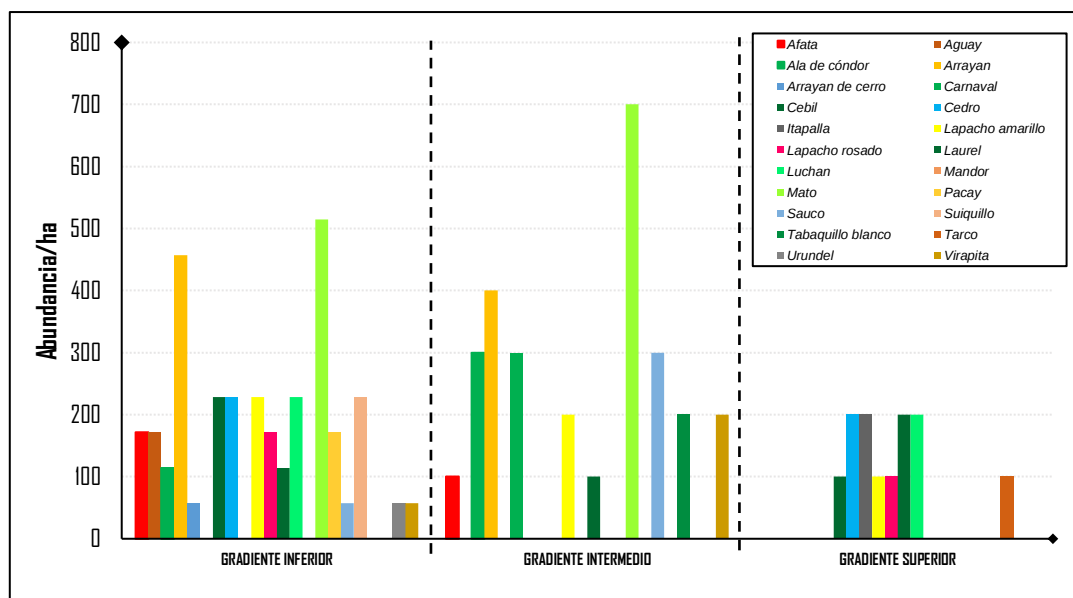
Según los datos de la **Tabla 18**, que presenta la abundancia de latizales, y del **Gráfico 12**, elaborado a partir de la información del **Anexo 7**, que ilustra su composición florística relativa, la regeneración natural de latizales evidencia un patrón descendente a lo largo del gradiente altitudinal evaluado, como se describe a continuación:

En el **gradiente inferior** se registró la mayor densidad de regeneración de latizales, con 3257 individuos por hectárea, lo que representa el 44,88% del total observado. En cuanto a su composición florística, esta zona está dominada por especies como: *Eugenia pungens* (mato) predominando en un 15,79%, *Eugenia moraviana* (arrayán) con 14,04%, *Tabebuia heteropoda* (lapacho amarillo), *Anadenanthera colubrina* (cebil) y *Ceiba chodatti* (luchán) ambas representan un 7,02%. Las demás especies presentan una regeneración relativamente baja, lo que en conjunto refleja una regeneración activa y favorable bajo condiciones de baja altitud.

En el **gradiente intermedio**, la densidad de latizales disminuyó ligeramente con respecto al inferior, registrándose 2800 individuos por hectárea, lo que equivale al 38,58% del total. A pesar de esta disminución, la regeneración sigue siendo significativa, con predominio de especies como *Eugenia pungens* (mato) con 25%, *Eugenia moraviana* (arrayán) con 14,29%, *Cassia carnaval* (carnaval) y *Cupania vernalis* (ala de cóndor) con 10,71%, lo cual sugiere una transición en la composición florística respecto al gradiente inferior.

Finalmente, en el **gradiente superior** se observó la menor densidad de regeneración, con apenas 1200 individuos por hectárea, que representan solo el 16,53% del total. Las especies con mayor presencia relativa fueron: *Phoebe porphyria* (laurel de falda) con 25%, *Ceiba chodatii* (luchán), *Cedrela spp.* cedros) y *Urera caracasana* (itapalla) ambas con un 16,67%. Este marcado descenso en la densidad de regeneración refleja las condiciones más restrictivas propias de mayores altitudes, como las temperaturas más bajas y la menor disponibilidad de luz directa, además del impacto del **ganado bovino**, que puede afectar negativamente a la regeneración natural.

Gráfico 12. Composición de latizales a lo largo del gradiente altitudinal



FUENTE: Elaboración propia.

3.4. Análisis de la diversidad arbórea

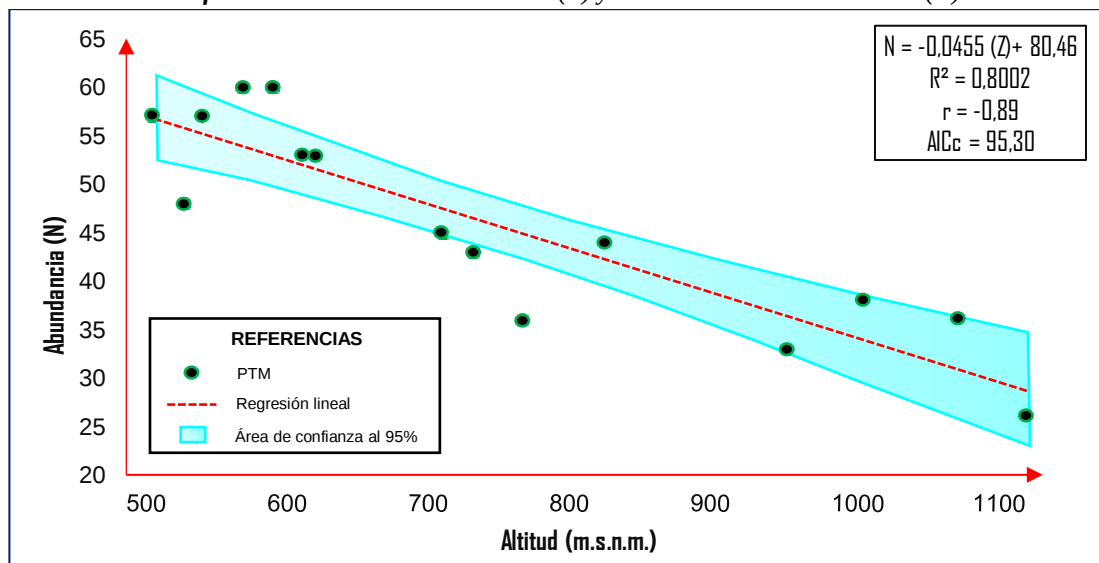
3.4.1. Análisis de la diversidad alfa

El análisis de diversidad alfa realizado en las 15 parcelas evaluadas permitió comprender en profundidad la estructura interna de la comunidad vegetal, considerando tanto la cantidad de especies presentes como la forma en que se distribuyen los individuos entre ellas. Para ello, se aplicaron los índices de Shannon-Wiener y Simpson, además del conteo directo de abundancia total (N) y riqueza específica (S).

3.4.1.1. Abundancia (N)

La abundancia total de individuos (N) por parcela osciló entre 26 y 60 ejemplares. Las parcelas localizadas en el gradiente inferior, por ejemplo, parcelas 4 y 5 alcanzaron los valores máximos de abundancia, con 60 individuos, lo que sugiere que las condiciones más cálidas y estables favorecen un mayor número de individuos. En cambio, en altitudes más elevadas, como en la parcela 15 a 1137 m.s.n.m., la abundancia fue mínima, con 26 individuos por parcela (véase el Gráfico 13, elaborado con los datos del Anexo 3, y el Mapa N° 20 incluido en el anexo cartográfico).

