

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

CONTENIDO FOLIAR DE NUTRIMENTOS EN ESPECIES
ARBÓREAS LATIFOLIADAS DE COSTA RICA

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en
Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales para optar por el grado y título de Maestría
Académica en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis en Suelos

RONALD ALBERTO CHAVES COREA

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2020

Dedicatoria

Dedicado a mi esposa Paulina Campos Sandoval y a mis hijos Eva Chaves Campos y Joaquín Chaves Campos quienes son mi inspiración y motor de vida. A mis padres Shirley Corea Valdivia y Demetrio Chaves Calderón y mi abuela Zoraida Calderón Murillo por todo el apoyo brindado desde el inicio de mi formación personal y profesional.

Agradecimientos

A Dios, solo Él sabe cómo he llegado hasta este punto.

Al Dr. Alfredo Alvarado y colaboradores por permitirme formar parte de su esfuerzo de más de 30 años por mejorar la nutrición mineral de especies forestales tropicales.

A la Universidad de Costa Rica y al Sistema de Estudios de Posgrado por admitirme en su programa, cultivarme en las ciencias del suelo y darme las herramientas para lograr culminar con este trabajo.

A los miembros del tribunal examinador por el apoyo brindado en la revisión de este manuscrito. En particular al M.Sc. Rafael Mata Chinchilla y al Dr. Eduardo Chacón Madrigal por las incontables enseñanzas que espero duren mucho tiempo más.


“Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado de y título de Maestría Académica en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis en Suelos”



Dr. Mario Villatoro Sánchez
Representante del Decano
Sistema de Estudios de Posgrado



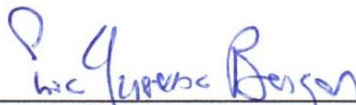
Dr. Alfredo Alvarado Hernández
Director de Tesis



M. Sc. Rafael Mata Chinchilla
Asesor



Dr. Eduardo Chacón Madrigal
Asesor invitado



Dr. Eric Guevara Berger
Director del Programa de Posgrado
en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales



Ronald Chaves Corea
Sustentante

Tabla de Contenidos

Dedicatoria	ii
Agradecimientos.....	ii
Hoja de Aprobación.....	iii
Tabla de Contenidos	iv
Resumen	v
Índice de Cuadros	vi
Índice de Figuras	vii
CAPÍTULO I.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Revisión de literatura	4
1.3 Objetivo General.....	9
1.4 Objetivos Específicos	9
1.5 Literatura citada	10
CAPÍTULO II.....	21
2.1 Resumen	21
2.2 Introducción.....	22
2.3 Materiales y métodos.....	24
2.4 Resultados.....	25
2.5 Discusión y Conclusiones	29
2.7 Literatura citada	33
CAPÍTULO III	36
3.1 Resumen	36
3.2 Introducción.....	37
3.3 Materiales y Métodos.....	38
3.4 Resultados.....	40
3.5 Discusión y Conclusiones	52
3.6 Literatura Citada	55
CAPÍTULO IV	58
4.1 Resumen	58
4.2 Introducción.....	59
4.3 Materiales y Métodos.....	60
4.4 Resultados.....	65
4.5 Discusión y Conclusiones	69
4.6 Literatura Citada	72
CAPÍTULO V	78
5.1 Conclusiones Generales	78
5.2 Recomendaciones Finales	79
5.4 Anexos.....	80

Resumen

Los bosques y plantaciones forestales tienen importancia ambiental, social y económica. Sin embargo, existe poca información sobre el uso de los nutrientes de las especies forestales en los ecosistemas neotropicales. Con el fin de contribuir con un sistema de diagnóstico de nutrición mineral, se caracterizó la variación del contenido foliar de nutrientes en 3.559 muestras tomadas en bosques y plantaciones forestales principalmente de Costa Rica. Las muestras provienen de 197 especies forestales pertenecientes a 145 géneros, 61 familias y 29 órdenes y con los resultados de los análisis se confeccionó una base de registros georeferenciados de las concentraciones foliares (%) de N, P, K, Ca, Mg, S, y de los micronutrientes (mg kg^{-1}) Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo, Na y Al. Cada registro posee información de variables ambientales como altitud, temperatura anual máxima, media y mínima, precipitación anual media, zona de vida y la clasificación del suelo a nivel de subordenes de los sitios donde se encuentran los árboles muestreados.

A las 96 especies de la base de datos que tuvieron 5 o más registros ($n=\text{repeticiones}$) se les reporta el rango de concentración foliar por elemento y se clasifica según la mediana de su concentración foliar (MED.CONC). Ochenta y cinco especies tuvieron uno o más elementos cuya MED.CONC estaba por debajo del percentil 25 de la base de datos general y se les clasificó como minimalistas. Sesenta y siete especies se clasificaron como acumuladoras de elementos, pues la MED.CONC de uno o más elementos se encontró entre los percentiles 80% y 95% de la población total. Treinta y cuatro especies tenían la MED.CONC de uno o varios elementos por arriba del percentil 95% de la base de datos general y se clasificaron como hiperacumuladoras.

Por medio del análisis de componentes principales (PCA) se agruparon las variables ambientales relacionadas entre sí y los elementos cuyas concentraciones foliares que se relacionaron con dichas variables. Se encontró que la altitud y la temperatura afectan significativamente la concentración foliar de algunos elementos de manera que al aumentar la altitud la temperatura disminuye, la concentración foliar de N, P y K aumenta y la del B disminuye. En las zonas donde hay mayor precipitación los árboles tienden a acumular más Mn, S y Al y en sitios donde hay poca la concentración foliar es mayor en Ca y Mg.

Índice de Cuadros

Cuadro 2.1.	Lista de especies que se incluyen en la base de datos.	25
Cuadro 2.2.	Cantidad de registros fuera del territorio nacional incluidos en la base de datos.....	26
Cuadro 2.3.	Estadística descriptiva de la concentración foliar de N, P, K, Ca, Mg, S, Na, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Al, obtenido a partir de 197 especies forestales tropicales.....	28
Cuadro 3.1.	Tabla de clasificación de especies forestales según la concentración foliar de cada elemento.....	47
Cuadro 3.2.	Rangos entre el percentil 25 y 80 de la concentración foliar de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu, B, Al y Na, de 96 especies forestales.....	49
Cuadro 4.1.	Agrupación de las variables cuantitativas que correlacionan de forma significativa ($p < 0,05$) con los tres componentes principales.	67

Índice de Figuras

Figura 1.1.	Mapa de la cobertura boscosa de Costa Rica (SINAC -Programa 2015).....	5
Figura 2.1.	Localización de los árboles georreferenciados en Costa Rica	26
Figura 2.2.	Localización de los árboles georreferenciados en la región	27
Figura 2.3.	Distribución de la concentración foliar de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Al y Na, de los árboles de la base de datos.	30
Figura 2.4.	Distribución de la concentración foliar de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Al y Na, de los árboles de la base de datos después de eliminar los valores por encima del percentil 95.....	31
Figura 3.1.	Clasificación de especies forestales según la distribución de la concentración de nutrimentos.....	38
Figura 4.1.	Mapa de zonas de vida Costa Rica y ubicación de los puntos de muestreo.....	61
Figura 4.2.	Mapa de elevación de Costa Rica.....	62
Figura 4.3.	Mapa de temperatura media de Costa Rica.	62
Figura 4.4.	Mapa de precipitación anual media de Costa Rica.	63
Figura 4.5.	Mapa de órdenes de suelos de Costa Rica.....	63
Figura 4.6.	Modelos lineales que correlacionan la temperatura ambiental (°C) y altitud (msnm), con la concentración foliar de N, P, K y B... ..	68



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, RonaldChaves Corea, con cédula de identidad 113080587, en mi condición de autor del TFG titulado _____

**CONTENIDO FOLIAR DE NUTRIMENTOS EN ESPECIES
ARBÓREAS LATIFOLIADAS DE COSTA RICA**

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE:

Nombre Completo: Ronald Chaves Corea

Número de Carné: A51589 Número de cédula: 113080587

Correo Electrónico: ronald.chavescorea@ucr.ac.cr

Fecha: 3/9/2021 Número de teléfono: 88588151

Nombre del Director (a) de Tesis o Tutor (a): Dr. Alfredo Alvaro Hernández

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

CAPÍTULO I

El análisis foliar como herramienta de diagnóstico en especies arbóreas latifoliadas del neotrópico

1.1 Introducción

La mayor biodiversidad de especies terrestres del planeta se encuentra en los suelos de los ecosistemas de bosque o áreas intervenidas donde se alberga y constituye uno de los principales sumideros de carbono (Hallsworth 1982, Osborne 2000, Kappelle y van Uffelen 2006, Brussaard et al. 2007, Alvarado et al. 2018). Los árboles son los elementos estructurales de los bosques, lo que hace necesario estudiarlos para manejar esos ecosistemas de manera sostenible o para plantarlos y disminuir su demanda en los bosques. Para eso se requiere información sobre la distribución y variación de nutrimentos de las especies arbóreas, y la relación de esas características con las condiciones edafoclimáticas en las que se desarrollan (Rodríguez y Álvarez 2010, Alvarado y Raigosa 2012, Camino y Morales 2013).

Los cambios bioclimáticos que ocurren con la elevación establecen variaciones en los ecosistemas que permiten diferenciar pisos altitudinales utilizados para clasificar las unidades de los ecosistemas (Jeffrey y Budowski 1986, Hall et al. 2003, Karmalkar et al. 2011, Maldonado et al. 2016, Quesada et al. 2019, Gotlieb et al. 2019) recocidos como zonas de vida (Holdridge y Grenke 1971) o ecorregiones (Alvarado et al. 2007). Para América Central, según los criterios de varios autores, se pueden agrupar estas zonas de vida en tres macroambientes: (1) los bosques húmedos y muy húmedos de pisos bajos (Lieberman et al. 1985, 1985, Piperno y Pearsall 1998, Condit et al. 2020), (2) los bosques secos y estacionalmente secos de bajura asociados a manglares (Janzen 1988, Murphy y Lugo 1986, Gillespie et al. 2000, Griscom y Ashton 2011, Gotlieb et al. 2019, Quesada et al. 2019), y (3) los bosques de colinas y montañas que incluyen los de coníferas (Denevan 1961, Alexander 1973, Perry 1991) y los pisos premontanos, montanos y subalpino (Kappelle 2005, Kappelle y van Uffelen 2006). La identificación de esas macrorregiones bioclimáticas está relacionada con la distribución de especies en el espacio y en el tiempo (Lloyd 1963, Wake 1987, Strauss y Bazzaz 1991, Scatena 2002, Dick y Pennington 2019, Condit et al. 2020).

En Costa Rica, el Inventario Nacional Forestal (INF-CR) (SINAC 2015) registra una lista de árboles de 1.506 especies forestales que cubren el 75,5% de la superficie del país (Figura 1.1). Históricamente, estos bosques han disminuido debido a la deforestación causada por el cambio de uso

de la tierra de bosque a ganadería o agricultura (Myers 1981, Sader y Joyce 1988). Sin embargo, en Costa Rica a partir de los años ochenta, la cobertura forestal aumentó en parte debido a los proyectos de reforestación con especies de rápido crecimiento y valor comercial (FAO 2016). No obstante, la cobertura de bosques primarios se ha reducido (Sánchez et al. 2002) y los bosques secundarios producto de la reforestación o regeneración no mantienen la biodiversidad, lo que provoca la pérdida de la calidad de los bosques y de los servicios ambientales que estos brindan (Shaanker et al. 2001, Stan y Sánchez 2019). En los últimos años y por razones socioeconómicas, la reforestación se ha reducido al cerrarse algunos programas públicos y privados (Barrantes y Ugalde 2019).

Desde el punto de vista ambiental los bosques son en buena parte responsables de la interceptación y el filtrado del agua, la generación de oxígeno, la neutralización y descomposición de contaminantes, el amortiguamiento del cambio climático, la formación y preservación del suelo, el refugio de fauna silvestre, la conservación de la biodiversidad, entre otros (FAO 2020, Pérez et al. 2007). Al considerar todos los componentes vegetales y de suelo medidos en el INF-CR (SINAC 2015) se estima que la acumulación total de dióxido de carbono (CO₂) para el bosque de Costa Rica fluctúa entre 2.772 y 3.128 millones de toneladas.

El presente trabajo suple información para mejorar el conocimiento de la nutrición de especies arbóreas latifoliadas de Costa Rica y clasificar las especies en función de su contenido nutricional. La variación en los nutrientes en las plantas está relacionada con variables ambientales físicas que afectan las propiedades de los suelos, además de la historia geológica detrás del desarrollo de estos. Estas características junto con la variación altitudinal afectan la distribución de las plantas, que a su vez afectan las propiedades de los suelos. Factores de tipo climático como la precipitación pluvial, la temperatura ambiente y la exposición a vientos fuertes afectan tanto el crecimiento de las plantas como la pedogénesis (Holdridge y Grenke 1971, Grubb 1977, Soethe et al. 2008).

Los nutrientes requeridos por los árboles son los mismos que para cualquier tipo de planta, pero varían en sus proporciones dependiendo de la especie (Bertsch 2003). Además del carbono, obtenido a través del intercambio gaseoso, y del hidrógeno y oxígeno, obtenidos a través del agua, las especies forestales utilizan 18 elementos esenciales para su óptimo desarrollo. Seis de esos elementos son requeridos en cantidades relativamente grandes (macronutrientes) como el nitrógeno (N), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), fósforo (P) y azufre (S). Los micronutrientes, oligoelementos o elementos traza, son aquellos que los árboles necesitan en concentraciones relativamente pequeñas, entre ellos el hierro (Fe), el cobre (Cu), el zinc (Zn), el manganeso (Mn), el molibdeno (Mo), el boro (B), el sodio (Na), el aluminio (Al), el silicio (Si), el níquel (Ni), el cloruro (Cl) y el cobalto (Co) (Barber 1995, Marschner 1995, Tinker y Nye 2000, BassiriRad 2005, Alvarado y Raigosa 2012, Maathuis 2013).

Según BassiriRad (2005) el establecimiento, adaptación y evolución de las especies forestales dependen en su mayoría, de la capacidad y disponibilidad que tengan los árboles de adquirir nutrientes del medio en que se desarrollan. Por lo tanto, la concentración de los elementos y su proporción en los tejidos foliares será también el reflejo de la combinación de los factores bióticos y abióticos del sitio donde cada especie se desarrolla.

El estudio y la comprensión de la variación de los contenidos foliares de nutrientes en las especies forestales es un campo poco explorado y los trabajos más recientes sobre nutrición de estas especies se enfocan en aquellas de interés comercial como la *Tectona grandis* (Nwoboshi 1984, 1983, Drechsel y Zech 1991, Negi et al. 1995, Boardmann et al. 1997, Mollinedo García 2003, Vaides 2004, Montero y Kanninen 2006, Portuguez 2012), *Gmelina arborea* (Drechsel y Zech 1991, Stuhmann et al. 1994, Caguasango y Cadena 2012, Avellán 2012), *Cerdrela odorata* (Drechsel y Zech 1991, Paniagua 2005, Ramírez 2014), *Terminalia amazonia* (Nichols et al. 1997, Montagnini 2000, Montenegro 2005, Alvarado et al. 2015), *Alnus acuminata* (Mills y Jones 1996, Escobar et al. 1993, Segura et al. 2006, Rodríguez et al. 1984) y *Acacia mangium* (Caguasango 2017). También se consideran otras especies nativas de potencial para la producción de madera como *Vochysia guatemalensis* (Cornelius y Mesen 1997, Badilla y Murillo 2014, Camacho 2014), *Vochysia ferrugínea* (Horn y Montagnini 1999, Alvarado et al. 1997, Herrera y Finegan 1997, Arias et al. 2011), *Dalbergia retusa* (cocobolo), *Enterolobium cyclocarpum* (guanacaste), *Hymenaea courbaril* (guapinol o jatobá), *Pachira quinata* (pochote) y *Schizolobium parahyba* (Caguasango 2017, Alvarado et al. 2018).

1.2 Revisión de literatura

Se define como un árbol cualquier planta leñosa perenne que crece con un tronco o fuste de al menos 3 m de altura (Frankie et al. 1974) y por bosque a “un ecosistema nativo o autóctono, intervenido o no, regenerado por sucesión natural u otras técnicas forestales, que ocupa una superficie de dos o más hectáreas, caracterizada por la presencia de árboles maduros de diferentes edades, especies y porte variado, con uno o más doseles que cubran más del setenta por ciento de esa superficie y donde existan más de sesenta árboles por hectárea de quince o más centímetros de diámetro medido a la altura del pecho (DAP)” (Republica de Costa Rica 1996).