Gráfico 13. Relación entre la altitud (Z) y la abundancia de individuos (N)



FUENTE: Elaboración propia, modelado con Microsoft Excel.

Según el Gráfico 16 (anterior), la relación entre la altitud (Z) y la abundancia (N) se ajustó mediante una regresión lineal, donde cuya ecuación es:

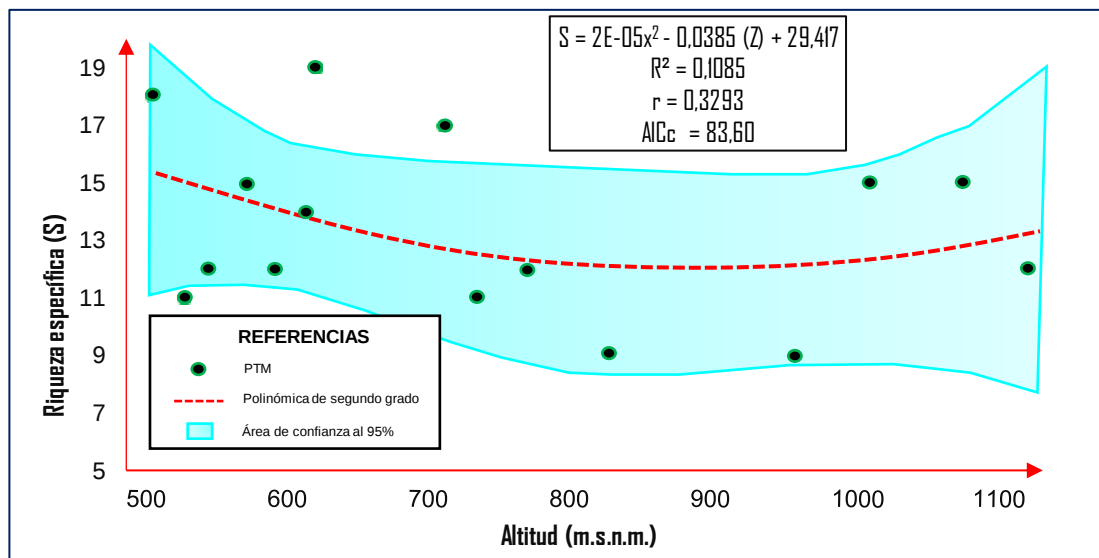
$$N = 80,4596 - 0,0455 (Z)$$

El modelo lineal explicó el 80 % de la variación en la abundancia de individuos en relación con la altitud, con un coeficiente de correlación de $-0,8945$ que evidencia una marcada caída en el número de ejemplares al ascender en altura. En conjunto, estos resultados demuestran de manera clara y robusta que la abundancia disminuye de forma sistemática conforme aumenta la altitud.

3.4.1.2. Riqueza de especies (S)

La riqueza específica osciló entre 9 y 19 especies por parcela. Las parcelas situadas en los tramos más bajos del gradiente altitudinal, como en la PTM1, la PTM4, la PTM5 y la PTM7, alcanzaron la máxima diversidad, con 19 especies en la PTM7, lo que sugiere que las condiciones más estables y favorables de las cotas bajas favorecen una mayor diversidad florística. Por el contrario, en altitudes más elevadas, por ejemplo, en la parcela PTM15, la riqueza disminuyó hasta 12 especies, evidenciando las restricciones ecológicas que impone el incremento de la altitud (**véase el Gráfico 14, elaborado con los datos del Anexo 3, y el Mapa N° 21 del anexo cartográfico**).

Gráfico 14. Relación entre la altitud (Z) y riqueza de especies (S)



FUENTE: Elaboración propia, modelado con Microsoft Excel - Mínimos cuadrados ordinarios (OLS).

Según el gráfico 14 (anterior), la relación entre la altitud (Z) y la riqueza de especies (S) se ajustó con un polinomio de segundo grado, cuya ecuación es:

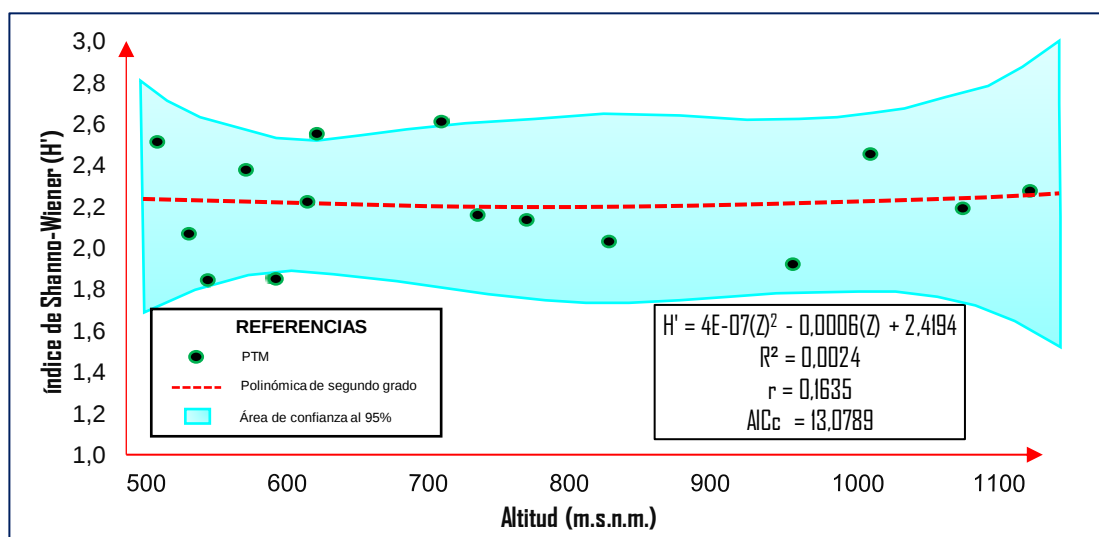
$$S = 0,00002 (Z)^2 - 0,0385 (Z) + 29,417$$

Solo el 10,85 % de la variación en riqueza de especies se explica por la altitud y la correlación de 32,93 % confirma que la relación es muy débil. Esto indica que la altitud no constituye un buen predictor de la riqueza específica en el área de estudio.

3.4.1.3. Índice de Shannon-Wiener (H')

El índice de Shannon-Wiener (H'), que considera tanto la riqueza como la equitatividad de las especies, presentó valores entre 1,84 y 2,61 en las parcelas evaluadas. Todos estos valores se ubicaron dentro del rango de diversidad media, entre 1,36 y 3,5, lo cual indica una composición vegetal relativamente equilibrada, sin una especie claramente dominante. Las parcelas ubicadas en zonas bajas e intermedias, como la PTM8 y la PTM7, mostraron los valores más altos del índice entre 2,61 y 2,54, lo que refuerza la tendencia de mayor diversidad en altitudes menores. En contraste, parcelas de zonas altas, como la 12, presentaron valores más bajos, como 1,92 (véase el Gráfico 15, con datos del Anexo 3 y el Mapa N° 22 del anexo cartográfico).

Gráfico 15. Relación entre la altitud (Z) y el índice de Shannon-Wiener (H')



FUENTE: Elaboración propia, modelado con Microsoft Excel - Mínimos cuadrados ordinarios (OLS).

Según la gráfica 15 (anterior), la relación entre altitud y el índice de Shannon-Wiener, se ajustó con un polinomio de segundo grado, cuya ecuación es:

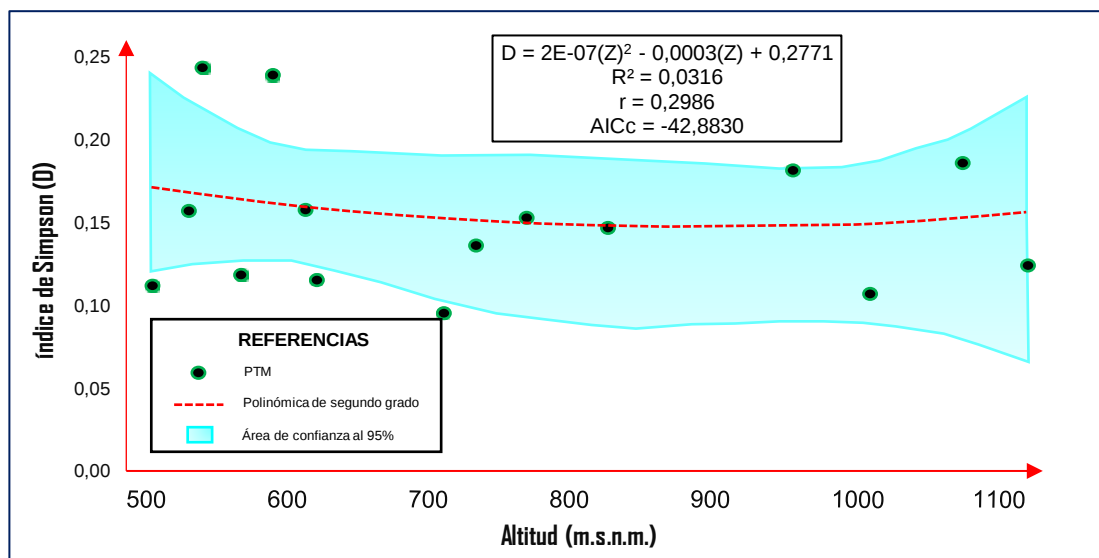
$$H' = 0,0000004 (Z)^2 - 0,0006(Z) + 2,4194$$

Solo el 0,24 % de la variación en la diversidad específica queda explicado por la altitud, y la correlación del 16,35 % refleja una relación muy débil entre ambas variables. Esto indica que la altitud no influye de forma clara sobre la diversidad de especies.

3.4.1.4. Índice de Simpson (D)

El índice de Simpson (D), expresado como probabilidad, varió entre un 10 % y un 24 % en las parcelas evaluadas. Estos valores indican una baja dominancia específica en general, ya que la probabilidad de que dos individuos seleccionados al azar pertenezcan a la misma especie es relativamente baja. Las parcelas 8 y 1 mostraron los niveles más equitativos, con una probabilidad cercana al 10 %, lo que sugiere comunidades con alta diversidad. Por el contrario, en las parcelas 3 y 5, esta probabilidad aumentó hasta un 24 % (**Véase el Gráfico 16, con datos del Anexo 3 y el Mapa N° 23 del anexo cartográfico**).

Gráfico 16. Relación entre la altitud (Z) y el índice de Simpson (D)



FUENTE: Elaboración propia, modelado con Microsoft Excel - Mínimos cuadrados ordinarios (OLS).

Según el Gráfico 16 (anterior), la relación entre la altitud (Z) y el índice de diversidad de Simpson (D) fue modelada mediante una regresión polinómica de segundo orden, representada por la siguiente ecuación:

$$D = 0,00002(Z)^2 - 0,0003(Z) + 0,2771$$

No obstante, el modelo explicó solo el 3,16 % de la variación del índice, y la correlación fue baja, con un valor de 29,86 %. En lo cual, la altitud no influye significativamente en la dominancia específica a lo largo del gradiente evaluado.

La altitud influye en la abundancia de individuos (N), que disminuye a medida que la altitud aumenta. Sin embargo, tiene un impacto limitado en la riqueza específica (S) y muy bajo en los índices de diversidad de Shannon-Wiener (H') y Simpson (D), lo que sugiere que otros factores también influyen en la composición de las comunidades. La relación entre altitud y diversidad es moderada, pero no es determinante.

3.4.1.5. Análisis de varianza (ANOVA) de los índices de diversidad arbórea

Los resultados del **análisis de varianza (ANOVA)** aplicados a los índices de diversidad de Shannon-Wiener y Simpson arrojaron valores de **F = 0,019** y **F = 0,57**, respectivamente, con **p-valores superiores a 0,05** en ambos casos. Esto indica que **no se encontraron diferencias estadísticamente significativas** en la diversidad arbórea entre los distintos niveles del gradiente altitudinal. En consecuencia, **no se rechaza la hipótesis nula**, y se concluye que, según los datos analizados, la altitud **no influye significativamente** en la diversidad de árboles (véase resultados en Tablas 19 y 20).

Tabla 19. Análisis ANOVA para el índice de Shannon -Wiener

Gradiente altitudinal	Media de H'	Fuente de variación	Suma de cuadrados (SC)	Grados de libertad (gl)	Cuadrado medio (CM)	F _{0,05}	Probabilidad (p-valor)	Valor crítico para F
Inferior	2,2	Entre grupos	0,0026	2	0,0013	0,019	0,982	3,885
Intermedio	2,23	Dentro de grupos	0,8497	12	0,0708			
Superior	2,21	TOTAL	0,8523	14	-			

Tabla 20. Análisis de ANOVA para el índice de Simpson

Gradiente altitudinal	Media de D	Fuente de variación	Suma de cuadrados (SC)	Grados de libertad (gl)	Cuadrado medio (CM)	$F_{0,05}$	Probabilidad (p-valor)	Valor crítico para F
Inferior	0,16	Entre grupos	0,0025	2	0,0012	0,57	0,58	3,89
Intermedio	0,13	Dentro de grupos	0,026	12	0,0022			
Superior	0,15	TOTAL	0,0283	14	-			

FUENTE: Elaboración propia, con apoyo de Microsoft Excel y RStudio.

No obstante, el **análisis descriptivo** evidenció una tendencia decreciente tanto en la riqueza específica (S) como en el índice de Shannon-Wiener (H') con el incremento altitudinal, en coherencia con la Regla de Rapoport (1982). Esta discrepancia entre los patrones observados y los resultados estadísticos sugiere que la variabilidad altitudinal presente podría no ser lo suficientemente amplia como para reflejar diferencias marcadas, o bien que intervienen otros factores ecológicos que atenúan el efecto de la altitud sobre la diversidad.

Sin embargo, los patrones observados en la distribución de la diversidad, así como las observaciones realizadas en campo, sugieren una influencia altitudinal que podría no haber sido captada plenamente por el análisis estadístico. En las parcelas de menor altitud se identificaron especies similares hasta el gradiente intermedio, mientras que en las zonas superiores se observaron algunas especies distintas, aunque también se repitieron algunas provenientes de zonas bajas. A pesar de esta repetición, la abundancia general fue menor en las zonas altas. Esta falta de significancia estadística podría deberse a que el gradiente altitudinal evaluado no presenta una amplitud suficiente como para generar contrastes marcados en la composición y estructura de la vegetación.

3.4.2. Análisis de la diversidad beta

3.4.2.1. Análisis de diversidad beta mediante el índice de Jaccard

El análisis de diversidad beta a través del índice de similitud de Jaccard revela patrones claros en la composición florística entre parcelas ubicadas a lo largo de un gradiente altitudinal. A continuación, se describen en detalle los resultados para cada gradiente:

Uno de los resultados más destacados es la **alta similitud** entre parcelas dentro del mismo gradiente altitudinal, especialmente en el **gradiente inferior**, donde se observa un fuerte agrupamiento ecológico. Por ejemplo, la PTM5 y PTM6 comparten un índice de similitud de 73%, el valor más alto entre parcelas distintas, lo que evidencia una composición florística muy cercana. Asimismo, combinaciones como PTM4 con la PTM5 con una similitud del 60% y la PTM4 con la PTM6 con una similitud del 53%, también presentan valores elevados, lo que sugiere condiciones ambientales comunes y una historia ecológica compartida entre estas unidades de muestreo.