Históricamente el ser humano ha utilizado la madera de los bosques como material de construcción, fuente de combustible y materia prima en ebanistería. Sumado a esto, el aumento poblacional genera una demanda creciente en el consumo de madera, que hace que se convierta en un producto atractivo para producir y comercializar en todo el mundo y se considere de importancia económica. En el 2017 Costa Rica exportó un equivalente a 87,38 millones de dólares en productos forestales como madera, carbón vegetal y manufactura entre otros (Chavarría y Molina 2018).

Los bosques son ecosistemas que brindan servicios que permiten la vida en el planeta, la FAO (2020) define dichos servicios como “...la multitud de beneficios que la naturaleza aporta a la sociedad”. Existen 4 tipos de servicios que los ecosistemas boscosos brindan, los de abastecimiento son los beneficios tangibles que podemos obtener del ecosistema, no solo se reducen a los alimentos sino también materiales de construcción entre otros (FAO 2020). Sumado están los servicios de regulación que son los productos de los procesos de los ecosistemas como la purificación del aire, la conservación del suelo y el amortiguamiento de los efectos causados por los desastres naturales. El tercer servicio es el de de apoyo, debido a los espacios aptos para el desarrollo de plantas y animales, donde se dan procesos complejos que permiten el sostén de la biodiversidad como los ciclos de nutrientes y la polinización de cultivos. Los servicios culturales que brindan los bosque son aquellos inmateriales, estos comprenden desde la identidad cultural, el disfrute de la naturaleza y esparcimiento en el entorno natural (FAO 2020).

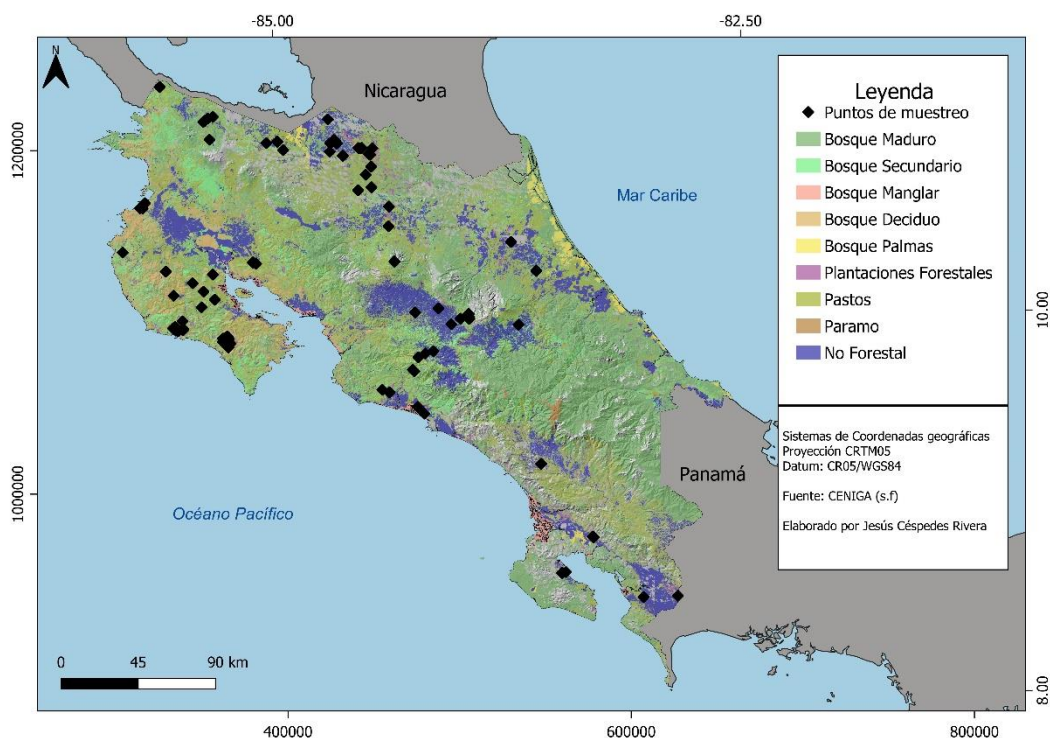


Figura 1.1. Puntos de muestreo en el mapa de la cobertura boscosa de Costa Rica (SINAC - Programa 2015).

De los cuatro tipos de servicios ecosistémicos brindados por los bosques, los de apoyo deben ser los de mayor relevancia, ya que los bosques son uno de los ecosistemas más influyentes en la conservación de la biodiversidad terrestre donde aportan más del 10% del PIB en muchos de los países más pobres (FAO 2020).

Los ecosistemas boscosos tienen un papel relevante desde el punto de vista de los servicios de regulación, ya que son responsables de parte del secuestro y almacenamiento de carbono en el planeta, la filtración y purificación del agua, la prevención de la erosión, la calidad del aire y la regulación del micro clima (FAO 2020). Sin embargo, el desarrollo urbano y agrícola ha generado alta presión sobre los ecosistemas boscosos, reduciendo el tamaño de la cobertura forestal y provocando fragmentación del ecosistema y de los servicios que estos brindan (Sánchez et al. 2002).

Actualmente en Costa Rica el 2% de la cobertura boscosa pertenece a plantaciones forestales de especies de interés comercial (SINAC 2015). Como cualquier otro sistema agrícola el establecimiento de plantaciones forestales para la producción de servicios ambientales y de materia prima, enfrenta una serie de retos que se deben superar, y como en las plantaciones forestales la biodiversidad es menor que las de los bosques primarios y secundarios, la producción agroforestal es más susceptible al efecto de plagas, patógenos y malezas.

Los expertos en forestería han caracterizado los lugares para establecer plantaciones forestales de acuerdo a un índice de clasificación del sitio en el que se desarrollan, y según Salazar et al. (2011) el aspecto más importante que debe considerarse antes de realizar una inversión a largo plazo es la escogencia adecuada del sitio en el que se desarrollarán la(s) especie(s) forestales. El término calidad de sitio se utiliza para denotar la productividad relativa de un sitio para una especie forestal particular (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación 1985), y la Sociedad de Forestales Americanos (Society of American Foresters. 1958) define “sitio” como un área considerada en términos de sus factores, con referencia a su capacidad de producir bosques u otra vegetación lo que resulta de la combinación de las condiciones bióticas, climáticas y edáficas de un área.

Varios autores (Evans 1979, Drechsel y Zech 1991, Reuter y Robinson 1997) consideran que los resultados del análisis foliar permiten diagnosticar el estado nutricional de los bosques, ya que permite identificar trastornos como excesos o deficiencias, evaluar los programas de fertilización y establecer las condiciones edafoclimáticas óptimas para el desarrollo de las especies forestales. Al relacionar los datos del análisis foliar con datos de rendimiento (p.e. diámetro, altura, área basal, volumen de madera, etc.) se pueden definir los niveles de deficiencia, crítico, óptimo, de consumo de lujo y de toxicidad, para una determinada especie (Pérez et al. 1993, Tomašević et al. 2004, Alvarado et al. 2015). La disponibilidad de los nutrientes para ser absorbidos y acumulados en los árboles es afectada por factores ambientales (BassiriRad 2005). Entender estas relaciones es fundamental para la comprensión de la ecología, el manejo y la producción de especies forestales, ya sea con fines de producción de madera o para producción de servicios ambientales.

En los laboratorios que prestan servicio de análisis de suelos y foliares en el país tales como el Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica (CIA/UCR) y otros privados, no se cuentan con información para la interpretación de los resultados de los análisis foliares para especies de importancia forestal (Bertsch 1987, Meléndez y Molina 2002). Esa información relevante es inexistente con excepción para algunas especies en las que hay publicaciones provisionales por Alvarado et al. (2015) y los datos compilados por investigadores para otras regiones tropicales (Drechsel y Zech 1991, 1993; Reuter y Robinson 1997) que se utilizan para comprender y establecer las condiciones de nutrición mineral idóneas para el desarrollo de dichas especies.

Los estudios relacionados al uso de nutrientes por árboles han ayudado a comprender la distribución espacial de algunas especies (Clozier 1955, Cochrane et al. 1980, Rhoades 1996, Soethe et al. 2008, Fyllas et al. 2009, Quesada et al. 2009, Lugo et al. 2012, Sobrado 2014, Nadeau y Sullivan 2015), trazar la capacidad de hipo- o hiper- acumular dentro de las historias evolutivas de los árboles

(Chenery y Sporne 1976, Kellman 1979, Schlatter y Gerding 1995, Breulmann 1996, Resende et al. 2005, Fernando et al. 2009, Buendchen et al. 2013, Metali et al. 2015), a entender los mecanismos de adaptación a ecosistemas específicos (Kellman 1979, Chapin III 1980, Varanda et al. 2005, Lambers et al. 2006), a identificar las plantas bioindicadoras o biorremediadores de contaminación con metales pesados a nivel urbano (Tomašević et al. 2004) y a comprender los mecanismos envueltos en el reciclaje de nutrimentos (Cannon 1983, Jordan y Herrera 1981, Sarmiento 1984, Bruijnzeel 1991, Montagnini 2000, Ramírez 2007, Peláez et al. 2009, Aponte et al. 2011, Wu et al. 2012, Chávez et al. 2015).

Efecto de las variables ambientales sobre la cobertura vegetal: Mucha de la variación edáfica se asocia con cambios en el relieve y se explica por la producción, deposición y mineralización de biomasa, la cual es mayor en volumen, pero de mineralización más acelerada, en los bosques de zonas bajas y disminuye con la elevación del terreno en donde se descompone más lentamente debido, entre otras causas, a una menor temperatura y actividad microbial y de artrópodos del suelo (Yoda y Kira 1969, Heaney y Proctor 1989, Soethe et al. 2008, Wagai et al. 2011). Lo anterior también se ve afectado por el proceso de sucesión ecológica pues la cobertura vegetal en sus primeras etapas de desarrollo es más exigente en nutrimentos que la de etapas intermedias y clímax (Finegan 1992, Broadbent et al. 2014, Aguilos et al. 2020). Bruijnzeel (1991) separa las plantaciones forestales y bosques secundarios en sus primeras etapas de sucesión con un requerimiento de nutrimentos muy activo, de los bosques primarios y secundarios en etapas de sucesión avanzada que han alcanzado o están cercanos a alcanzar un estado de equilibrio dinámico. La variación del contenido de nutrimentos en el mantillo de los ecosistemas de altura puede verse afectada por el tipo de cobertura forestal que produce residuos con diferente tasa de mineralización y en los Andes Colombianos se menciona aportan más K y Mn bajo pinos y de N y Ca en *A. acuminata* (Cannon 1981, Quichimbo et al. 2020, Lilienfein et al. 2000, Ramírez 2007, León et al. 2009, Pérez et al. 2017).

Análisis de laboratorio:

Preparación y Manipulación de Muestras Foliare: La preparación del material vegetal para las determinaciones analíticas conlleva un procedimiento riguroso de lavado, secado y molienda (Jones Jr et al. 1991, Mills y Jones 1996) y debido a que los tejidos vegetales contienen gran variabilidad en su contenido de agua, las determinaciones se realizan sobre material seco.

Digestión de Muestras Foliare: La determinación de nutrimentos totales en tejidos de plantas se realiza por medio de la digestión de las muestras usando diferentes compuestos químicos. En el presente estudio el laboratorio de suelos y foliars utiliza un aparato de microondas para la digestión de los tejidos de plantas utilizando HNO₃ concentrado. La técnica combina el calentamiento por medio de la emisión

de microondas bajo condiciones de temperatura controlada y el movimiento magnético del HNO_3 dentro de los envases que contienen las muestras. Al estar los contenedores herméticamente cerrados, cuando se aplica energía, la presión dentro del contenedor se incrementa, elevando el punto de ebullición y reduciendo drásticamente el tiempo de digestión. Una de las ventajas más relevantes de esta técnica es el control preciso que se tiene sobre todos los parámetros de digestión, tiempo y temperatura, lo que asegura la reproducibilidad en la digestión de muestras (Jones Jr et al. 1991).

Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma (ICP): “La técnica de espectroscopía de emisión atómica con plasma (ICP-OES) se basa en la vaporización, disociación, ionización y excitación de los diferentes elementos químicos de una muestra en el interior de una llama de plasma. El proceso de atomización ocurre cuando la muestra se introduce a una antorcha junto con el combustible (gas Argón) y se quema a elevada temperatura (aproximadamente $10.000\text{ }^\circ\text{C}$). Las moléculas del analito se rompen totalmente, liberando los elementos químicos en estado atómico, los cuales experimentan fenómenos de emisión de radiación electromagnética en la zona ultravioleta visible. Estas emisiones atómicas, que son características de cada elemento, se separan por medio de espectroscopía en función de su longitud de onda, lo que permite medir su intensidad, la cual será proporcional a la concentración de analito presente en la muestra (Horwitz y Latimer 2006)

Determinación de N en Muestras Foliare por Combustión Seca: Los equipos usados por el LSF para el análisis de N en muestra foliare son los autoanalizadores Elementar Rapid N III y Elementar Vario Macro Cube que se basan en el principio de Combustión Seca de Dumas (Grewal et al. 1991), con el cual se logra la determinación de N de diversas matrices y se calcula un valor de N total. El método se basa en la oxidación de los compuestos orgánicos a 900°C en una atmósfera de oxígeno puro, lo que produce una mezcla gaseosa de dióxido de carbono, monóxido de carbono, agua, N elemental y óxidos de nitrógeno. Después una corriente de gas de arrastre (He) conduce los productos hasta un horno de reacción a temperaturas superiores a 750°C en donde el cobre caliente reduce los óxidos de nitrógeno a N elemental y elimina el oxígeno en forma de óxido de cobre. El gas remanente compuesto por He y nitrógeno pasa a través de una celda detectora con una señal de salida que permite comparar los valores con los de una celda de referencia por la que fluye el He puro, de manera que la diferencia de potencial entre este par de celdas se relaciona con la cantidad de N presente en la muestra. Los beneficios asociados a la determinación de N en analizadores son la exactitud, repetibilidad y reproducibilidad (DeCarteret et al. 2003).

1.3 Objetivo General

Caracterizar la variación del contenido foliar de nutrimentos en muestras provenientes de bosques y plantaciones forestales con énfasis en Costa Rica, con el fin de crear un Cuadro de referencia de los nutrimentos entre especies arbóreas y contribuir con el sistema de diagnóstico de nutrición mineral forestal.

1.4 Objetivos Específicos

Confeccionar una base de registros georeferenciados sobre la concentración foliar de elementos en 197 especies arbóreas con énfasis en especies presentes en Costa Rica, complementada con variables ambientales como altitud, temperaturas máxima, media y mínima, precipitación anual media, zona de vida y la clasificación del suelo a nivel de suborden.

Calcular los rangos intermedios (entre el percentil 25 y 80) de la concentración de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu, B, Al y Na, e identificar contenidos foliares de especies acumuladoras (entre el percentil 80 y 95), hiper- (> percentil 95) y minimalistas o poco demandantes (<percentil 25) de elementos para las especies que posean cinco o más muestras.

Determinar si la fluctuación en la concentración foliar de uno o varios elementos está en función de su clasificación taxonómica, la clasificación de suelo, la altitud, la precipitación media anual, la temperatura y la zona de vida.

1.5 Literatura citada

- Aguilos, R; Marquez, C; Adornado, H; Aguilos, M. 2020. Domesticating commercially important native tree species in the Philippines: early growth performance level. *Forests* 11(8):885.
- Alexander, E. 1973. comparison of forest and savanna soils in northeastern Nicaragua. *Turrialba* 23(2):181-191.
- Alvarado, A; Camacho, G; Fernández, M; Mezger, J; Mata, R; Bertsch, F; Vaides, E. 2015. (Memorias) Interpretación del análisis foliar de varias especies forestales latifoliadas del trópico americano. In (VIII, 2015, San José, Costa Rica). San José, Costa Rica, s.e. p. 68.
- Alvarado, A; Campos, JJ; Herrera, B. 1997. Evaluación del manejo y clasificación de tierras para uso forestal en América Central. *Actas de la III Semana Científica, Turrialba, CR, 3-5 de febrero de 1997, 1997-02-03.*
- Alvarado, A; Mora, A; Chacón, E; Villalobos, JE; Sandí, CL. 2018. Foliar concentration of macro-and micronutrients in four woody legumes from a tropical dry-seasonal forest in Costa Rica. *Revista de Biología Tropical* 66(3):969-983.
- Alvarado, A; Raigosa, J. 2012. Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales. *Agronomía Costarricense* 36:113-115.
- Alvarado, GE; Dengo, C; Martens, U; Bundschuh, J; Aguilar, T; Bonis, SB. 2007. Stratigraphy and geologic history. *Central America: Geology, resources and hazards* 2:345-394.
- Aponte, C; García, LV; Pérez, IM; Gutiérrez, E; Marañón, T. 2011. Oak trees and soil interactions in Mediterranean forests: a positive feedback model. *Journal of vegetation science* 22(5):856-867.
- Arias, D; Calvo, J; Richter, D de B; Dohrenbusch, A. 2011. Productivity, aboveground biomass, nutrient uptake and carbon content in fast-growing tree plantations of native and introduced species in the Southern Region of Costa Rica. *Biomass and bioenergy* 35(5):1779-1788.
- Avellán, M. 2012. Determinación y variación de la concentración foliar de nutrimentos de *Gmelina arborea* Roxb. Tesis Lic. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional de Costa Rica. 87 p.
- Badilla, Y; Murillo, O. 2014. Variación de la concentración foliar de nutrimentos en *Vochysia guatemalensis* JD Smith en plantaciones de la zona norte y caribe de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 11(27):1-6.
- Barber, SA. 1995. *Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach*. 2 ed. New York, USA, John Wiley & Sons. 162 p.
- Barrantes, A; Ugalde, S. 2019. Informe de usos y aportes de la madera en Costa Rica. San José, Costa Rica, Mundo Creativo S.A. 44 p.