En el **gradiente intermedio**, las PTM8 a PTM11 funcionan como un puente florístico entre los extremos. Se observan **valores moderados de similitud** tanto con parcelas inferiores como superiores, destacando la PTM8, que muestra una alta similitud con la PTM2, con una similitud del 65% y conexiones significativas en las PTM4, PTM5 y PTM6. Esto sugiere que el gradiente intermedio alberga una mezcla de especies de ambos extremos altitudinales, actuando como zona de transición o ecotono.

En contraste, las parcelas del **gradiente superior**, desde la PTM13 hasta la PTM15, presentan **bajos valores de similitud** con parcelas de otros gradientes, con similitudes inferiores al 20 %, por ejemplo, la PTM15 y PTM3 presentan una similitud del 4% y PTM15 con la PTM2 con un 10%. En lo cual, el gradiente superior revela un marcado aislamiento florístico. Este patrón, asociado a la altitud y a microclimas específicos, indica comunidades altamente especializadas y una heterogeneidad creciente incluso entre parcelas del mismo nivel (**véase datos y mapa de calor: Gráfico 17, Clúster jerárquico: Gráfico 18 y análisis de escalonamiento no métrico: Gráfico 19**).

Gráfico 17. Mapa de Calor del Índice de Similitud de Jaccard

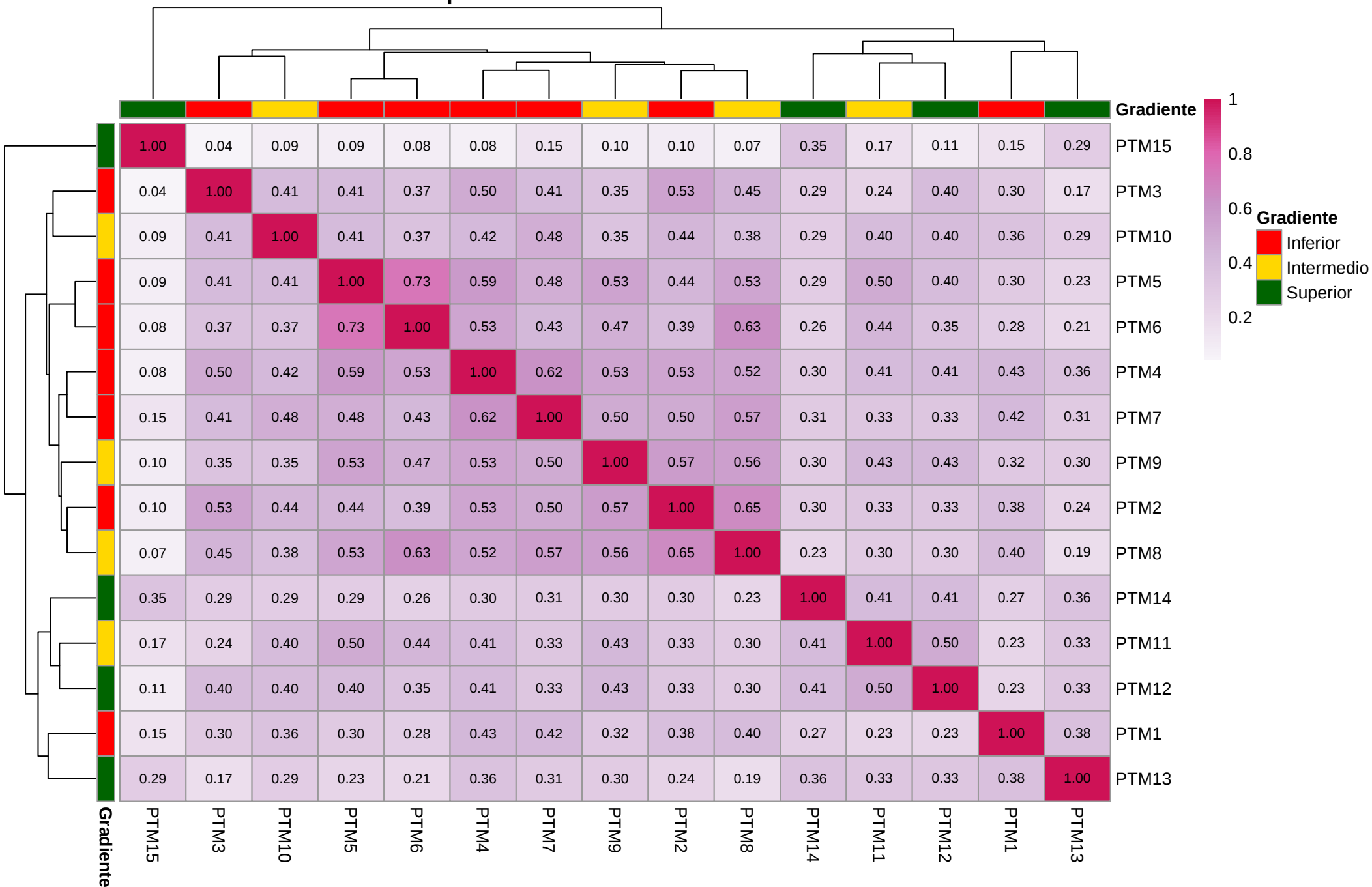


Gráfico 18. Clúster jerárquico del Índice de Jaccard

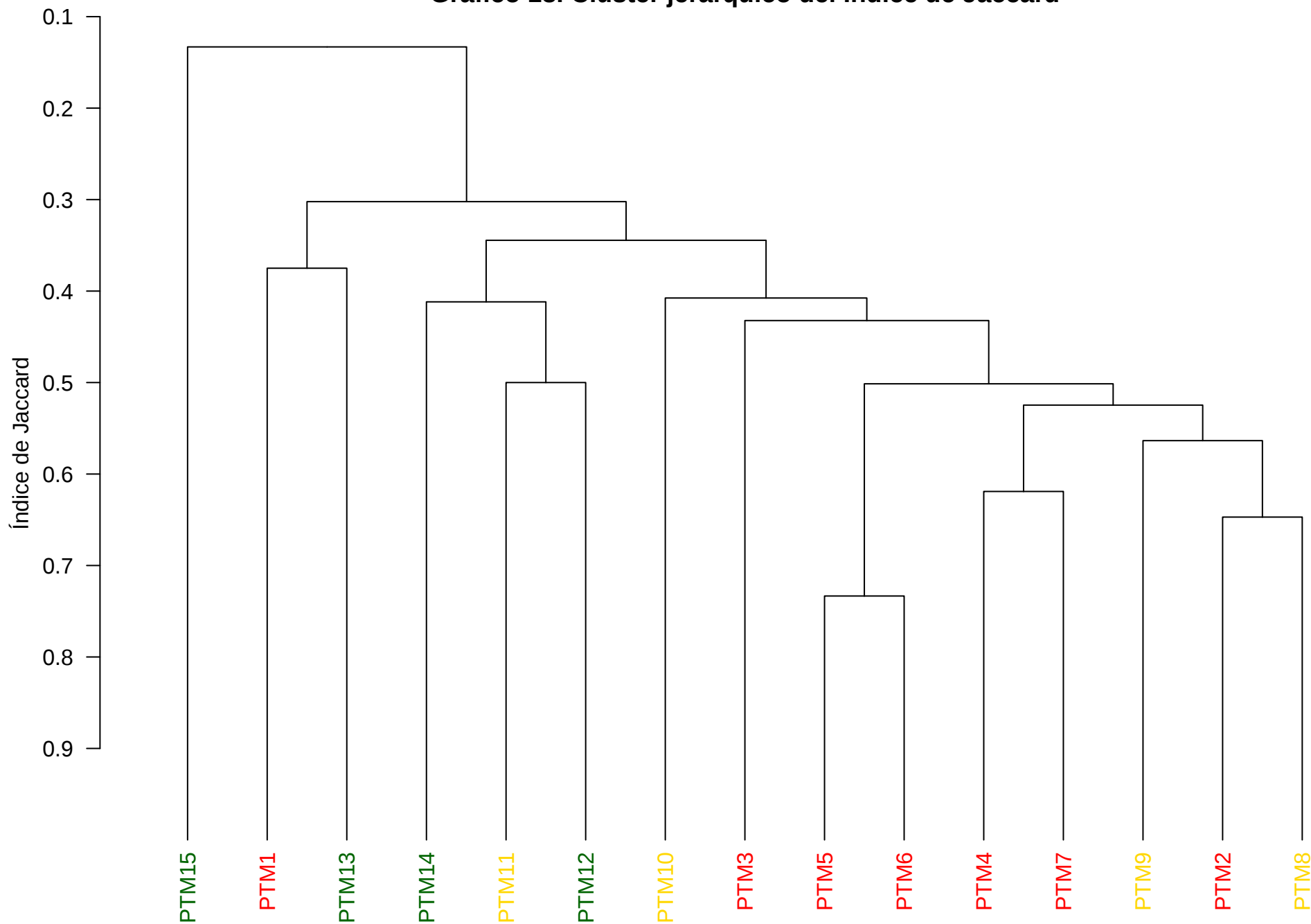
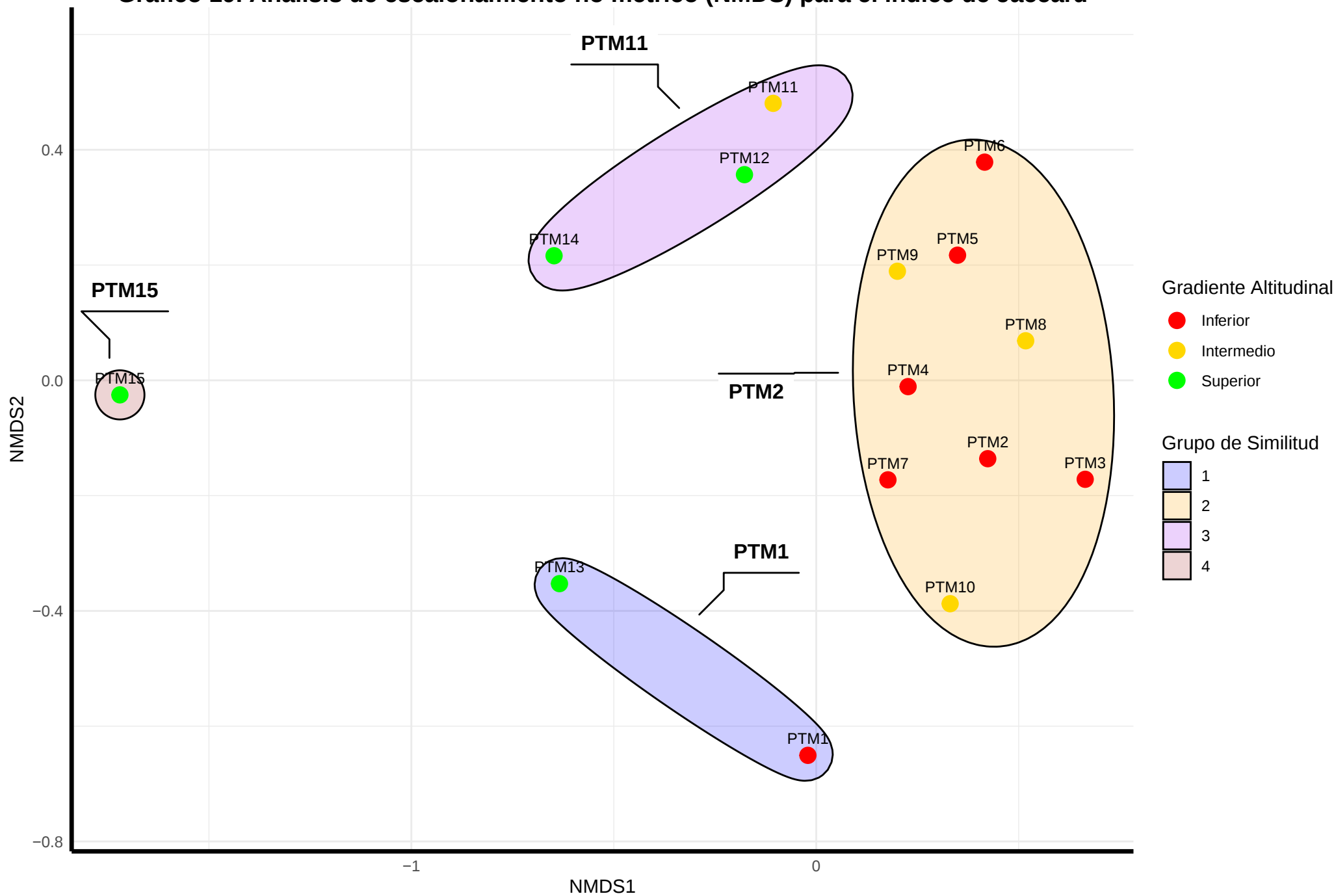


Gráfico 19. Análisis de escalonamiento no métrico (NMDS) para el índice de Jaccard



3.4.2.2. Análisis del índice de Morisita – Horn

El análisis de diversidad beta con el índice de Morisita-Horn, al considerar simultáneamente presencia y abundancia, se observa que las comunidades son notablemente homogéneas en las zonas bajas, mientras que la diferenciación florística aumenta progresivamente hacia las altitudes superiores. A continuación, se describen en detalle los resultados para cada gradiente:

Las parcelas en el **gradiente inferior** muestran una **similitud alta y consistente**, en general por encima del 50% y llegando hasta el 86%, por ejemplo, PTM5 con PTM3 presenta una similitud del 86%. Esto indica que no solo comparten muchas especies, sino que también la abundancia relativa de esas especies es muy similar entre las parcelas de esta zona. La alta similitud cuantitativa refleja comunidades arbóreas estructuralmente homogéneas, probablemente debido a condiciones ambientales más estables y menos variables en las bajas altitudes.

Las parcelas del **gradiente intermedio** presentan **similitud moderada a alta**, con valores que oscila entre el 40 y 80%, aunque con mayor variabilidad en comparación con el gradiente inferior. Por ejemplo, la PTM10 y PTM11 exhibe una alta similitud con PTM3, alcanzando aproximadamente 80%, indicando que algunas parcelas del intermedio mantienen relaciones fuertes en abundancia con el inferior. Sin embargo, dentro del gradiente intermedio también se registran similitudes más bajas; por ejemplo, la parcela PTM8 y la PTM13 comparten solo un 43% de similitud, lo que evidencia la heterogeneidad y la condición transicional de este nivel altitudinal.

Las parcelas del **gradiente superior** muestran **menor similitud** con las del inferior e intermedio, con similitudes entre el 35 y 70% en sus relaciones internas y mucho más bajos con las parcelas inferiores, por ejemplo, la PTM15 con PTM2 tiene una similitud del 13%. Esta menor similitud indica una composición y estructura de especies con abundancias más diferenciadas y especializadas, adaptadas a las condiciones ambientales particulares de mayor altitud (**véase datos en el Gráfico 20, Clúster jerárquico: Gráfico 21 y análisis de escalonamiento no métrico: Gráfico 22**).