- BassiriRad, H. 2005. Nutrient acquisition by plants: an ecological perspective. Berlin, Alemania, Springer Science & Business Media, vol.181. 43-61 p.
- Bertsch, F. 1987. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. 1 ed. San José, Costa Rica, Editorial Universidad de Costa Rica. 78 p.
- _____. 2003. Absorción de nutrimentos por los cultivos. San José, Costa Rica, Asociación costarricense de la ciencia del suelo. 306 p.
- Boardmann, R; Cromer, R; Lambert, M; Webb, M. 1997. Forest plantations. Australia, CSIRO publishing. p. 571.
- Breulmann, G. 1996. Distribution Characteristics of Mineral Elements in Tree Leaves of a Mixed Dipterocarp Forest in Sarawak, Malaysia. *Tropics* 6(1/2):29-38.
- Broadbent, EN; Zambrano, AMA; Asner, GP; Soriano, M; Field, CB; De Souza, HR; Peña-Claros, M; Adams, RI; Dirzo, R; Giles, L. 2014. Integrating stand and soil properties to understand foliar nutrient dynamics during forest succession following slash-and-burn agriculture in the Bolivian Amazon. *PloS one* 9(2):e86042.
- Bruijnzeel, LA. 1991. Nutrient input-output budgets of tropical forest ecosystems: a review. *Journal of Tropical Ecology* :1-24.
- Brussaard, L; De Ruiter, PC; Brown, GG. 2007. Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agriculture, ecosystems & environment* 121(3):233-244.
- Buendchen, M; Boeger, M; Reissmann, CB; da Silva, S. 2013. Nutritional status and nutrient use efficiency in tree species of subtropical forest in southern Brazil. *Scientia Forestalis* 41(98):227-236.
- Caguasango, SM. 2017. Predicción de rendimientos para plantaciones de *Acacia mangium* Willd. en la altillanura plana a partir de variables biofísicas. Tesis M.Sc. Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia. 96 p.
- Caguasango, SM; Cadena, ME. 2012. Modelación de la calidad de índice de sitio-suelo sitio específico mediante criterios de disponibilidad de nutrientes en plantaciones de *Gmelina arborea* y *Pachira quinata* en bosque seco tropical (Zambrano-Bolívar). Tesis Lic. Bogotá, Colombia, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 230 p.
- Camacho, M. 2014. Modelo de absorción de nutrimentos como herramienta para hacer recomendaciones de manejo en plantaciones de *Vochysia guatemalensis* Donn. Tesis Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 103 p.

- Camino, R de; Morales, JP. (2013). Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades. Turrialba, Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 392 p.
- Cannon, P. 1983. Breve historia de la fertilización forestal en el mundo y en Colombia. Cali, Colombia, Smurfit Carton de Colombia. 3-12 p.
- Cannon, PG. 1981. Fertilización de plantaciones con NPR, calfos y borax: resultados al final de cuatro años. Cali, Colombia, Smurfit Carton de Colombia. 10 p.
- Chapin III, FS. 1980. The mineral nutrition of wild plants. Annual review of ecology and systematics 11(1):233-260.
- Chavarría, S; Molina, SA. 2018. ¿Por qué no incrementa el consumo de madera local? El caso de Costa Rica. Revista Forestal Mesoamericana Kurú 15(37):2-14.
- Chávez, BM; González, A; Etchevers, JD; Oyama, K; García, F. 2015. Foliar nutrient resorption constrains soil nutrient transformations under two native oak species in a temperate deciduous forest in Mexico. European Journal of Forest Research 134(5):803-817.
- Chenery, EM; Sporne, KR. 1976. A note on the evolutionary status of aluminium-accumulators among Dicotyledons. New Phytologist 76(3):551-554.
- Clozier, R. 1955. H. Gaussen, Géographie des Plantes, 1954; R. Fouet et Ch. Pomerol, Minerais et terres rares, 1954. L'Information Géographique 19(4):169-170.
- Cochrane, T; Salinas, J; Sanchez, P. 1980. An equation for liming acid mineral soils to compensate crop aluminium tolerance. Tropical Agriculture, Trinidad and Tobago 57(2):133-140.
- Condit, R; Aguilar, S; Pérez, R. 2020. Trees of Panama: A complete checklist with every geographic range. Forest Ecosystems 7(1):1-13.
- Cornelius, JP; Mesen, J. 1997. Provenance and family variation in growth rate, stem straightness, and foliar mineral concentration in *Vochysia guatemalensis*. Canadian Journal of Forest Research 27(7):1103-1109.
- DeCarteret, SS; Jones, SO; Focht, KJ; Loo, JF; Parker, DT. (2003). Optimization of a Commercially Available Chemiluminescence Analyzer for Low Level NOx Measurement. s.l., SAE Technical Paper.
- Denevan, WM. 1961. The upland Pine forests of Nicaragua. A study in cultural plant geography. University of California Publications in Geography, Berkeley and Los Angeles 12(4):251-320.
- Dick, CW; Pennington, RT. 2019. History and geography of Neotropical tree diversity. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 50:279-301.

- Drechsel, P; Zech, W. 1991. Foliar nutrient levels of broad-leaved tropical trees: a tabular review. *Plant and soil* 131(1):29-46.
- _____. 1991. Foliar nutrient levels of broad-leaved tropical trees: a tabular review. *Plant and soil* 131(1):29-46.
- Drechsel, P; Zech, W. 1993. Mineral nutrition of tropical trees. *Tropical forestry handbook* 1:515-567.
- Escobar, M; Ortiz, J; López, F. 1993. Diagnóstico de daños nutricionales en cuatro especies forestales empleadas en reforestación. Medellín, Colombia, INDERENA. 88 p.
- Evans, J. 1979. The effects of leaf position and leaf age in foliar analysis of *Gmelina arborea*. *Plant and soil* 52(4):547-552.
- FAO. 2016. State of the world's forests 2016. 1 ed. Rome, Italy, Food and Agriculture Organization. 120 p.
- _____. 2020. Servicios ecosistémicos y biodiversidad (en línea, sitio web). Consultado 20 jul. 2020. Disponible en <http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/es/>.
- Fernando, DR; Guymer, G; Reeves, RD; Woodrow, IE; Baker, AJ; Batianoff, GN. 2009. Foliar Mn accumulation in eastern Australian herbarium specimens: prospecting for 'new' Mn hyperaccumulators and potential applications in taxonomy. *Annals of Botany* 103(6):931-939.
- Finegan, B. 1992. The management potential of neotropical secondary lowland rain forest. *Forest ecology and management* 47(1-4):295-321.
- Frankie, GW; Baker, HG; Opler, PA. 1974. *Tropical plant phenology: applications for studies in community ecology*. s.l., Springer. p. 287-296.
- Fyllas, NM; Patino, S; Baker, T; Bielefeld, G; Martinelli, L; Quesada, C; Paiva, R; Schwarz, M; Horna, V; Mercado, L. 2009. Basin-wide variations in foliar properties of Amazonian forest: phylogeny, soils and climate. *Biogeosciences* 6:2677-2708.
- Gillespie, TW; Grijalva, A; Farris, CN. 2000. Diversity, composition, and structure of tropical dry forests in Central America. *Plant ecology* 147(1):37-47.
- Gotlieb, Y; Pérez, PM; Hidalgo, H; Alfaro, E. 2019. The Central American Dry Corridor: A consensus statement and its background. *Rev. Yu'am* 3:42-51.
- Grewal, K; Buchan, G; Sherlock, R. 1991. A comparison of three methods of organic carbon determination in some New Zealand soils. *Journal of Soil Science* 42(2):251-257.
- Griscom, HP; Ashton, MS. 2011. Restoration of dry tropical forests in Central America: a review of pattern and process. *Forest Ecology and Management* 261(10):1564-1579.
- Grubb, P. 1977. Control of forest growth and distribution on wet tropical mountains: with special reference to mineral nutrition. *Annual Review of Ecology and Systematics* 8(1):83-107.

- Hall, C; Brignoli, HP; Cotter, JV. 2003. Historical Atlas of Central America. Oklahoma, USA, University of Oklahoma Press. 336 p.
- Hallsworth, EG. 1982. Socio economic effects and constraints in tropical forest management. Sussex, Inglaterra, Science Policy Research Unit. 233 p.
- Heaney, A; Proctor, J. 1989. Chemical elements in litter in forests on Volcán Barva, Costa Rica. The British Ecological Society 9:255-271.
- Herrera, B; Finegan, B. 1997. Substrate conditions, foliar nutrients and the distributions of two canopy tree species in a Costa Rican secondary rain forest. Plant and Soil 191(2):259-267.
- Holdridge, LR; Grenke, WC. 1971. Forest environments in tropical life zones: a pilot study. Oxford, UK, Pergamon Press. 741 p.
- Horn, N; Montagnini, F. 1999. Litterfall, litter decomposition and maize bioassay of mulches from four indigenous tree species in mixed and monospecific plantations in Costa Rica. International Tree Crops Journal 10(1):37-50.
- Horwitz, W; Latimer, G. 2006. Official methods of analysis of AOAC International, 2000. 18 ed. Maryland, USA, AOAC International.
- Janzen, DH. 1988. Biodiversity. Washington, USA, National Academy of Sciences. p. 130-137.
- Jeffrey, H; Budowski, G. 1986. Recursos naturales y desarrollo economico en America Central: un perfil ambiental regional. San José, Costa Rica, Centro Nacional de Información y Documentación Agropecuaria. 29. p.
- Jones Jr, JB; Wolf, B; Mills, HA. 1991. Plant analysis handbook. A practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide. Georgia, USA, Micro-Macro Publishing, Inc. 213 p.
- Jordan, CF; Herrera, R. 1981. Tropical rain forests: are nutrients really critical? The American Naturalist 117(2):167-180.
- K Yoda; Kira, T. 1969. Comparative Ecological Studies on Three Main Types of Forest Vegetation in Thailand. 5. Accumulation and Turnover of Soil Organic Matter with Notes on the Altitudinal Soil Sequence in Khao (Mt.) Luang, Peninsular Thailand. Nature and Life in Southeast Asia 6:88-110.
- Kappelle, M. 2005. Hacia una breve descripción del concepto “páramo”. Páramos de Costa Rica 28:29-36.
- Kappelle, M; van Uffelen, J-G. 2006. Altitudinal zonation of montane oak forests along climate and soil gradients in Costa Rica. Berlin, Alemania, Springer, vol.185. p. 39-54.
- Karmalkar, AV; Bradley, RS; Diaz, HF. 2011. Climate change in Central America and Mexico: regional climate model validation and climate change projections. Climate dynamics 37(3-4):605.

- Kellman, M. 1979. Soil enrichment by neotropical savanna trees. *The Journal of Ecology* 67:565-577.
- Lambers, H; Shane, MW; Cramer, MD; Pearse, SJ; Veneklaas, EJ. 2006. Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: matching morphological and physiological traits. *Annals of botany* 98(4):693-713.
- León, JD; González, MI; Gallardo, JF. 2009. Reallocation and nutrient use efficiency in Antioquia central forests. *Colombia Forestal* 12(1):119-140.
- Lieberman, D; Lieberman, M; Hartshorn, G; Peralta, R. 1985. Growth rates and age-size relationships of tropical wet forest trees in Costa Rica. *Journal of tropical Ecology* :97-109.
- Lieberman, M; Lieberman, D; Hartshorn, GS; Peralta, R. 1985. Small-scale altitudinal variation in lowland wet tropical forest vegetation. *The journal of ecology* :505-516.
- Lilienfein, J; Wilcke, W; Ayarza, MA; Vilela, L; do Carmo Lima, S; Zech, W. 2000. Soil acidification in *Pinus caribaea* forests on Brazilian savanna Oxisols. *Forest ecology and management* 128(3):145-157.
- Lloyd, J. 1963. Historia tectónica del orógeno sur centroamericano. *Instituto geográfico nacional* 1:67-96.
- Lugo, AE; Martínez, OA; da Silva, JF. 2012. Aboveground biomass, wood volume, nutrient stocks and leaf litter in novel forests compared to native forests and tree plantations in Puerto Rico. *Bois et Forets des Tropiques*. 314 (4): 7-16.
- Maathuis, FJ. 2013. *Plant mineral nutrients: methods and protocols*. York, Inglaterra, Humana Press. 297 p.
- Maldonado, T; Rutgersson, A; Alfaro, E; Amador, J; Claremar, B. 2016. Interannual variability of the midsummer drought in Central America and the connection with sea surface temperatures. *Advances in Geosciences* 42:35-50.
- Marschner, H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants*. Institute of Plant Nutrition, University of Hohenheim. London, Inglaterra, Academic Press. 892 p.
- Meléndez, G; Molina, E. 2002. *Fertilización foliar: principios y aplicaciones*. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 125 p.
- Metali, F; Abu Salim, K; Tennakoon, K; Burslem, DF. 2015. Controls on foliar nutrient and aluminium concentrations in a tropical tree flora: phylogeny, soil chemistry and interactions among elements. *New Phytologist* 205(1):280-292.
- Mills, H; Jones, JB. 1996. *Plant analysis handbook II*. Micro.

- Mollinedo García, MS. 2003. Relación suelo-planta, factores de sitio y respuesta a la fertilización, en plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis* L. f.), en la zona Oeste, Cuenca del canal de Panamá. Tesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 89 p.
- Montagnini, F. 2000. (Memorias) Ciclaje de nutrimentos en plantaciones con especies puras y mixtas en región de bosque húmedo tropical. In Consejo Nacional de Rectores. San José, Costa Rica, Oficina de Planificación de la Educación Superior. p. 17-24.
- Montenegro, E. 2005. Efecto del aporte de nutrientes de la biomasa de tres tipos de árboles de sombra en sistemas de manejo de café orgánico y convencional. Tesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 67 p.
- Montero, M; Kanninen, M. 2006. Variación de los nutrimentos foliares con la edad de los árboles de *Tectona grandis* Lf. Tesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica, Universidad de Helsinki/ CATIE. 16 p.
- Murphy, P; Lugo, AE. 1986. Ecology of tropical dry forest. Annual Review of Ecology and Systematics 17:67-88.
- Myers, N. 1981. The hamburger connection: how Central America's forests become North America's hamburgers. Ambio (Suecia) v. 10 (1) p. 3-8.
- Nadeau, MB; Sullivan, TP. 2015. Relationships between plant biodiversity and soil fertility in a mature tropical forest, Costa Rica. International Journal of Forestry Research 2015(32946):13.
- Negi, M; Tandon, Y; Rawat, H. 1995. Biomass and nutrient distribution in young teak (*Tectona grandis* Linn. f) plantations in Tarai region of Uttar Pradesh. Indian Forester 121(6):455-464.
- Nichols, JD; Gillespie, AR; Richter, DD. 1997. Growth, foliar and nutrient status of Terminalia amazonia planted in southwestern Costa Rica. Journal of Tropical Forest Science 10(2):233-248.
- Nwoboshi, LC. 1983. Growth and nutrient requirements in a teak plantation age series in Nigeria. I. Linear growth and biomass production. Forest Science 29(1):159-165.
- _____. 1984. Growth and nutrient requirements in a teak plantation age series in Nigeria. II. Nutrient accumulation and minimum annual requirements. Forest Science 30(1):35-40.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 1985. El estado mundial de la agricultura y la alimentación: políticas y cuestiones agrícolas. Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Osborne, PL. 2000. Tropical ecosystems and ecological concepts. Cambridge, UK, Cambridge University Press. 448 p.
- Paniagua, A. 2005. (Memorias). Respuesta de *Cedrela odorata* a dosis crecientes de carbonato de calcio y P₂O₅ en un Fluventic Dystropept en invernadero. In (I, 2004, Heredia, Costa Rica). Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional, INISEFOR. p. 11.

- Peláez, JL; Hernández, MG; Lancho, JG. 2009. Retranslocación y eficiencia en el uso de nutrientes en bosques del centro de Antioquia. *Colombia forestal* 12(1):119-140.
- Pérez, ÁM; Martínez, YV; Polanía, J. 2017. Propiedades edáficas de bosques y potreros en recuperación de dos reservas naturales en Zapatoca (Santander). *Suelos Ecuatoriales* 47(1 y 2):25-37.
- Pérez, J; Bornemisza, E; Sollins, P. 1993. Identificación de especies forestales acumuladoras de aluminio en una plantación forestal experimental ubicada en Sarapiquí, Costa Rica. *Agronomía Costarricense (Costa Rica)* v. 17 (2) p. 99-103.
- Pérez, MR; Fernández, CG; Sayer, JA. 2007. Los servicios ambientales de los bosques. *Revista Ecosistemas* 16(3).
- Perry, JP. 1991. *The pines of Mexico and central America*. s.l., Timber Press, Inc.
- Piperno, DR; Pearsall, DM. 1998. *The origins of agriculture in the lowland Neotropics*. s.l., s.e.
- Portuguez, EM. 2012. Estimación de la extracción de nutrimentos por parte aérea en plantaciones de teca (*Tectona grandis* Linn. f.) de las empresas Panamerican Woods y CYM Investment Group Ltda. en la península de Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. Tesis M.Sc. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 92 p.
- Quesada, C; Lloyd, J; Schwarz, M; Baker, T; Phillips, OL; Patiño, S; Czimczik, C; Hodnett, M; Herrera, R; Arneeth, A. 2009. Regional and large-scale patterns in Amazon forest structure and function are mediated by variations in soil physical and chemical properties. *Biogeosciences Discussion* 6:3993-4057.
- Quesada, LE; Calvo, OD; Hidalgo, HG; Perez, PM; Alfaro, EJ. 2019. Dynamical delimitation of the Central American Dry Corridor (CADC) using drought indices and aridity values. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 43(5):627-642.
- Quichimbo, P; Jiménez, L; Veintimilla, D; Potthast, K; Tischer, A; Günter, S; Mosandl, R; Hamer, U. 2020. Nutrient dynamics in an Andean forest region: a case study of exotic and native species plantations in southern Ecuador. *New Forests* 51(2):313-334.
- Ramírez, D. 2014. Estimación de la absorción de nutrimentos de cedro amargo (*Cedrela odorata* L.) como mecanismo de diagnóstico para mejorar las recomendaciones de manejo sostenible de la especie en plantaciones de pequeños agricultores del Programa Forestal de CoopeAgri RL, Costa Rica. Tesis Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 81 p.
- Ramírez, JA. 2007. Caída de hojarasca y retorno de nutrientes en bosques montanos andinos de Piedras Blancas, Antioquia, Colombia.
- Republica de Costa Rica. 1996. Ley forestal N° 7575. Art. 3. Gaceta No 72 Alcance: 21. Costa Rica. 16 Abr 1996. s.l., s.e. 28. p.

- Resende, AV; Furtini, AE; Curi, N. 2005. Mineral nutrition and fertilization of native tree species in Brazil: research progress and suggestions for management. *Journal of Sustainable Forestry* 20(2):45-81.
- Reuter, D; Robinson, JB. 1997. *Plant analysis: an interpretation manual*. 2 ed. Australia, CSIRO publishing. 571 p.
- Rhoades, C. 1996. Single-tree influences on soil properties in agroforestry: lessons from natural forest and savanna ecosystems. *Agroforestry systems* 35(1):71-94.
- Rodriguez, C; Miguel, C; Subramaniam, P. 1984. Seasonal fluctuations of the mineral concentration of alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) from the field. *Plant and Soil* 78(1-2):201-208.
- Rodríguez, J; Álvarez, J. 2010. *Nutrición y fertilización de las plantaciones forestales*. Santiago, Chile, Gráfica LOM. 521 p.
- Sader, SA; Joyce, AT. 1988. Deforestation rates and trends in Costa Rica, 1940 to 1983. *Biotropica* 20(1):11-19.
- Salazar, M; Cabalceta, G; Alvarado, A; Segura, M; Castillo, Á. 2011. Efecto de la adición de cal a plantaciones de jaúl (*Alnus acuminata*) en andisoles de la cuenca alta del río Virilla, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 35(1):147-161.
- Sánchez, A; Foley, S; Hamilton, S; Calvo, JC; Arroyo, P; Jiménez, V. 2002. Estudio de cobertura forestal de Costa Rica con imágenes landsat tm 7 para el año 2000. San José, Costa Rica, Centro Científico Tropical.
- Sarmiento, G. 1984. *The ecology of neotropical savannas*. USA, Harvard University Press. 241 p.
- Scatena, FN. 2002. El bosque neotropical desde una perspectiva jerárquica. *Ecología y conservación de bosques neotropicales*. LUR, Cartago, Costa Rica :23-41.
- Schlatter, JE; Gerding, V. 1995. Método de clasificación de sitios para la producción forestal, ejemplo en Chile. *Bosque* 16(2):13-20.
- Segura, JM; Castillo, A; Alvarado, A; Blanco, FA. 2006. Variación del contenido foliar de nutrimentos de *Alnus acuminata*. Variability of the foliar nutrient concentration of *Alnus acuminata*. *Agronomía Costarricense*. 30(1):53-63.
- Shaanker, RU; Ganeshiah, K; Rao, MN. 2001. Genetic diversity of medicinal plant species in deciduous forest of South India: impact of harvesting and other anthropogenic pressures. *Journal of plant biology* 28(1):91-98.
- SINAC, R-C-G. 2015. Inventario Forestal Nacional de Costa Rica 2014-2015 (en línea, sitio web). Disponible en https://www.sirefor.go.cr/pdfs/INF_CostaRica_ParaWeb.pdf.

- Sobrado, M. 2014. Relationship between leaf micro-and macro-nutrients in top canopy trees in a mixed forest in the upper Rio Negro in the Amazon region. *American Journal of Plant Sciences* 5(10):1423.
- Society of American Foresters. 1958. *Forestry Terminology: A Glossary of Technical Terms Used in Forestry*. 3 ed. Washington DC, USA, Society of American foresters. 97 p.
- Soethe, N; Lehmann, J; Engels, C. 2008. Nutrient availability at different altitudes in a tropical montane forest in Ecuador. *Journal of Tropical Ecology* 24(4):397-406.
- Stan, K; Sanchez, A. 2019. Deforestation and secondary growth in Costa Rica along the path of development. *Regional Environmental Change* 19(2):587-597.
- Strauss, S; Bazzaz, F. 1991. Plasticity and acclimation to light in tropical Moraceae of different successional positions. *Oecologia* 87(3):377-387.
- Stuhrmann, M; Bergmann, C; Zech, W. 1994. Mineral nutrition, soil factors and growth rates of *Gmelina arborea* plantations in the humid lowlands of northern Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 70(1-3):135-145.
- Tinker, PB; Nye, PH. 2000. *Solute movement in the rhizosphere*. New York, USA, Oxford University Press. 443 p.
- Tomašević, M; Rajšić, S; Đorđević, D; Tasić, M; Krstić, J; Novaković, V. 2004. Heavy metals accumulation in tree leaves from urban areas. *Environmental Chemistry Letters* 2(3):151-154.
- Vaides, EE. 2004. Características de sitio que determinan el crecimiento y productividad de teca (*Tectona grandis* LF), en plantaciones forestales de diferentes regiones en Guatemala. Tesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 68 p.
- Varanda, E; BAROSELA JR, O; PAIS, M; CERRI, A. 2005. Defesas vegetais contra insetos folívoros. O Cerrado pé-de-gigante, ecologia & conservação. São Paulo: secretaria do Meio Ambiente :195-208.
- Wagai, R; Kitayama, K; Satomura, T; Fujinuma, R; Balsler, T. 2011. Interactive influences of climate and parent material on soil microbial community structure in Bornean tropical forest ecosystems. *Ecological Research* 26(3):627-636.
- Wake, DB. 1987. Adaptive radiation of salamanders in Middle American cloud forests. *Annals of the Missouri Botanical Garden* :242-264.
- Wu, T; Dong, Y; Yu, M; Wang, GG; Zeng, D-H. 2012. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Quercus* species across China. *Forest Ecology and Management* 284:116-123.

CAPÍTULO II

El análisis foliar como herramienta de diagnóstico en especies arbóreas latifoliadas del neotrópico: base de datos

2.1 Resumen

Debido al aumento en la concientización sobre la importancia de los bosques y proyectos de reforestación y a los esfuerzos por aumentar las áreas del país cubiertas por bosque, los estudios para la comprensión y el diagnóstico nutricional de especies forestales han aumentado. La mayoría de estudios de nutrición mineral de árboles se han realizado en especies de interés comercial y algunos en especies nativas de Costa Rica y del mundo tropical. En los artículos científicos normalmente los resultados deben presentarse por medio del análisis sistemático de los datos que permita resumirlos, lo que provoca que las bases de datos de los experimentos no queden disponibles de manera inmediata para otros investigadores, y peor aún, la valiosa información queda aislada lo que impide su comparación por métodos numéricos.

Una base de datos de la concentración foliar de nutrientes de las especies forestales que tiene nuestro país, permitiría comprender las necesidades nutricionales de los bosques y establecer las diferencias y similitudes en cuanto al uso de nutrientes por los árboles. Por lo tanto, se requiere de la compilación de información que contenga registros de la concentración foliar de nutrientes en árboles de distintas especies y de los factores edafoclimáticos bajo los cuales se desarrolla cada especie. El objetivo de esta investigación es proporcionar una base de registros georeferenciados sobre la concentración foliar de elementos en 197 especies arbóreas endémicas de América Latina con énfasis en Costa Rica, complementada con variables ambientales de las localidades en donde fueron recolectadas.

La base de datos reunió un total de 3.559 registros de muestras provenientes de bosques y plantaciones forestales principalmente de Costa Rica, las cuales representan un total de 197 especies forestales, 145 géneros, 61 familias y 29 órdenes. Cada registro geo-referenciado cuenta con la información sobre la concentración foliar (%) de N, P, K, Ca, Mg, S, y la concentración foliar (mg kg^{-1}) de Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo, Na y Al. Además, posee información de variables ambientales como altitud, temperatura ambiente anual máxima, media y mínima, precipitación anual media, zona de vida y la clasificación del suelo a nivel de suborden de los sitios donde se encuentran los árboles muestreados disponible en la siguiente dirección electrónica

http://agro.ucr.ac.cr/Bases_de_datos_agronomia_2021/Alfredo_Alvarado/

2.2 Introducción

Los ecosistemas boscosos son de vital importancia para sustentar la vida en la tierra. Estos ecosistemas son los más diversos de la biosfera y brindan variados servicios como el filtrado del agua, conservación de la biodiversidad, producción de oxígeno, secuestro de carbono, y mantenimiento de la salud del suelo (Daily 1997, Coomes y Burt 2001, World Health Organization 2005, Ortega 2012, Avilés y Chaparro 2010).

Debido al valor económico de la madera por su utilidad como materia prima y fuente de energía y por el cambio de uso de las tierras destinadas para ganadería (Rosero-Bixby y Palloni 1998), los bosques del mundo se encuentra en constante amenaza. Aun así, según la FAO (FAO 2016) en Costa Rica se ha logrado revertir la deforestación que se llegó a dar en los años 80, aunque actualmente por razones socioeconómicas, la reforestación se ha reducido al cerrarse algunos programas públicos y privados (Barrantes y Ugalde 2019, Calvo et al. 1999).

Para la conservación y regeneración de las áreas forestales y los bosques, es indispensable contar con herramientas que permitan caracterizar la condición fisiológica y la salud de estas especies. En este sentido las hojas como órganos que llevan a cabo gran cantidad de las reacciones bioquímicas que las plantas realizan se pueden utilizar indicadores sensibles a los cambios ambientales que las afectan (Van den Driessche 1974). Por lo tanto, los análisis de concentración foliar de elementos son una herramienta que permite obtener una gran cantidad de información de las plantas y el ambiente en que se desarrollan.

Los estudios que se han hecho para comprender las condiciones idóneas de nutrición mineral para el desarrollo de algunas especies forestales y el conocimiento sobre la variación de la concentración foliar entre especies arbóreas tropicales son pocos y para muchas especies nulo. Sobre este tema, a nivel mundial sobresalen los trabajos de Drechsel y Zech (1991, 1993), Boardmann et al. (1997) Mollinedo García (2003), Vaides López (2004), Segura et al. (2005 y 2006), Portuguez Umaña (2012), Avellán (2012), Caguasango y Cadena (2012), Fernández et al. (2013), Ramírez (2014), Caguasango (2017) y Alvarado et al. (2018). Sin embargo, a pesar de que estos trabajos representan un gran esfuerzo, cuando se comparan con la diversidad forestal nacional (SINAC 2015), aportan relativamente poca información. En adición, en la mayoría de los casos los datos disponibles son resúmenes estadísticos, lo esto evita que los lectores puedan obtener la información cruda atrás de cada trabajo, la cual es de gran utilidad para investigaciones futuras.

En la actualidad la bioinformática permite una capacidad casi infinita de análisis de información, lo que aumenta la relevancia de conservar las bases de datos ordenada sistemáticamente, que pueda

funcionar como fuente de consulta de libre acceso y fácil manipular por otros usuarios (Date 2001). Una base de datos de la concentración foliar de nutrimentos de las especies forestales que tiene nuestro país, permitiría comprender las necesidades nutricionales de los bosques y establecer las diferencias y similitudes en cuanto al uso de nutrimentos por los árboles. Debido a la importancia de la nutrición mineral de los bosques y plantaciones forestales tropicales (Alvarado et al. 2015), surge la necesidad de la compilación de una base de datos que contenga la concentración foliar de nutrimentos en árboles de distintas especies y los factores edafoclimáticos bajo los cuales se desarrolla cada especie.

El objetivo de esta investigación es proporcionar una base de registros georeferenciados sobre la concentración foliar de elementos en 197 especies arbóreas endémicas de América Latina con énfasis en Costa Rica, alimentada con variables ambientales como altitud, temperaturas ambientales anuales máxima, media y mínima, precipitación anual media, zona de vida y la clasificación del suelo a nivel de suborden.

2.3 Materiales y métodos

La recolección de muestras foliares de especies forestales para su análisis químico, y la conservación digital de los datos la inició el Dr. Alfredo Alvarado, quién trabaja con suelos y especies forestales desde la década de los 90 (Alvarado y Soto 1995, Alvarado et al. 1997, Vásquez et al. 1996). La información incluida en la base de datos inicial del presente proyecto se generó en trabajos de graduación dirigidos por el Dr. Alvarado, incluyendo los generados por Mollinedo García (2003), Vaides López (2004), Segura et al. (2005, 2006), Avellán (2012), Portuguez (2012), Fernández et al. (2013) y Ramírez (2014). De manera paralela algunas empresas nacionales e internacionales contribuyeron con material foliar o prestaron sus plantaciones para ampliar la base de datos en México, Guatemala, Panamá y Colombia (Figura 2.2). Mucha de la información obtenida sobre las especies nativas, fue suministrada por el Dr. Eduardo Chacón a partir del proyecto “Controles climáticos y paisajísticos de la biodiversidad como procesos del ecosistema en los bosques tropicales muy húmedos del suroeste de Costa Rica” y por el Dr. William Fonseca y colaboradores en el proyecto “Construcción de Funciones Alométricas para Costa Rica en el Contexto del Proyecto de Protección Ambiental a través de la Protección de los Bosques de Centro América”.

Para el ingreso de los datos en la base de datos, estos debían cumplir con requisitos que aseguran su calidad y que permitiera estandarizarlos. Los datos debían provenir de proyectos de graduación o de investigación y las muestras debían estar clasificadas a nivel de especie y provenir de árboles mayores a tres años. Idealmente el registro debía estar georreferenciado o localizado geográficamente de manera que se pudieran extraer otro tipo de información con estas coordenadas. Las variables incluidas dentro de la base de datos son clasificación taxonómica de cada árbol a nivel de orden, familia, género y especie, el nombre común, el país, la localidad y las coordenadas geográficas del lugar donde proviene la muestra, la concentración foliar (%) de Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio, Azufre, y de los elementos traza (mg kg^{-1}) Hierro, Manganeso, Cobre, Zinc, Boro, Molibdeno, Sodio y Aluminio. Además, posee datos de clasificación de suelo a nivel de suborden, datos de clima como temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$) máxima, media y mínima diaria anual, precipitación media anual (mm), días de lluvia, zona de vida, cantidad de meses secos al año y la altitud (msnm).

Para la presentación de la base de datos se realizarán histogramas de frecuencias y resúmenes de estadística descriptiva con los datos de la cantidad de individuos, promedios, desviaciones y errores estándar, mediana, máximos, mínimos, rangos y tendencias por elemento y por especie.