Gráfico 20. Mapa de Calor del Índice de Similitud de Morisita–Horn

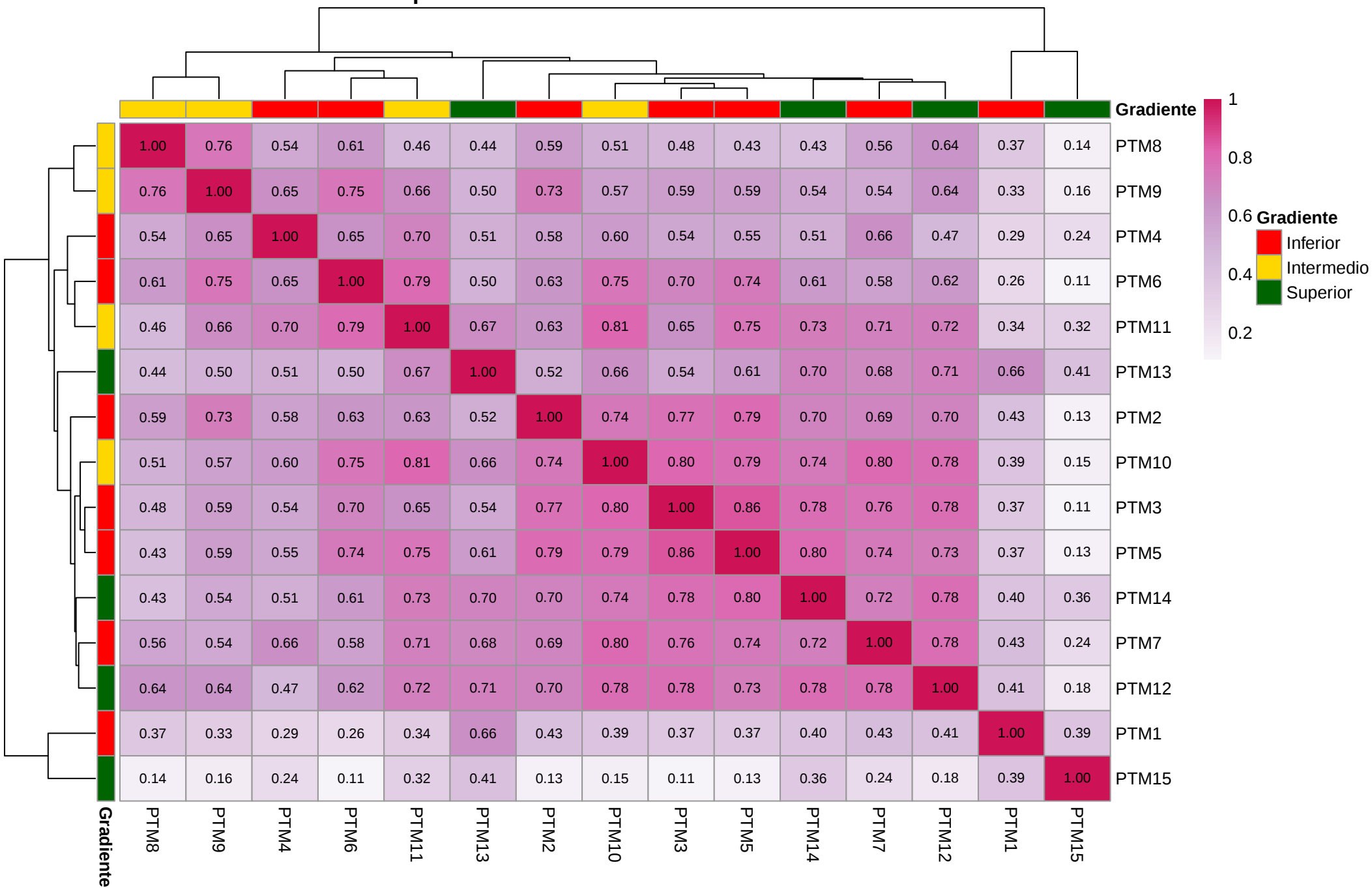


Gráfico 21. Clúster jerárquico del Índice de Morisita–Horn

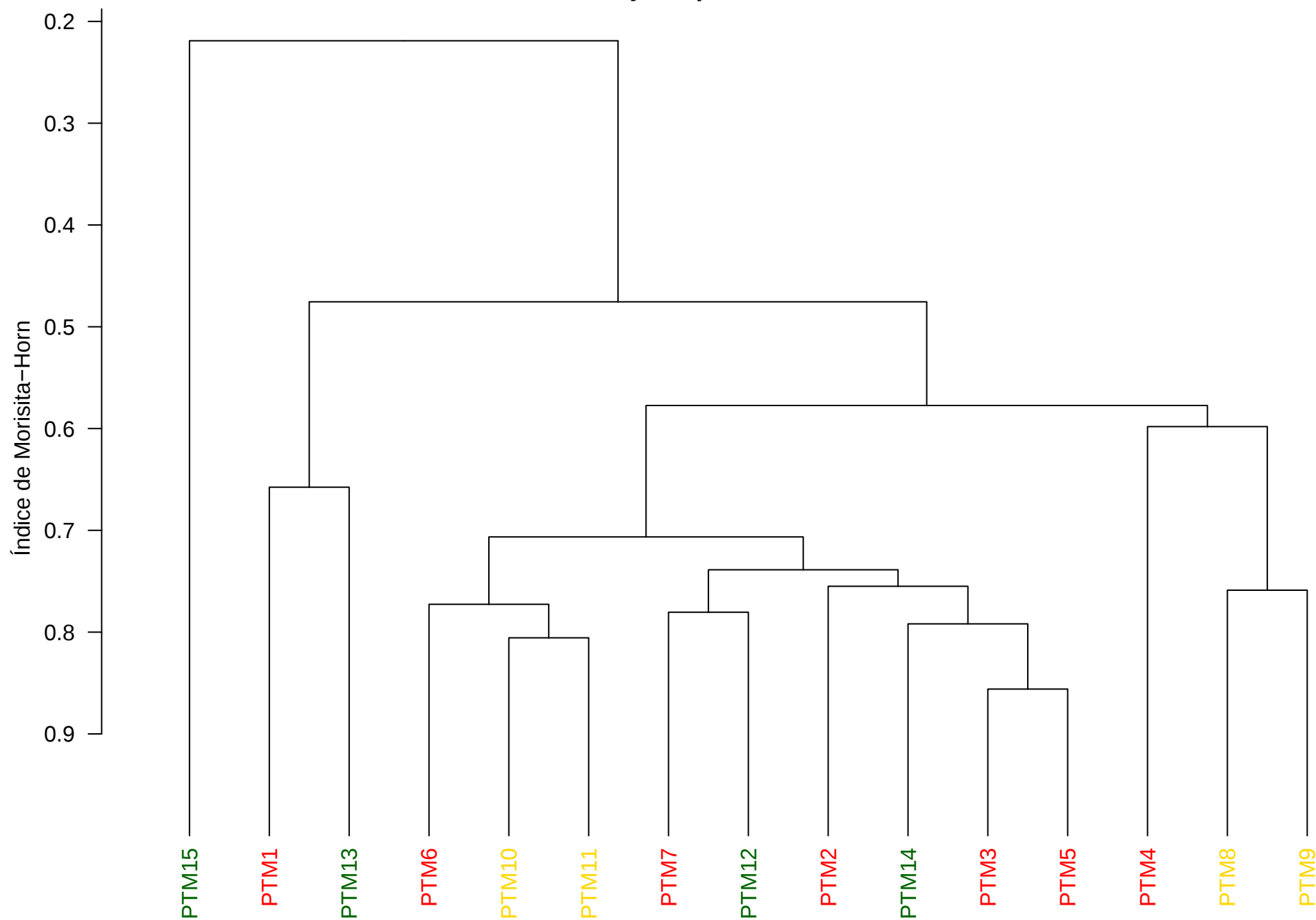
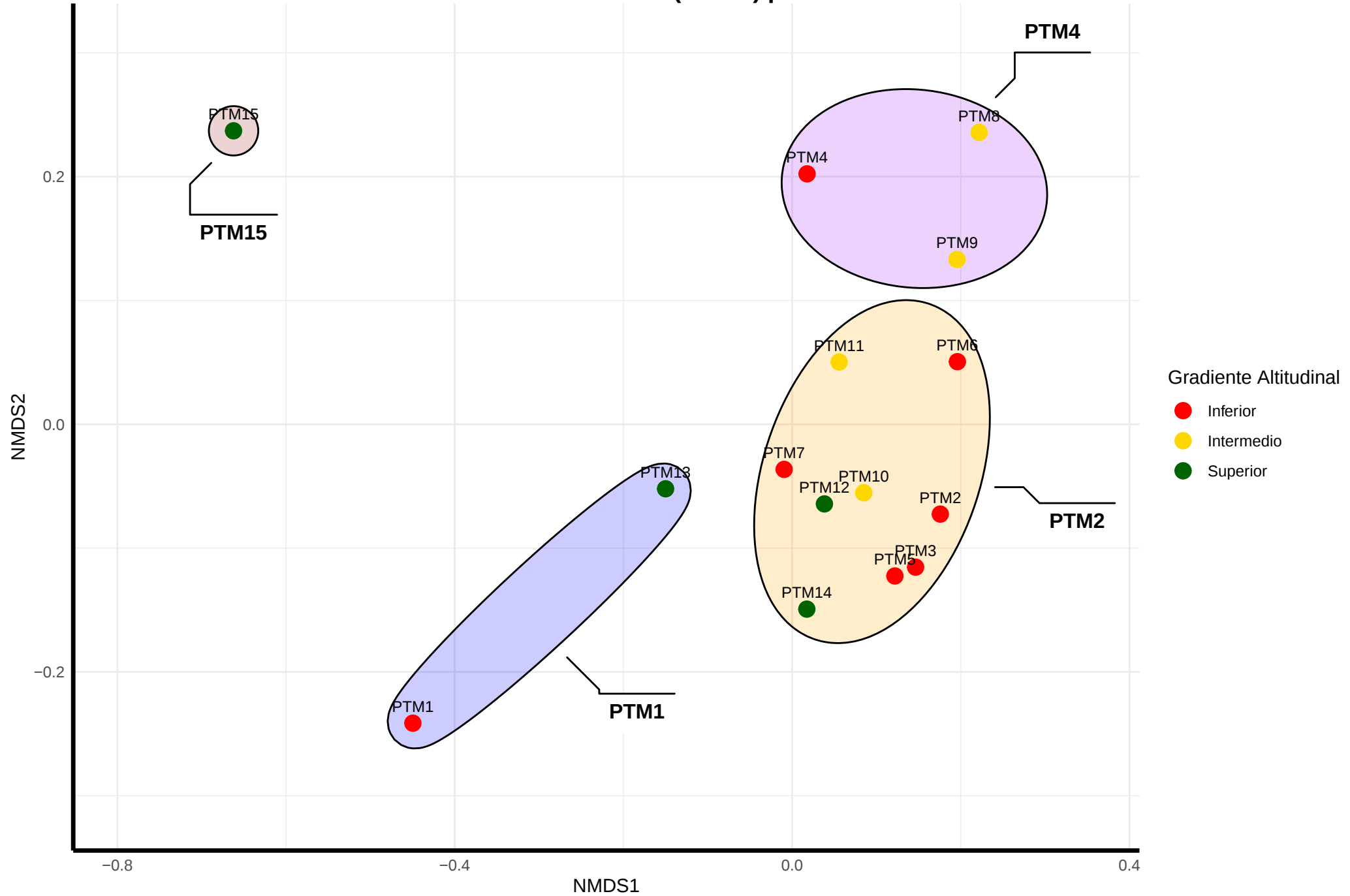


Gráfico 22. Análisis de escalonamiento no métrico (NMDS) para el índice de Morisita-Horn



El análisis conjunto de los índices de Jaccard (presencia-ausencia) y Morisita-Horn (presencia + abundancia) confirma que el gradiente altitudinal es un factor determinante en la organización de la comunidad arbórea. Ambos índices muestran una marcada alta similitud florística y estructural en las parcelas bajas, donde las condiciones ambientales son más homogéneas, y una disminución progresiva de la similitud hacia las cotas superiores, reflejando reemplazo de especies y especialización adaptativa. El gradiente intermedio actúa como ecotono, albergando combinaciones florísticas de los extremos y evidenciando la transición ambiental.

Estos patrones son plenamente coherentes con la hipótesis general y con la Regla de Rapoport: la riqueza y la uniformidad de especies se reducen a medida que aumentan la altitud y la severidad climática. De este modo, la diversidad arbórea resulta mayor y más estable en las zonas bajas, mientras que las zonas altas presentan comunidades más heterogéneas y especializadas.

Desde una perspectiva de gestión y conservación, los resultados permiten distinguir áreas de alta homogeneidad y zonas de singularidad florística elevada que demandan protección prioritaria. Así, el gradiente inferior constituye un núcleo de diversidad y estabilidad, el intermedio funciona como corredor de conectividad florística y el superior alberga conjuntos de especies adaptadas a microclimas extremos, clave para mantener la biodiversidad regional y la resiliencia ecosistémica.

3.5. Discusión

3.5.1. Composición y estructura del bosque

Los resultados de este estudio, con 689 individuos y 44 especies identificadas, evidencian una alta riqueza florística en el gradiente altitudinal analizado, aunque posiblemente subestimada debido a la superficie de muestreo limitada. Este patrón coincide con lo reportado por Zenteno-Ruiz y López (2010) en la Estación Experimental de Río Conchas (E.E.R.C.) de la Universidad Juan Misael Saracho, donde se registraron 591 individuos y se estimaron 74 especies. Cabe destacar que ambos estudios se realizaron en bosques pertenecientes a la misma formación de bosque montano, lo que refuerza la validez comparativa de los resultados.

La composición florística muestra similitudes y diferencias entre ambos estudios. *Astronium urundeuva* (urundel) destaca como especie dominante en ambos casos, lo cual representa el 7,47 % del gradiente inferior en este estudio y alcanza un 8,88 % de área basal y un IVI de 3,75 % en el estudio de Zenteno-Ruiz y López (2010). Lo que sugiere que es una especie estructural clave en el bosque tucumano-boliviano, especialmente en zonas más cálidas o de menor altitud. Por otro lado, en este estudio se registra una marcada dominancia de *Anadenanthera colubrina* (cebil) en el gradiente inferior, con un 25,26 %, especie que si bien fue mencionada por Zenteno-Ruiz & López como uno de los árboles más altos del estrato superior, no figura entre las 15 especies con mayor IVI. Esto podría explicarse por diferencias altitudinales y micro climáticas entre sitios, ya que *Anadenanthera colubrina* (cebil) se asocia típicamente con zonas más secas y cálidas, lo cual concuerda con su mayor representación en el gradiente inferior de nuestro estudio.

Asimismo, las especies del género *Tabebuia* (lapachos) también tienen una fuerte presencia con 18,30% en el gradiente inferior, pero no son mencionadas como dominantes por Zenteno-Ruiz & López, lo que podría indicar una variabilidad florística importante a nivel local, posiblemente influenciada por condiciones edáficas, antropogénicas o diferencias en el diseño del muestreo.