2.4 Resultados

La base de datos se encuentra disponible

[http://agro.ucr.ac.cr/Bases de datos agronomia 2021/Alfredo Alvarado/](http://agro.ucr.ac.cr/Bases_de_datos_agronomia_2021/Alfredo_Alvarado/),

en la que se reúne un total de 3.559 registros de árboles representativos de un total de 196 especies, 145 géneros, 61 familias y 29 órdenes (Cuadro 2.1), que además incluye la cantidad de especies y el número de registros por especie. En la Figura 2.1 se observa un mapa con la localización de los árboles los 3.117 árboles georreferenciados en Costa Rica.

Cuadro 2.1. Lista de especies que se incluyen en la base de datos, el número entre paréntesis ubicado a la derecha del nombre científico indica el número de repeticiones por especie (n).

#	Nombre Científico (n)	#	Nombre Científico (n)	#	Nombre Científico (n)	#	Nombre Científico (n)
1	<i>Albizia guachapele</i> (6)	50	<i>Cordia liesneri</i> (9)	99	<i>Inga skutchii</i> (10)	148	<i>Psychotria</i> sp (2)
2	<i>Albizia niopoides</i> (1)	51	<i>Cordia megalantha</i> (10)	100	<i>Inga spectabilis</i> (8)	149	<i>Pterocarpus</i> sp (1)
3	<i>Albizia saman</i> (17)	52	<i>Cornus disciflora</i> (2)	101	<i>Iriartea deltoidea</i> (3)	150	<i>Quassia amara</i> (1)
4	<i>Alfaroa costaricensis</i> (2)	53	<i>Croton smithianus</i> (4)	102	<i>Jacaranda copaia</i> (3)	151	<i>Quercus costaricensis</i> (11)
5	<i>Allophylus racemosus</i> (1)	54	<i>Cupania guatemalensis</i> (2)	103	<i>Lacistema aggregatum</i> (2)	152	<i>Quercus oleoides</i> (2)
6	<i>Alnus acuminata</i> (300)	55	<i>Curatella americana</i> (1)	104	<i>Laetia procera</i> (2)	153	<i>Quercus seemanii</i> (2)
7	<i>Amaioua corymbosa</i> (2)	56	<i>Cyathea</i> sp (2)	105	<i>Laguncularia racemosa</i> (2)	154	<i>Rehdera trinervis</i> (7)
8	<i>Anacardium excelsum</i> (6)	57	<i>Dalbergia retusa</i> (55)	106	<i>Leptolobium panamense</i> (2)	155	<i>Reinhardtia gracilis</i> (3)
9	<i>Andira inermis</i> (2)	58	<i>Dendropanax arboreus</i> (14)	107	<i>Licania comiculata</i> (9)	156	<i>Reinhardtia simplex</i> (3)
10	<i>Apeiba tibourbou</i> (2)	59	<i>Dendropanax ravenii</i> (10)	108	<i>Lohocarpus minimifolius</i> (6)	157	<i>Rhizophora mangle</i> (1)
11	<i>Ardisia compressa</i> (9)	60	<i>Desmoncus moorei</i> (2)	109	<i>Luehea candida</i> (3)	158	<i>Rhizophora racemosa</i> (2)
12	<i>Ardisia dunlapiana</i> (10)	61	<i>Dialium guianense</i> (1)	110	<i>Luehea speciosa</i> (1)	159	<i>Roupala montana</i> (2)
13	<i>Asterogyne martiana</i> (9)	62	<i>Diphysa americana</i> (4)	111	<i>Manilkara bidentata</i> (1)	160	<i>Rudgea</i> sp (1)
14	<i>Astrocaryum confertum</i> (2)	63	<i>Dipteryx oleifera</i> (38)	112	<i>Meliosma</i> (3)	161	<i>Sapium allenii</i> (10)
15	<i>Astronium graveolens</i> (7)	64	<i>Drimys granadensis</i> (1)	113	<i>Miconia argentea</i> (1)	162	<i>Sapium glandulosum</i> (10)
16	<i>Avicennia</i> sp (1)	65	<i>Elaeis guineensis</i> (271)	114	<i>Miconia dissitineria</i> (10)	163	<i>Schizolobium parahyba</i> (48)
17	<i>Bactris caudata</i> (5)	66	<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (14)	115	<i>Miconia donaeana</i> (10)	164	<i>Semialarium mexicanum</i> (2)
18	<i>Bactris gasipaes</i> (566)	67	<i>Eugenia xalapensis</i> (2)	116	<i>Miconia osaensis</i> (10)	165	<i>Simarouba amara</i> (3)
19	<i>Bactris gracilior</i> (5)	68	<i>Euterpe precatoria</i> (17)	117	<i>Miconia punctata</i> (1)	166	<i>Sorocea</i> sp (1)
20	<i>Bactris hondurensis</i> (6)	69	<i>Faramea occidentalis</i> (10)	118	<i>Miconia trinervia</i> (10)	167	<i>Spondias mombin</i> (1)
21	<i>Billia rosea</i> (1)	70	<i>Faramea permagnifolia</i> (11)	119	<i>Minquartia guianensis</i> (7)	168	<i>Spondias purpurea</i> (1)
22	<i>Blakea</i> sp (3)	71	<i>Garcinia intermedia</i> (5)	120	<i>Mora oleifera</i> (1)	169	<i>Stemmadenia</i> sp (2)
23	<i>Bravaisia integerrima</i> (1)	72	<i>Garcinia madruno</i> (11)	121	<i>Mouriri gleasoniana</i> (5)	170	<i>Styrax argentea</i> (2)
24	<i>Brosimum</i> sp (6)	73	<i>Garcinia magnifolia</i> (10)	122	<i>Mouriri tuberculata</i> (2)	171	<i>Swietenia macrophylla</i> (65)
25	<i>Bursera simaruba</i> (6)	74	<i>Genipa americana</i> (1)	123	<i>Ocotea mollifolia</i> (10)	172	<i>Symphonia globulifera</i> (1)
26	<i>Byrsonima crassifolia</i> (1)	75	<i>Geonoma congesta</i> (13)	124	<i>Ocotea rivularis</i> (9)	173	<i>Synechanthus warszewiczianus</i> (6)
27	<i>Caesalpinia eriostachys</i> (4)	76	<i>Geonoma cuneata</i> (18)	125	<i>Otoba novogranatensis</i> (1)	174	<i>Tabebuia ochracea</i> (7)
28	<i>Calophyllum brasiliense</i> (40)	77	<i>Geonoma deversa</i> (8)	126	<i>Ouatea osaensis</i> (1)	175	<i>Tabebuia rosea</i> (9)
29	<i>Carapa guianensis</i> (3)	78	<i>Geonoma interrupta</i> (6)	127	<i>Ouatea rinconensis</i> (1)	176	<i>Tectona grandis</i> (371)
30	<i>Carapa nicaraguensis</i> (9)	79	<i>Geonoma longevaginata</i> (5)	128	<i>Pachira quinata</i> (93)	177	<i>Terminalia amazonia</i> (1)
31	<i>Casearia aculeata</i> (1)	80	<i>Gliricidia septium</i> (2)	129	<i>Palicourea</i> sp (1)	178	<i>Terminalia oblonga</i> (52)
32	<i>Casearia arborea</i> (3)	81	<i>Gmelina arborea</i> (214)	130	<i>Pausandra</i> sp (2)	179	<i>Tetragastris panamensis</i> (1)
33	<i>Cassia grandis</i> (6)	82	<i>Godmania aesculifolia</i> (1)	131	<i>Pelliciera rhizophorae</i> (3)	180	<i>Tetrathylacium johansenii</i> (1)
34	<i>Cassia moschata</i> (2)	83	<i>Goethalsia meiantha</i> (1)	132	<i>Pentaclethra macroloba</i> (8)	181	<i>Thouinidium decandrum</i> (1)
35	<i>Cecropia peltata</i> (3)	84	<i>Guaiacum sanctum</i> (2)	133	<i>Persea americana</i> (111)	182	<i>Trichilia pitieri</i> (3)
36	<i>Cedrela odorata</i> (65)	85	<i>Guarea</i> sp (3)	134	<i>Pilocarpus</i> sp (2)	183	<i>Trichillia martiana</i> (1)
37	<i>Chamaedorea deckeriana</i> (6)	86	<i>Guatteria amplifolia</i> (10)	135	<i>Piper</i> sp (3)	184	<i>Ulmus mexicana</i> (1)
38	<i>Chamaedorea pinnatifrons</i> (5)	87	<i>Guatteria chiriquiensis</i> (9)	136	<i>Platymiscium</i> (8)	185	<i>Unonopsis osae</i> (9)
39	<i>Chamaedorea tepejilote</i> (6)	88	<i>Guatteria pudica</i> (10)	137	<i>Podocarpus</i> sp (2)	186	<i>Unonopsis theobromifolia</i> (10)
40	<i>Chimarrhis</i> sp (1)	89	<i>Guatteria rostrata</i> (9)	138	<i>Pourouma bicolor</i> (3)	187	<i>Urera</i> sp (1)
41	<i>Chrysochlamys glauca</i> (7)	90	<i>Guazuma ulmifolia</i> (11)	139	<i>Pouteria lecythidicarpa</i> (9)	188	<i>Viburnum venustum</i> (1)
42	<i>Chrysochlamys skutchii</i> (9)	91	<i>Guettarda</i> sp (1)	140	<i>Pouteria subrotata</i> (8)	189	<i>Virola koschmyi</i> (12)
43	<i>Clarisia biflora</i> (1)	92	<i>Haematoxylum brasiletto</i> (1)	141	<i>Pouteria torta</i> (10)	190	<i>Virola sebifera</i> (15)
44	<i>Clethra mexicana</i> (4)	93	<i>Handroanthus guayacan</i> (2)	142	<i>Pouteria triplarifolia</i> (6)	191	<i>Vochysia ferruginea</i> (10)
45	<i>Cochlospermum vitifolium</i> (12)	94	<i>Handroanthus impetiginosus</i> (2)	143	<i>Prestoea decurrens</i> (4)	192	<i>Vochysia guatemalensis</i> (54)
46	<i>Conceveiba pletostemona</i> (4)	95	<i>Hedyosmum goudotianum</i> (1)	144	<i>Protium panamense</i> (10)	193	<i>Weinmannia pinnata</i> (1)
47	<i>Conostegia xalapensis</i> (4)	96	<i>Hieronyma alchorneoides</i> (51)	145	<i>Protium pecuniosum</i> (14)	194	<i>Welfia regia</i> (2)
48	<i>Cordia alliodora</i> (42)	97	<i>Hymenaea courbaril</i> (35)	146	<i>Psidium friedrichsthalianum</i> (10)	195	<i>Xylopia sericophylla</i> (1)
49	<i>Cordia cymosa</i> (10)	98	<i>Ilex skutchii</i> (2)	147	<i>Psidium guajava</i> (20)	196	<i>Zanthoxylum ekmanii</i> (1)

En el Cuadro 2.2 se muestra una cantidad de registros fuera del territorio nacional incluidos en la base de datos donde se especifican los países de donde provienen los los registros, el nombre científico y la cantidad de registros por especie. En la Figura 2.2 se muestra un mapa regional con las ubicaciones de los árboles muestreados fuera de Costa Rica.

Cuadro 2.2. Cantidad de registros fuera del territorio nacional incluidos en la base de datos.

Pais	Nombre Científico (n)
México	<i>Cedrela odorata</i> (n= 39)
	<i>Tectona grandis</i> (n= 33)
Guatemala	<i>Elaeis guineensis</i> (n=45)
	<i>Tectona grandis</i> (n= 24)
Bolivia	<i>Swietenia macrophylla</i> (n= 4)
Belice	<i>Tectona grandis</i> (n= 1)

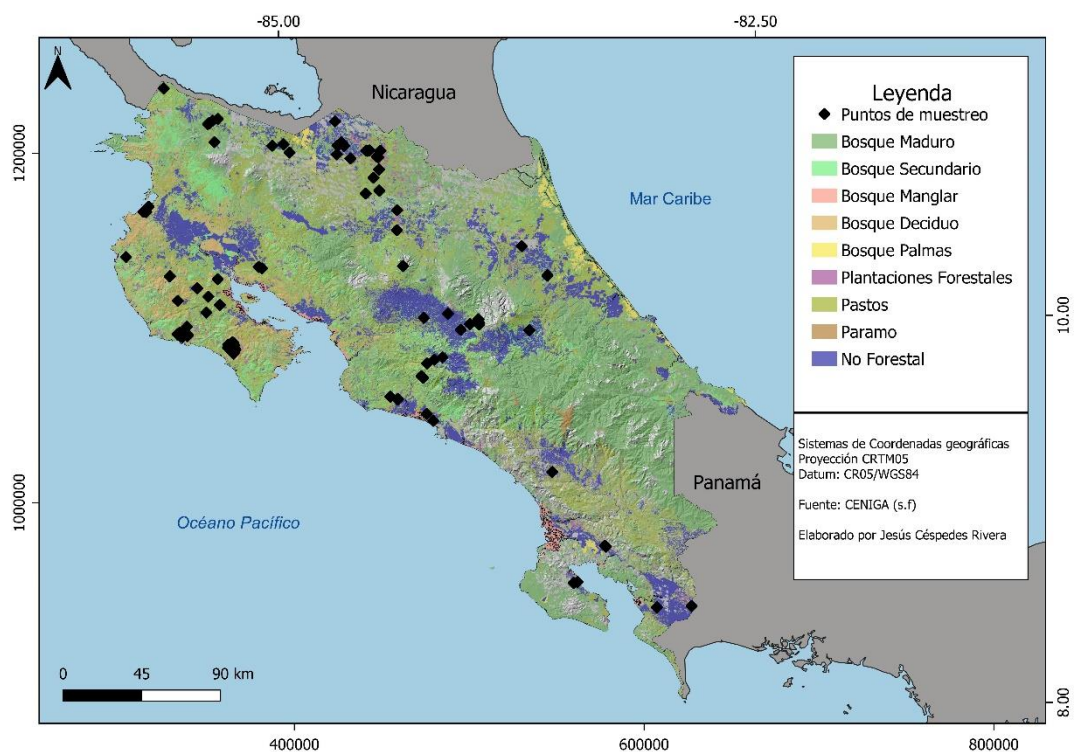


Figura 2.1. Localización de los árboles georreferenciados en Costa Rica (n=3.117)

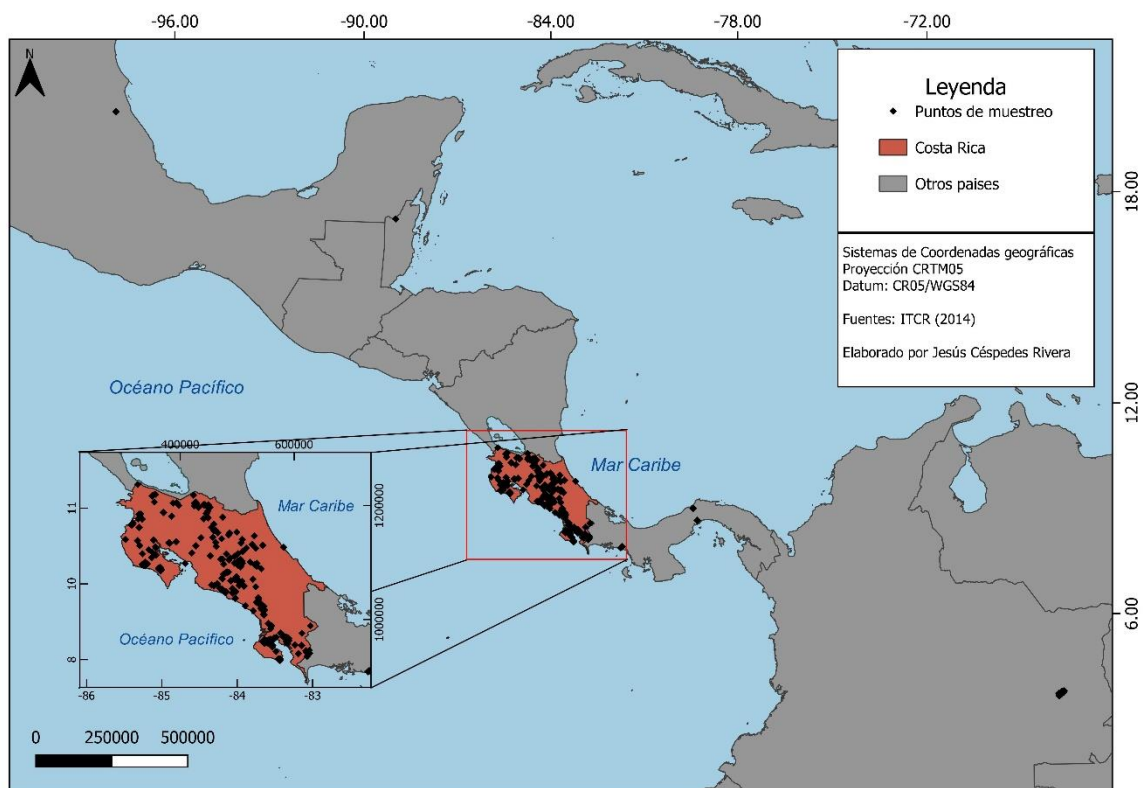


Figura 2.2. Localización de los árboles georreferenciados en el Neotrópico.