En cuanto a la estructura diamétrica, ambos estudios coinciden en una distribución en “J” invertida, con una mayor concentración de individuos en clases diamétricas menores (10–20 cm), lo cual es típico de bosques tropicales en regeneración o dinámicos. En este estudio, al igual que de Zenteno-Ruiz & López, se observa una disminución progresiva hacia clases de mayor diámetro, indicando una estructura forestal en equilibrio y con procesos activos de reclutamiento.

Finalmente, la forma de copa y el grado de infestación por lianas presentan patrones similares en ambos estudios, con predominio de copas buenas o tolerables y una baja proporción de árboles severamente afectados por lianas. Este comportamiento es característico de bosques poco perturbados o en proceso de regeneración natural, como es el caso del presente estudio, donde el ecosistema se encuentra recuperándose tras eventos de incendios forestales.

3.5.2. Diversidad alfa (α) en los rangos altitudinales

Estudios previos en el bosque tucumano-boliviano, como Gallegos *et al.* (2019), evidenciaron una disminución significativa de la diversidad arbórea con la altitud, con un pico de riqueza entre los 900 y 1200 m. En la Serranía San Antonio, también se observa una reducción progresiva en la diversidad alfa conforme aumenta la altitud, en línea con la Regla de Rapoport.

Ambos trabajos coinciden en que las zonas bajas y medias presentan mayor abundancia de individuos, asociada a condiciones ambientales más estables y favorables, mientras que la riqueza y diversidad son menores en el bosque altimontano, atribuido a condiciones restrictivas como la temperatura y la humedad. No obstante, en nuestro caso, la relación entre altitud y diversidad fue débil y no concluyente, con índices de Shannon-Wiener y Simpson que no evidenciaron variaciones significativas, reflejando comunidades relativamente equilibradas en equitatividad.

Asimismo, se reconoce que la relación entre altitud y diversidad no es lineal, y que las elevaciones medias podrían actuar como zonas de transición entre pisos ecológicos.

Aunque la abundancia disminuye con la altitud, esta variable no es un fuerte predictor de la riqueza ni de la diversidad, posiblemente debido a la variabilidad ambiental local, al número limitado de parcelas y a la exclusión de especies no leñosas.

Sin embargo, en nuestro estudio los análisis estadísticos no mostraron diferencias significativas entre los estratos altitudinales, posiblemente debido a una variabilidad altitudinal limitada o a factores locales que modulan este efecto. Por su parte, Gallegos *et al.* sí reportaron diferencias estadísticamente significativas, especialmente con menor diversidad en el bosque altimontano. Esta discrepancia puede explicarse por una mayor amplitud altitudinal y un muestreo más extenso en su estudio, así como por la influencia de variables ecológicas no consideradas en nuestro análisis.

3.5.3. Diversidad beta (β) a lo largo del gradiente altitudinal

El índice de Morisita-Horn mostró una clara diferenciación florística entre los gradientes altitudinales del bosque montano de la Serranía San Antonio, con altas similitudes (hasta 86%) entre parcelas del mismo estrato, especialmente en el gradiente intermedio, y bajas similitudes (menos del 15%) entre parcelas de diferentes pisos altitudinales. Este patrón indica un recambio progresivo de especies y una especialización altitudinal, consistente con la hipótesis central del estudio.

Estos resultados coinciden con los de Gallegos *et al.* (2019), quienes también encontraron baja similitud en las parcelas de mayor altitud debido a condiciones ambientales restrictivas. Además, el gradiente intermedio actúa como zona de transición, compartiendo especies con los pisos inferiores y superiores.

Por lo que, la diversidad beta responde fuertemente al gradiente altitudinal, no solo en riqueza sino también en abundancia relativa, estructurando comunidades arbóreas ecológicamente distintas.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- El análisis florístico del área de estudio evidencia una notable diversidad arbórea, con 44 especies distribuidas en 22 familias botánicas, 41 géneros, predominando la familia *Leguminosae* tanto en número de especies como en abundancia. Este resultado fue respaldado por el Índice de Valor de Importancia (IVI), que señala a *Anadenanthera colubrina* (cebil) como la especie más dominante ecológicamente, seguida por el lapacho amarillo (*Tabebuia heteropoda*) y el urundel (*Astronium urundeuva*). La distribución diamétrica en “J” invertida, según el modelo de De Liocourt, indica que el bosque mantiene una dinámica natural saludable, con abundancia de árboles jóvenes. El bosque evaluado muestra buena salud estructural y fisiológica, con copas vigorosas y una clara estratificación en la exposición solar, donde conviven árboles bien iluminados y otros en sombra. La mayoría de los árboles presentan formas de copa bien conformadas, aunque algunos sectores tienen copas deterioradas y afectación por lianas, debido a incendios recientes.
- La regeneración natural muestra mayor densidad y diversidad de especies en los gradientes altitudinales inferiores, disminuyendo progresivamente hacia los niveles superiores, lo que se confirma con el análisis de abundancia y densidad en las fases de brinzal y latizal.
- En cuanto a la diversidad alfa, con base a los resultados del análisis estadístico (ANOVA), se acepta la hipótesis nula, ya que no se encontraron diferencias significativas en la diversidad arbórea entre los distintos niveles del gradiente altitudinal, según los índices de Shannon-Wiener y Simpson. Sin embargo, el análisis de campo reveló patrones claros de variación en la diversidad conforme se avanza hacia altitudes mayores, lo que indica que la altitud tiene una

influencia en la distribución de especies, aunque la variabilidad del gradiente estudiado no fue suficiente para evidenciar diferencias marcadas. En las parcelas de menor altitud se observó una mayor diversidad, mientras que en las zonas superiores la abundancia de especies disminuyó, aunque algunas especies comunes entre zonas bajas y medias también se repitieron. Esta falta de significancia estadística podría deberse a que el gradiente altitudinal evaluado no presenta una amplitud suficiente como para generar contrastes marcados en la composición y estructura de la vegetación.

- Sobre la diversidad beta, en cuanto a los índices de diversidad beta, tanto el índice de Jaccard como el de Morisita-Horn, indican claramente variaciones en la composición florística a lo largo del gradiente altitudinal. El índice de Jaccard muestra una alta similitud entre parcelas dentro de un mismo gradiente, especialmente en las zonas bajas, y una menor similitud a medida que se asciende, con los gradientes superiores mostrando una mayor heterogeneidad florística. De manera similar, el índice de Morisita-Horn refuerza la influencia del gradiente altitudinal, con mayores similitudes dentro de los mismos pisos altitudinales y una disimilitud más marcada entre parcelas de diferentes altitudes.

4.2. Recomendaciones

- Es fundamental implementar estrategias de conservación que no solo protejan las especies dominantes, sino también aquellas con menor representación, pero vitales para el equilibrio del ecosistema. Monitorear las poblaciones de estas especies menos abundantes es importante, ya que desempeñan funciones ecológicas esenciales para la estabilidad a largo plazo del bosque.
- El bosque en gradientes bajos muestra alta biodiversidad y regeneración natural, aunque es susceptible a perturbaciones. Se recomienda priorizar la protección de estas áreas y controlar las lianas en zonas vulnerables, especialmente después de incendios forestales y evitar los mismos, para mantener la estabilidad ecológica.
- Los resultados indican que la altitud es un factor determinante en la diversidad arbórea, por lo que es esencial desarrollar estrategias de manejo adaptativo que consideren las variaciones altitudinales, además de otros factores como la pendiente, el tipo de suelo y las perturbaciones locales que también afectan la composición vegetal.
- Se recomienda investigar otras variables ecológicas, ambientales y antropológicas, como el suelo, microclima, pendiente, orientación, uso de suelo y perturbaciones, que podrían estar modulando la diversidad arbórea. Esto permitirá comprender mejor la dinámica del ecosistema y tomar decisiones de manejo más informadas.