En el Cuadro 2.3 se presenta el resumen de estadística descriptiva de la concentración foliar de nutrimentos de 196 especies forestales tropicales, con la cantidad de individuos (n), el promedio, la desviación estándar, la mediana, el mínimo, el máximo, el rango, el error estándar, el sesgo, la curtosis, y los percentiles 25, 80 y 95, de la concentración foliar de cada elemento

El rango de concentración foliar de nitrógeno en las especies forestales incluidas en a base de datos se mantuvo entre 0,25 y 6,16%, el P entre 0,01 y 0,54%, el Ca entre 0,05 y 6,23%, el Mg entre 0,12 y 3,14% y el S entre 0,06 y 1,39%. En el caso de los micronutrimentos la concentración (mg kg^{-1}) de estos se mantuvo entre 1 - 37.751 (Na), 10 - 6.102 (Fe), 1 - 317 (Cu), 4 - 274 (Zn), 2 - 4,936 (Mn), 0.1 - 156 (B) y 3 - 31.328 (Al) (Cuadro 2.3).

Cuadro 2.3. Estadística descriptiva de la concentración foliar de N, P, K, Ca, Mg, S, Na, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Al, obtenido a partir de 197 especies forestales tropicales.

Elemento	N	P	Ca	Mg	K	S	Na	Fe	Cu	Zn	Mn	B	Al
Ítem	%												
n	3.403	3.549	3.555	3.546	3.545	2.553	1.818	3.499	3.541	3.524	3.538	2.740	2.100
Promedio	2,48	0,18	1,13	0,37	0,96	0,21	402	123	17	28	134	33	1231
Mediana	2,43	0,17	0,88	0,3	0,97	0,18	79	87	9	24	61	25	42
Desviación Est.	0,82	0,08	0,78	0,25	0,46	0,11	1.674	198	28	19	253	27	4.560
Mínimo	0,25	0,01	0,05	0,03	0,12	0,06	1,1	10,4	1,4	4	1,6	0,1	3
Máximo	6,16	0,54	6,23	2,65	3,14	1,39	37.751	6.102	317	274	4.936	156	31.328
Rango	5,91	0,53	6,18	2,62	3,02	1,33	37.750	6.092	316	270	4.934	156	31.325
Error Est.	0,014	0,001	0,013	0,004	0,008	0,002	39,2	3,4	0,5	0,3	4,2	0,5	99,5
Sesgo	0,15	0,37	1,51	2,16	0,52	3,73	12,2	16,1	5,0	3,0	6,5	2,1	4,2
Curtosis	-0,06	-0,29	2,98	7,11	0,85	21,70	197	410	31	18	68	4,3	17
Percentil 25	1,88	0,11	0,56	0,2	0,63	0,14	32	56	6	16	33	16	24
Percentil 80	3,24	0,25	1,67	0,46	1,31	0,25	298	147	17	36	148	43	133
Percentil 95	3,8	0,31	2,73	0,93	1,69	0,37	1.419	287	72	63	504	100	11.190

En la Figura 2.3 se muestran los histogramas de frecuencias de la concentración foliar de cada elemento en la población general de las especies bajo estudio en donde se aprecia que, a pesar de tener una leve tendencia a la normalidad, están lejos de serlo y por el contrario los datos se ven agrupados a la izquierda del histograma generando una cola a la derecha del mismo en todos los elementos. El N y P son elementos cuyos histogramas de frecuencia poseen cumbres poco empinadas o achatadas, lo que se representa en el Cuadro 2.3 por medio de la curtosis con magnitud negativa. La curtosis fue positiva para los demás elementos, lo que se puede observar en los gráficos de la Figura 2.2 como cumbres empinadas o puntiagudas. Al excluir la cola derecha de los histogramas de la Figura 2.3 (todos los datos mayores al percentil 95% de la concentración foliar de cada elemento) se obtiene la Figura 2.3.

2.5 Discusión y Conclusiones

La mayoría de los árboles de la base de datos fueron muestreados dentro de Costa Rica (3.117), para un total 191 especies, es decir el 10% de las especies forestales del país (CINAC 2015). La base de datos reúne la mayor cantidad de registros que se hayan agrupado en una base de datos de libre acceso con información de análisis foliares de especies forestales en Costa Rica. Los trabajos más recientes que han publicado con el fin de contribuir con la nutrición mineral de especies forestales son *Tectona grandis* (Mollinedo-García 2003; Vaides-López 2004; Portuguez-Umaña 2012), *Gmelina arborea* (Avellán 2012; Caguasango y Cadena 2012), *Cedrela odorata* (Ramírez 2014), *Terminalia amazonia* (Fernández et al. 2013), *Alnus acuminata* (Segura et al. 2005 y 2006, Salazar et al. 2011), *Acacia mangium* (Caguasango 2017), *Dalbergia retusa*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Hymenaea courbaril*, *Pachira quinata* y *Schizolobium parahyba* (Alvarado et al. 2018), sin embargo la mayoría de las bases de datos de estos trabajos quedan aisladas unas de otras y en ocasiones no disponible de manera inmediata para otros investigadores. El último esfuerzo en esta línea de investigación lo realizaron Camacho et al. (2018) quienes analizaron un total de 52 especies, a partir de 733 registros de análisis foliares, por lo que el avance logrado con respecto a este estudio fue 3,7 mayor en cuanto a cantidad de especies (196) y 4,9 veces mayor en cuanto a cantidad de registros (3.559).

La estadística descriptiva que se utiliza para presentar la base de datos (Cuadro 2.3), es uno de los métodos más ampliamente utilizados para representar los rasgos de una determinada población, ya que aporta descriptores de sus características como la tendencia central (media y mediana), la variabilidad (máximo, mínimo, rango, desviación estándar y error estándar), la forma de la curva de frecuencias (sesgo y curtosis) y puntos de interés específicos como cualquier percentil (Peña 2014, Salazar y Castillo 2018, Spiegel 2009).

Todos los elementos tuvieron sesgos positivos, así que la mayoría de los datos se agrupan por debajo de la media, lo que hace que la forma de los histogramas se distinga por tener una cola hacia la derecha (Figura 2.3) y puede significar que algunas pocas especies tienen la capacidad de concentrar uno o varios elementos por encima de lo que se puede considerar normal según los histogramas.

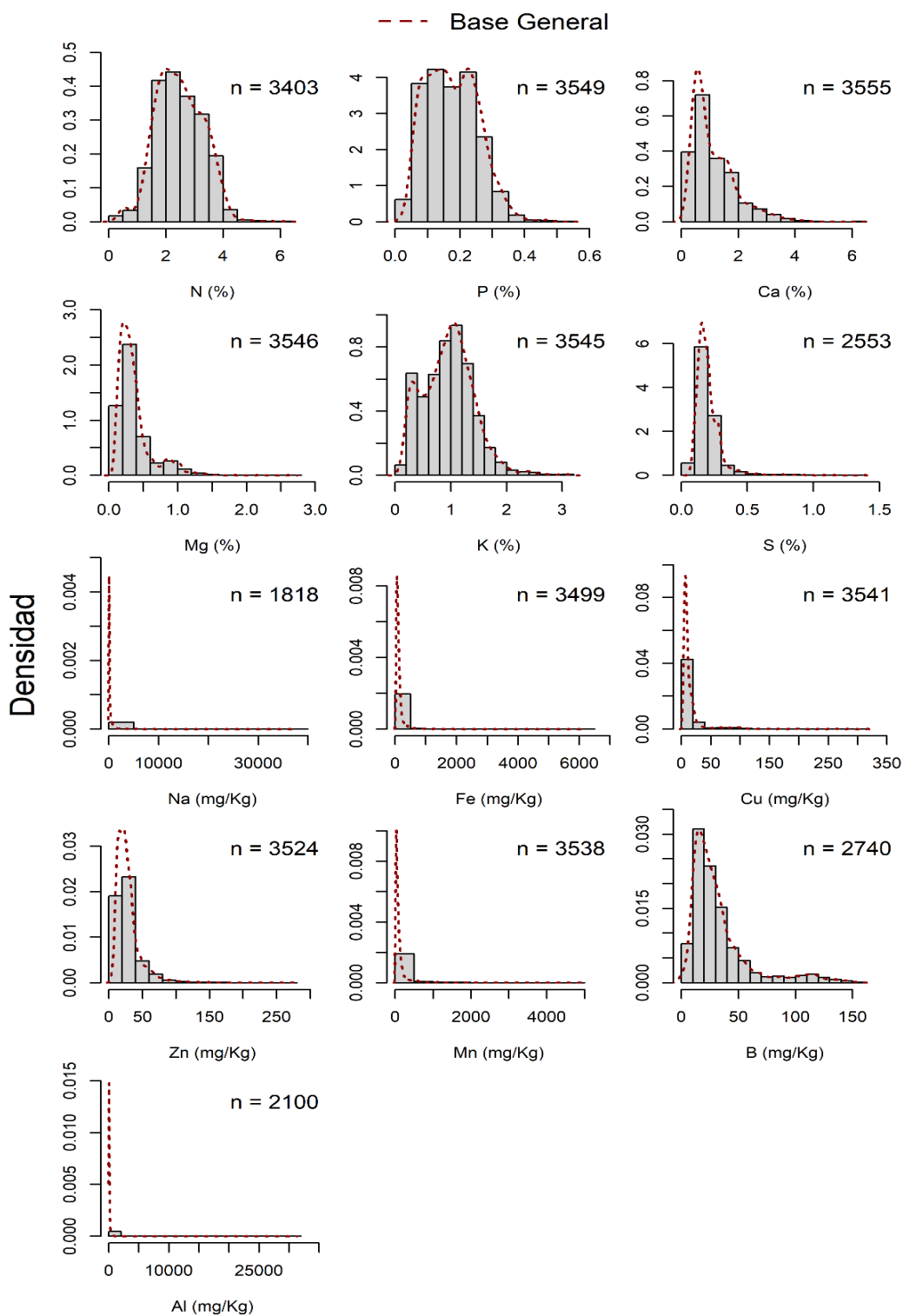


Figura 2.3. Distribución de la concentración foliar de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Al y Na, de los árboles de la base de datos, (n = al número de muestras utilizadas para generar los histogramas).

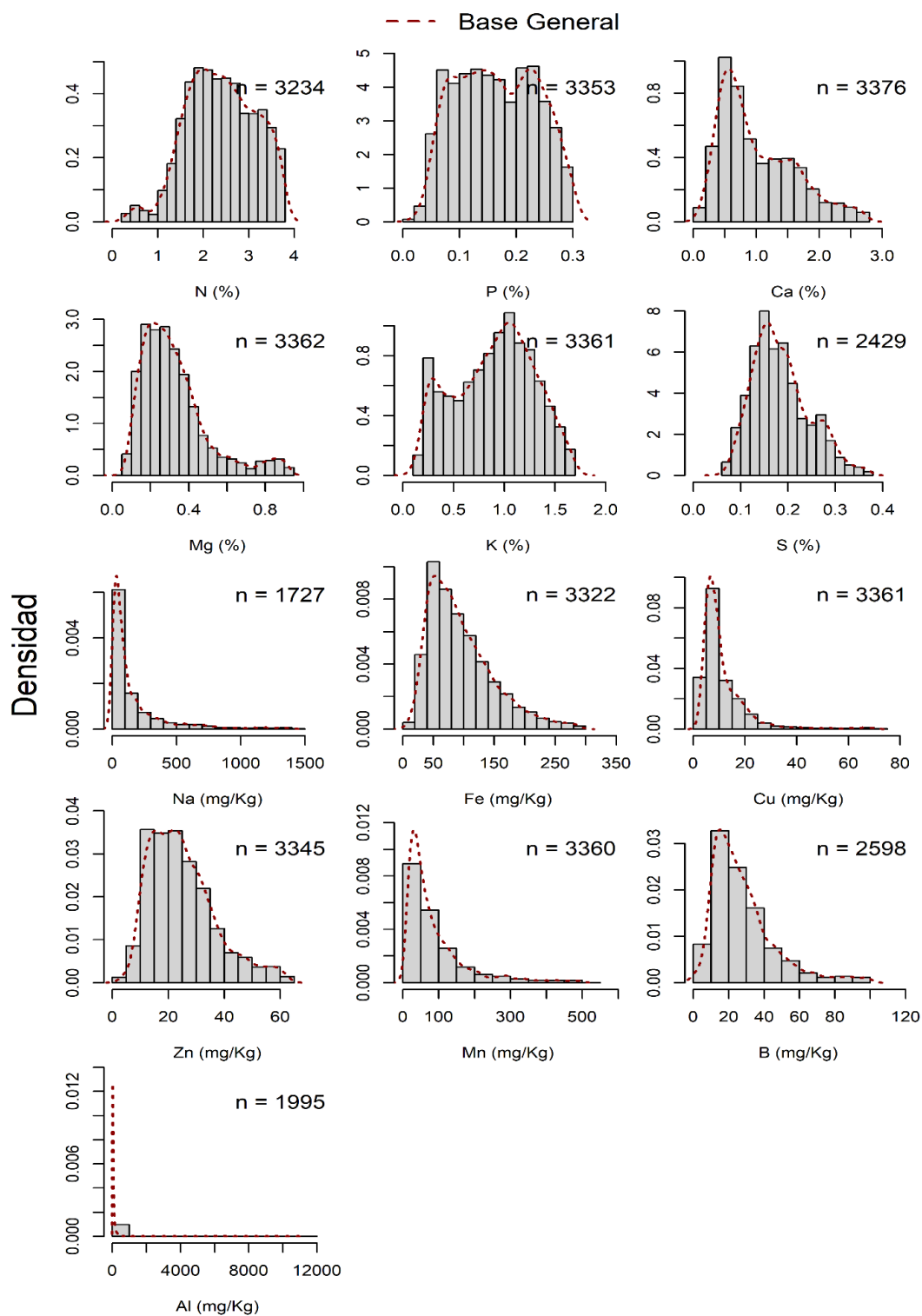


Figura 2.4. Distribución de la concentración foliar de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Al y Na, de los árboles de la base de datos después de eliminar los valores por superiores del percentil 95, (n = al número de muestras utilizadas para generar los histogramas).

Los histogramas de la concentración foliar de N y P, y que poseen magnitudes de curtosis negativas con cimas achatadas sugiere que en las especies forestales es más común que la concentración foliar de estos elementos varíe dentro de un rango amplio alrededor de la mediana. La variación foliar de N y P se considera que difiere entre especies de zona templada y tropical en función de sus mecanismos de acumulación y disponibilidad en estos ecosistemas. Aunque no comprobado se asume que el nitrógeno es más disponible en suelos de formación reciente mientras que el fósforo disminuye su disponibilidad con la acumulación de Fe y Al en suelos fuertemente meteorizados o en Andisoles por su acomplejamiento con complejos organominerales amorfos denominados Alofana. Para ambos elementos, los ecosistemas han evolucionado a facilitar su disponibilidad a través de asociaciones simbióticas en el caso del nitrógeno como *Rhizobium* y *Frankia* principalmente y en el caso del P, con asociaciones con endófitos como micorrizas o microorganismos solubilizadores de P de vida libre.

Los histogramas de la concentración foliar de K, Ca, Mg, S, B, Mn, Fe, Al, Cu, Zn, Mo y Na tuvieron cimas puntiagudas, correspondientes a curtosis de magnitud positiva, por lo que es más común que la concentración foliar de estos elementos tienda a agruparse en un rango reducido alrededor de la cima del histograma (Peña 2014, Salazar y Castillo 2018, Spiegel 2009).

Por lo tanto, en este estudio se reporta por primera vez la concentración foliar de la gran mayoría de las especies estudiadas, de la misma manera se reportan valores preliminares de concentración foliar intermedios, altos y bajos para las mismas especies.

2.7 Literatura citada

- Alvarado, A; Camacho, G; Fernández, M; Mezger, J; Mata, R; Bertsch, F; Vaides, E. 2015. (Memorias) Interpretación del análisis foliar de varias especies forestales latifoliadas del trópico americano. In (VIII, 2015, San José, Costa Rica). San José, Costa Rica, s.e. p. 68.
- Alvarado, A; Campos, JJ; Herrera, B. 1997. Evaluación del manejo y clasificación de tierras para uso forestal en América Central. Actas de la III Semana Científica, Turrialba, CR, 3-5 de febrero de 1997, 1997-02-03.
- Alvarado, A; Mora, A; Chacón, E; Villalobos, JE; Sandí, CL. 2018. Foliar concentration of macro-and micronutrients in four woody legumes from a tropical dry-seasonal forest in Costa Rica. *Biología Tropical* 66(3):969-983.
- Alvarado, A; Soto, G. 1995. Algunos aspectos del manejo de suelos forestales. Seminario Técnico Fertilización Forestal. Memorias, Santiago de Veraguas, PA, 3 de julio de 1995, 1995-07-03.
- Avellán, M. 2012. Determinación y variación de la concentración foliar de nutrimentos de *Gmelina arborea* Roxb. Tesis Lic. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional de Costa Rica. 87 p.
- Avilés, IR; Chaparro, JJG. 2010. Los servicios ambientales de la arborización urbana: retos y aportes para la sustentabilidad de la ciudad de Toluca. *Quivera. Revista de Estudios Territoriales* 12(1):96-102.
- Barrantes, A; Ugalde, S. 2019. Informe de usos y aportes de la madera en Costa Rica. San José, Costa Rica, Mundo Creativo S.A. 44 p.
- Boardmann, R; Cromer, R; Lambert, M; Webb, M. 1997. *Forest Plantations*. Australia, CSIRO publishing. p. 571.
- Caguasango, SM. 2017. Predicción de rendimientos para plantaciones de *Acacia mangium* Willd. en la altillanura plana a partir de variables biofísicas. Tesis M.Sc. Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia. 96 p.
- Caguasango, SM; Cadena, ME. 2012. Modelación de la calidad de índice de sitio–suelo sitio específico mediante criterios de disponibilidad de nutrientes en plantaciones de *Gmelina arborea* y *Pachira quinata* en bosque seco tropical (Zambrano–Bolívar). Tesis Lic. Bogotá, Colombia, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 230 p.
- Calvo, J; Quesada, C; Sánchez, A; González, P; Watson, V; Bolaños, R. 1999. La cobertura forestal en las áreas protegidas de Costa Rica entre 1986/7 y 1996/7. *Revista de Ciencias Ambientales* 16(1):19-25.

- Camacho, M; Fernández-Moya, J; Mezger, G; Mata, R; Bertsch, F; Araya, M; Avellán, M; Murillo, R; Ramírez, D; Portuguese, E; Fallas, J; Avila, C; Montero, M; Raigosa, J; Rios, V; Vaides, E; Alvarado, A. 2018. (Memorias). Interpretación del análisis foliar de varias especies forestales latifoliadas del trópico americano. Congreso Nacional de Suelos. In (VIII, 2015, San José, Costa Rica). San José, Costa Rica., s.e. p. 68.
- Coomes, OT; Burt, GJ. 2001. Peasant charcoal production in the Peruvian Amazon: rainforest use and economic reliance. *Forest Ecology and Management* 140(1):39-50.
- Daily, GC. 1997. *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems*. 1 ed. Washington, DC, Island Press, Washington, DC, vol.3. 392 p.
- Date, CJ. 2001. *Introducción a los sistemas de bases de datos*. 7 ed. DF, México, Pearson Educación. 964 p.
- Drechsel, P; Zech, W. 1991. Foliar nutrient levels of broad-leaved tropical trees: a tabular review. *Plant and Soil* 131(1):29-46.
- Drechsel, P; Zech, W. 1993. Mineral nutrition of tropical trees. *Tropical Forestry Handbook* 1:515-567.
- FAO. 2016. *State of the world's forests 2016*. 1 ed. Rome, Italy, Food and Agriculture Organization. 120 p.
- Fernández, J; Alvarado, A; Forsythe, W; Marchamalo, M. 2013. Effect of teak (*Tectona grandis*) plantations on hydraulic conductivity and porosity of alfisols in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science* 25:259-267.
- Mollinedo García, MS. 2003. *Relación suelo-planta, factores de sitio y respuesta a la fertilización, en plantaciones jóvenes de teca (Tectona grandis L. f.), en la zona Oeste, Cuenca del Canal de Panamá*. Tesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 89 p.
- Ortega, M. 2012. *Ecología del paisaje y caracterización de la cobertura forestal, según piso altitudinal de la microcuenca del río La Balsa, Costa Rica, para establecer criterios para el manejo integrado de cuencas*. Tesis Lic. Cartago, Costa Rica, Instituto tecnológico de Costa Rica. 46 p.
- Peña, D. 2014. *Fundamentos de Estadística*. Madrid, España, Alianza editorial. 688 p.
- Portuguez, EM. 2012. *Estimación de la extracción de nutrimentos por parte aérea en plantaciones de teca (Tectona grandis Linn. f.) de las empresas Panamerican Woods y CYM Investment Group Ltda. en la península de Nicoya, Guanacaste, Costa Rica*. Tesis M.Sc. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 92 p.
- Ramírez, D. 2014. *Estimación de la absorción de nutrimentos de cedro amargo (Cedrela odorata L.) como mecanismo de diagnóstico para mejorar las recomendaciones de manejo sostenible de la*

- especie en plantaciones de pequeños agricultores del Programa Forestal de CoopeAgri RL, Costa Rica. Tesis Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 81 p.
- Rosero-Bixby, L; Palloni, A. 1998. Población y deforestación en Costa Rica. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica, vol.1. p. 278.
- Salazar, C; Castillo, S del. 2018. Fundamentos básicos de estadística. Fundamentos Básicos de Estadística (en línea). 1 ed. s.l., s.e. 226 p. Consultado 27 nov. 2020. Disponible en <http://up-rid2.up.ac.pa:8080/xmlui/handle/123456789/1570>.
- Salazar, M; Cabalceta, G; Alvarado, A; Segura, M; Castillo, Á. 2011. Efecto de la adición de cal a plantaciones de jaúl (*Alnus acuminata*) en andisoles de la cuenca alta del río Virilla, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 35(1):147-161.
- Segura, JM; Castillo, A; Alvarado, A; Blanco, FA. 2006. Variación del contenido foliar de nutrimentos de *Alnus acuminata*. 30(1):53-63.
- Segura, M; Castillo, Á; Alvarado, A; Blanco, F. 2005. Extracción de nutrimentos en plantaciones de jaúl (*Alnus acuminata*) en la cuenca del río Virilla, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(2):109-120.
- SINAC, R-C-G. 2015. Inventario Forestal Nacional de Costa Rica 2014-2015 (en línea, sitio web). Disponible en https://www.sirefor.go.cr/pdfs/INF_CostaRica_ParaWeb.pdf.
- Spiegel, MR. 2009. Estadística. 4 ed. DF, México, McGraw-Hill. 577 p.
- Vaides, EE. 2004. Características de sitio que determinan el crecimiento y productividad de teca (*Tectona grandis* LF), en plantaciones forestales de diferentes regiones en Guatemala. Tesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 68 p.
- Van den Driessche, R. 1974. Prediction of mineral nutrient status of trees by foliar analysis. *The Botanical Review* 40(3):347-394.
- Vásquez, W; Ugalde, LA; Campos, JJ; Herrera, B; Alvarado, A; Bertsch, F; Bornemisza, E. 1996. (Memorias) Avances en la clasificación de sitios (tierras) forestales en Costa Rica. In (II, 1996, San José, Costa Rica). San José, Costa Rica, EUNED/EUNA. p. 50.
- World Health Organization. 2005. Ecosystems and Human Well-being: synthesis. Geneva, Suiza, Millennium Ecosystem Assessment. 53 p.

CAPÍTULO III

El análisis foliar como herramienta de diagnóstico en especies arbóreas latifoliadas del neotrópico: rangos normales de concentración foliar por especie según sus valores extremos altos y bajos

3.1 Resumen

Los valores de los componentes nutricionales en las hojas de la planta sirven de indicador de su estado de salud. En plantas cultivadas es común que se midan estos componentes para así tomar medidas de manejo y mejorar la productividad. Sin embargo, existe poca información acerca del contenido de nutrimentos foliares y de métodos que permitan diagnosticar la condición nutricional en especies forestales. Por lo tanto, se realiza la presente investigación con el objetivo de calcular los rangos más probables de concentración foliar (entre el percentil 25 y 80) de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu, B, Al y Na de 96 especies forestales e identificar especies acumuladoras (entre los percentiles 80% y 95%), hiperacumuladoras (> al percentil 95%) y minimalistas (< al percentil 25%), basados en los contenidos foliares de cada elemento. Para esto se utilizó una base de datos que contiene 3.559 registros de concentración foliar de nutrimentos de 197 especies forestales con 5 o más registros.

A partir de estos datos se confeccionaron dos Cuadros para la interpretación de los análisis foliares que incluyen además de las concentraciones de nutrimentos la clasificación de las especies, el nombre de la especie, el número de registros por especie (“n”), la cantidad de nutrimentos de cada especie por categoría (minimalistas, acumuladoras e hiperacumuladoras) y la clasificación de cada elemento según su rango de concentración foliar. El segundo Cuadro se confeccionó como una herramienta para la interpretación de análisis foliares, esta tabla contiene los rangos de concentración foliar (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Na y Al) recomendados para 96 especies forestales tropicales obtenidos a partir del cálculo de los percentiles 25 y 80 de la concentración foliar de cada elemento por especie.

3.2 Introducción

Los resultados de los análisis de la concentración foliar de elementos se han utilizado históricamente para aumentar el conocimiento sobre la nutrición mineral de especies vegetales principalmente de interés económico (Bertsch 2003). Drechsel y Zech (1991) agregan que el conocimiento de dichos parámetros permite encontrar la proporción y cantidad foliar de cada elemento que la planta requiere para crecer adecuadamente y para la valoración y diagnóstico de la salud de los bosques y los proyectos de reforestación.

Las curvas de absorción de nutrientes combinan los análisis de concentración foliar de nutrientes con evaluaciones de crecimiento de las plantas y así establecer la cantidad total de cada elemento requerido para crecer adecuadamente, en cada etapa fenológica (Meléndez y Molina 2002, Bertsch 2003). Según Reuter y Robinson (1997) y Alvarado et al. (2015) a partir de los análisis foliares se pueden establecer rangos de deficiencia o de consumo de lujo cuando una especie es poco demandante o acumula algún elemento potencialmente tóxico en grandes cantidades.

La estadística descriptiva, es un método ampliamente utilizado para representar las características de una determinada población ya que aporta los descriptores de las variables que la definen. La media y la mediana, describen la tendencia central de una determinada característica, los valores correspondientes al máximo, mínimo, rango, la desviación estándar y el error estándar, describen su variabilidad, y la probabilidad de aparición de una característica se puede obtener al calcular un percentil de interés específico (Reimann et al. 2005, Spiegel 2009).

La nutrición mineral de especies forestales es un territorio relativamente poco explorado (Drechsel y Zech 1991, Alvarado et al. 2015) y a través de su estudio por medio de estadística descriptiva se puede predecir la probabilidad de que un árbol posea valores de concentración foliar altos, medios o bajos, en función de los parámetros de tendencia central y la variación de la concentración foliar de un elemento específico. Esta herramienta permite además, estimar los rangos de concentración foliar de nutrientes más probables para cada especie, y clasificar aquellas especies con concentraciones foliares extremas altas o bajas (Reimann et al. 2005).

La falta de información acerca del uso y la distribución de nutrientes entre las especies forestales y del rango de concentración foliar óptimo para cada especie, hizo que el objetivo de esta investigación fuese calcular los rangos intermedios (entre el percentil 25 y 80) de la concentración de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu, B, Al y Na, e identificar contenidos foliares de especies acumuladoras (entre los percentiles 80% y 95%), hiper- (> al percentil 95%) e hipoacumuladoras (< al percentil 25%) de elementos para las especies que posean cinco repeticiones o más.

3.3 Materiales y Métodos

Para la confección de una herramienta de consulta para la clasificación e interpretación de análisis foliares de especies forestales se utilizó una base de datos que contiene 3.559 registros de concentración foliar de elementos de 197 especies. Únicamente se utilizaron las especies de la base de datos que reunieran un total de 5 o más registros, las cuales suman un total de 96 (Cuadro 3.1 y 3.2); las otras 101 especies de la base de datos con menos de 5 registros, no se incluyeron en el análisis del presente trabajo. A partir de estos datos se confeccionaron dos Cuadros como herramientas de consulta y referencia, para la interpretación de los análisis foliares.

El primer Cuadro 3.1 consiste en la clasificación de la concentración foliar de elementos de cada especie por medio de una escala cualitativa de cuatro rangos definidos en función de la curva de distribución normal o histograma de cada elemento incluido en la base de datos general.

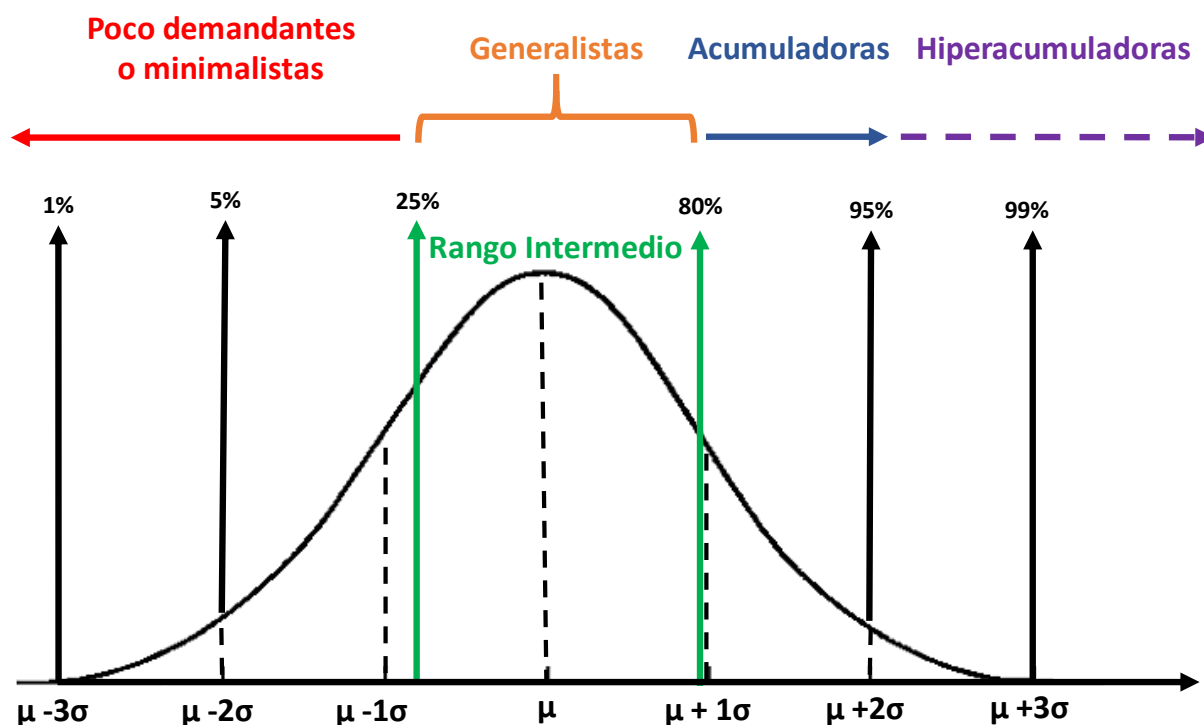


Figura 3.1. Clasificación de especies forestales según la distribución de la concentración foliar de nutrientes.

El primer rango establece cuales elementos son poco demandados por una determinada especie, o sea aquellas especies que posean elementos cuya concentración foliar se encuentre por debajo del

percentil 25 de la base de datos general, y para efectos del presente trabajo estas especies se considerarán minimalistas de uno o varios elementos según sea el caso.

Para la estimación del segundo rango en la clasificación de la concentración foliar o rango intermedio, se calculó el primer cuartil (25%) y el percentil 80 de cada elemento por especie a partir de la base general, y se estableció como el valor mínimo y máximo del rango intermedio. Las especies clasificadas en este rango se consideran como generalistas (Figura 3.1).

En el tercer rango de la escala se incluyen las especies forestales que se clasifican como acumuladoras de elementos y son aquellas que posean en la concentración foliar de uno o varios elementos, medianas entre el percentil 80% y el 95% de la población total. En el cuarto rango de la clasificación se incluyeron aquellas especies en las que la MED.CONC de uno o varios elementos se encuentra sobre del percentil 95% se clasificaron como hiperacumuladoras (Figura 3.1).

El Cuadro 3.2 se confeccionó como una herramienta cuantitativa para la interpretación de análisis foliares con los rangos de concentración foliar de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Na y Al, recomendados para 96 especies forestales tropicales obtenidos a partir del cálculo de los percentiles 25 y 80 de la concentración foliar de cada elemento por especie.

3.4 Resultados

Noventa y seis especies cumplieron con un número de registros de 5 o más (Cuadro 3.1) y se clasificaron en función del rango de concentración foliar de 13 elementos (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Na y Al). El Cuadro de clasificación de especies por concentración foliar de nutrimentos cuenta con el nombre de la especie, el número de registros por especie (“n”), la cantidad de nutrimentos de cada especie por categoría (Min, Acum e Hiper) y la clasificación de cada elemento por especie según su rango de concentración foliar.

Especies poco demandantes o con baja concentración de cada elemento:

En total 85 especies se clasificaron como poco demandantes de al menos un elemento, entre ellos se destaca *Pouteria torta* única especie que posee 8 elementos en esta categoría. A aun así 10 especies tuvieron hasta 7 elementos poco demandados (*Anacardium excelsum*, *Bactris caudata*, *Chrysochlamys skutchii*, *Faramea permagnifolia*, *Garcinia madruno*, *Garcinia magnifolia*, *Pouteria lecythidicarpa*, *Pouteria triplarifolia*, *Unonopsis osae* y *Unonopsis theobromifolia*).

Veintiocho especies de 10 órdenes tuvieron entre 4 y 6 elementos clasificados como minimalistas (*Asterogyne martiana*, *Bactris gracilior*, *Calophyllum brasiliense*, *Carapa nicaraguensis*, *Dendropanax ravenii*, *Elaeis guineensis*, *Euterpe precatória*, *Faramea occidentalis*, *Garcinia intermedia*, *Geonoma deversa*, *Guatteria amplifolia*, *Guatteria pudica*, *Hymenaea courbaril*, *Inga spectabilis*, *Licania corniculata*, *Miconia osaensis*, *Mouriri gleasoniana*, *Ocotea mollifolia*, *Ocotea rivularis*, *Pentaclethra macroloba*, *Pouteria subrotata*, *Protium panamense*, *Quercus costaricensis*, *Schizolobium parahyba*, *Terminalia oblonga* y *Vochysia ferruginea*).

Otro grupo de 46 especies tuvieron 3 o menos elementos clasificados como poco demandantes incluyen a *Albizia guachapele*, *Albizia saman*, *Alnus acuminata*, *Ardisia compressa*, *Ardisia dunlapiana*, *Astronium graveolens*, *Bactris gasipaes*, *Bactris hondurensis*, *Brosimum* sp., *Bursera simaruba*, *Cassia grandis*, *Cedrela odorata*, *Chamaedorea pinnatifrons*, *Chamaedorea tepejilote*, *Chrysochlamys glauca*, *Cochlospermum vitifolium*, *Cordia cymosa*, *Cordia liesneri*, *Cordia megalantha*, *Dendropanax arboreus*, *Dipteryx oleifera*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Geonoma congesta*, *Geonoma cuneata*, *Geonoma interrupta*, *Geonoma longevaginata*, *Guatteria chiriquiensis*, *Guatteria pudica*, *Hieronyma alchorneoides*, *Inga skutchii*, *Miconia dissitinervia*, *Miconia donaeana*, *Miconia trinervia*, *Minquartia guianensis*, *Pachira quinata*, *Persea americana*, *Protium pecuniosum*,

Sapium allenii, *Sapium glandulosum*, *Swietenia macrophylla*, *Synechanthus warscewiczianus*, *Tabebuia rosea*, *Tectona grandis*, *Virola koschnyi*, *Virola sebifera* y *Vochysia guatemalensis*.

La lista de elementos que se consideran poco demandados ordenados de mayor cantidad de especies por elemento a menor cantidad son P (51) > N (32) > Fe (30) > Zn (26) > Mn (26) > K (25) > B (24) > Mg (22) > Ca (15) > S (13) > Al (13) > Cu (9). A continuación, se detallan las especies que se agruparon en esta categoría:

Poco demandantes de nitrógeno ([N foliar] <1,87%, n=32)

Anacardium excelsum, *Ardisia dunlapiana*, *Asterogyne martiana*, *Bactris caudata*, *Calophyllum brasiliense*, *Carapa nicaraguensis*, *Chrysochlamys skutchii*, *Dendropanax arboreus*, *Dendropanax ravenii*, *Faramea occidentalis*, *Faramea permagnifolia*, *Garcinia*, *Garcinia intermedia*, *Garcinia madruno*, *Garcinia magnifolia*, *Geonoma deversa*, *Gutteria amplifolia*, *Hymenaea courbaril*, *Licania corniculata*, *Miconia dissitinervia*, *Miconia osaensis*, *Mouriri gleasoniana*, *Pouteria lecythidicarpa*, *Pouteria torta*, *Pouteria triplarifolia*, *Protium panamense*, *Protium pecuniosum*, *Quercus costaricensis*, *Terminalia oblonga*, *Unonopsis osae*, *Virola sebifera* y *Vochysia ferruginea*.

Poco demandantes de calcio ([Ca foliar] <0,56%, n=15)

Alnus acuminata, *Asterogyne martiana*, *Bactris gasipaes*, *Bactris gracilior*, *Bactris hondurensis*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Euterpe precatória*, *Geonoma deversa*, *Geonoma interrupta*, *Geonoma longevaginata*, *Pentaclethra macroloba*, *Pouteria torta*, *Quercus costaricensis*, *Unonopsis osae* y *Unonopsis theobromifolia*.

Poco demandantes de magnesio ([Mg foliar] <0,20%, n=22)

Albizia saman, *Alnus acuminata*, *Asterogyne martiana*, *Bactris caudata*, *Calophyllum brasiliense*, *Cedrela odorata*, *Dipteryx oleifera*, *Euterpe precatória*, *Garcinia intermedia*, *Geonoma deversa*, *Inga skutchii*, *Inga spectabilis*, *Minuartia guianensis*, *Pentaclethra macroloba*, *Pouteria lecythidicarpa*, *Pouteria torta*, *Pouteria triplarifolia*, *Quercus costaricensis*, *Unonopsis theobromifolia* y *Vochysia ferruginea*.

Poco demandantes de potasio ([K foliar] <0,63%, n=25)

Bactris caudata, *Bactris gracilior*, *Calophyllum brasiliense*, *Carapa nicaraguensis*, *Cedrela odorata*, *Chrysochlamys glauca*, *Chrysochlamys skutchii*, *Elaeis guineensis*, *Euterpe precatória*, *Faramea occidentalis*, *Faramea permagnifolia*, *Garcinia madruno*, *Garcinia magnifolia*, *Geonoma deversa*, *Gutteria amplifolia*, *Hymenaea courbaril*, *Licania corniculata*, *Miconia osaensis*, *Pentaclethra macroloba*, *Pouteria torta*, *Schizolobium parahyba*, *Terminalia oblonga*, *Unonopsis theobromifolia* y *Vochysia guatemalensis*.

Poco demandantes de fósforo ([P foliar] <0,11%, n=51)

Ardisia compressa, *Ardisia dunlapiana*, *Bactris caudata*, *Bactris gracilior*, *Brosimum*, *Calophyllum brasiliense*, *Carapa nicaraguensis*, *Chrysochlamys glauca*, *Chrysochlamys skutchii*, *Cordia cymosa*, *Cordia liesneri*, *Dendropanax arboreus*, *Dendropanax ravenii*, *Euterpe precatória*, *Faramea occidentalis*, *Faramea permagnifolia*, *Garcinia intermedia*, *Garcinia madruno*, *Garcinia magnifolia*, *Geonoma cuneata*, *Geonoma deversa*, *Geonoma longevaginata*, *Guatteria amplifolia*, *Guatteria chiriquiensis*, *Guatteria pudica*, *Hymenaea courbaril*, *Inga*, *Licania corniculata*, *Miconia dissitinervia*, *Miconia donaeana*, *Miconia osaensis*, *Miconia trinervia*, *Mouriri gleasoniana*, *Ocotea mollifolia*, *Pentaclethra macroloba*, *Pouteria lecythidicarpa*, *Pouteria subrotata*, *Pouteria torta*, *Pouteria triplarifolia*, *Protium panamense*, *Protium pecuniosum*, *Quercus costaricensis*, *Swietenia macrophylla*, *Terminalia oblonga*, *Unonopsis osae*, *Unonopsis theobromifolia*, *Virola koschnyi*, *Vochysia ferruginea* y *Vochysia guatemalensis*.

Poco demandantes de azufre ([S foliar] <0,14%, n=13)

Anacardium excelsum, *Chrysochlamys skutchii*, *Dendropanax ravenii*, *Faramea permagnifolia*, *Hieronyma alchorneoides*, *Hymenaea courbaril*, *Inga spectabilis*, *Ocotea mollifolia*, *Ocotea rivularis*, *Quercus costaricensis*, *Schizolobium parahyba*, *Terminalia oblonga* y *Vochysia ferruginea*.

Poco demandantes de sodio ([Na foliar] <32 mg kg⁻¹, n=7)

Chamaedorea pinnatifrons, *Cochlospermum vitifolium*, *Cordia megalantha*, *Dipteryx oleifera*, *Persea americana*, *Schizolobium parahyba* y *Tectona grandis*.

Poco demandantes de hierro ([Fe foliar] <56 mg kg⁻¹, n=30)

Anacardium excelsum, *Ardisia dunlapiana*, *Chrysochlamys skutchii*, *Cordia liesneri*, *Cordia megalantha*, *Dendropanax ravenii*, *Elaeis guineensis*, *Faramea occidentalis*, *Faramea permagnifolia*, *Garcinia madruno*, *Garcinia magnifolia*, *Guatteria amplifolia*, *Guatteria pudica*, *Licania corniculata*, *Miconia dissitinervia*, *Miconia donaeana*, *Miconia osaensis*, *Miconia trinervia*, *Mouriri gleasoniana*, *Ocotea mollifolia*, *Ocotea rivularis*, *Pouteria lecythidicarpa*, *Pouteria subrotata*, *Pouteria torta*, *Pouteria triplarifolia*, *Protium panamense*, *Sapium allenii*, *Sapium glandulosum* y *Unonopsis osae*.

Poco demandantes de manganeso ([Mn foliar] <33 mg kg⁻¹, n=26)

Albizia saman, *Anacardium excelsum*, *Astronium graveolens*, *Cassia grandis*, *Cedrela odorata*, *Chrysochlamys glauca*, *Chrysochlamys skutchii*, *Cordia megalantha*, *Elaeis guineensis*, *Garcinia intermedia*, *Garcinia madruno*, *Guatteria pudica*, *Licania corniculata*, *Miconia osaensis*, *Mouriri gleasoniana*, *Ocotea mollifolia*, *Ocotea rivularis*, *Pachira quinata*, *Pouteria lecythidicarpa*, *Pouteria subrotata*, *Pouteria triplarifolia*, *Protium panamense*, *Sapium allenii*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia rosea*, *Unonopsis osae* y *Unonopsis theobromifolia*.

Poco demandantes de zinc ([Zn foliar] <16 mg kg⁻¹, n=26)

Albizia saman, *Anacardium excelsum*, *Bactris caudata*, *Bactris gracilior*, *Bursera simaruba*, *Calophyllum brasiliense*, *Elaeis guineensis*, *Faramea permagnifolia*, *Guatteria amplifolia*, *Inga skutchii*, *Pachira quinata*, *Pentaclethra macroloba*, *Pouteria lecythidicarpa*, *Pouteria torta*, *Protium panamense*, *Protium pecuniosum*, *Quercus costaricensis*, *Schizolobium parahyba*, *Swietenia macrophylla*, *Unonopsis osae*, *Unonopsis theobromifolia*, *Virola koschnyi*, *Vochysia ferruginea* y *Vochysia guatemalensis*.

Poco demandantes de boro ([B foliar] <16 mg kg⁻¹, n=24)

Albizia guachapele, *Alnus acuminata*, *Anacardium excelsum*, *Ardisia compressa*, *Asterogyne martiana*, *Bactris caudata*, *Bactris gasipaes*, *Bactris gracilior*, *Bactris hondurensis*, *Carapa nicaraguensis*, *Chamaedorea pinnatifrons*, *Chamaedorea tepejilote*, *Garcinia magnifolia*, *Geonoma congesta*, *Geonoma deversa*, *Geonoma interrupta*, *Geonoma longevaginata*, *Inga spectabilis*, *Ocotea mollifolia*, *Ocotea rivularis*, *Pouteria torta*, *Synechanthus warscewiczianus*, *Tabebuia rosea* y *Unonopsis theobromifolia*.

Poco demandantes de cobre ([Cu foliar] <6 mg kg⁻¹, n=9)

Bactris caudata, *Bursera simaruba*, *Cassia grandis*, *Faramea permagnifolia*, *Garcinia intermedia*, *Garcinia madruno*, *Garcinia magnifolia*, *Pouteria subrotata* y *Pouteria triplarifolia*.

Con baja concentración de aluminio foliar ([Al foliar] <24 mg kg⁻¹, n=13)

Anacardium excelsum, *Chrysochlamys skutchii*, *Garcinia madruno*, *Garcinia magnifolia*, *Guatteria amplifolia*, *Guatteria pudica*, *Guatteria pudica*, *Inga spectabilis*, *Pouteria lecythidicarpa*, *Pouteria triplarifolia*, *Sapium allenii* y *Unonopsis osae*.

Especies acumuladoras de elementos

Sesenta y siete especies se clasificaron como acumuladoras de al menos un elemento, *Miconia trinervia* es la única que posee 7 elementos en esta categoría (Mg, K, S, Mn, Zn, Fe, Cu y Al), seguida de *Cordia liesneri*, la cual es acumuladora de 5 elementos (Mg, S, Mn, Zn y Cu). Diez especies se clasificaron como acumuladoras de 4 elementos, (*Dendropanax ravenii*, *Bactris hondurensis*, *Elaeis guineensis*, *Chamaedorea pinnatifrons*, *Dalbergia retusa*, *Alnus acuminata*, *Tabebuia ochracea*, *Virola koschnyi*, *Chrysochlamys glauca* y *Miconia donaeana*).

Un total de 55 especies que se clasificaron como acumuladoras de 3 o menos elementos, *Albizia guachapele*, *Albizia saman*, *Ardisia compressa*, *Ardisia dunlapiana*, *Asterogyne martiana*, *Bactris gracilior*, *Brosimum*, *Bursera simaruba*, *Calophyllum brasiliense*, *Cassia grandis*, *Cedrela odorata*, *Chamaedorea deckeriana*, *Chamaedorea tepejilote*, *Chrysochlamys skutchii*, *Cordia alliodora*, *Cordia*

cymosa, *Cordia megalantha*, *Dendropanax arboreus*, *Dipteryx oleifera*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Faramea occidentalis*, *Faramea permagnifolia*, *Garcinia madruno*, *Geonoma congesta*, *Geonoma cuneata*, *Geonoma deversa*, *Geonoma longevaginata*, *Gmelina arborea*, *Guazuma ulmifolia*, *Hymenaea courbaril*, *Inga skutchii*, *Lohocarpus minimifolius*, *Miconia dissitinervia*, *Miconia osaensis*, *Mouriri gleasoniana*, *Ocotea mollifolia*, *Pachira quinata*, *Pentaclethra macroloba*, *Persea americana*, *Pouteria subrotata*, *Pouteria triplarifolia*, *Psidium friedrichsthalianum*, *Psidium guajava*, *Rehdera trinervis*, *Sapium allenii*, *Sapium glandulosum*, *Schizolobium parahyba*, *Swietenia macrophylla*, *Synechanthus warscewiczianus*, *Terminalia oblonga*, *Virola sebifera* y *Vochysia guatemalensis*.

La lista de elementos que se consideran acumulados ordenados de mayor cantidad de especies por elemento a menor cantidad son Ca (22) > Na (17) > K (15) > B (13) > Zn (12) > Mn (12) > Mg (11) > S (11) > Fe (10) > N (6) > Al (6) > Cu (4) > P (2).

A continuación, se detallan las especies que se agruparon como acumuladoras de cada elemento.

Acumuladoras de nitrógeno (3,24% < [N foliar] < 3,80%, n=6)

Albizia saman, *Elaeis guineensis*, *Chamaedorea pinnatifrons*, *Cordia alliodora*, *Alnus acuminata* y *Tabebuia ochracea*.

Acumuladoras de calcio (1,67% < [Ca foliar] < 2,73%, n=22)

Cassia grandis, *Cedrela odorata*, *Chamaedorea pinnatifrons*, *Chamaedorea tepejilote*, *Cordia cymosa*, *Cordia megalantha*, *Dalbergia retusa*, *Faramea occidentalis*, *Garcinia madruno*, *Lohocarpus minimifolius*, *Miconia osaensis*, *Pachira quinata*, *Platymiscium*, *Pouteria subrotata*, *Pouteria triplarifolia*, *Psidium friedrichsthalianum*, *Sapium allenii*, *Sapium glandulosum*, *Swietenia macrophylla*, *Chrysochlamys glauca* y *Miconia donaeana*.

Acumuladoras de magnesio (0,46% < [Mg foliar] < 0,93%, n=11)

Dendropanax ravenii, *Bursera simaruba*, *Elaeis guineensis*, *Chrysochlamys skutchii*, *Cordia liesneri*, *Cordia megalantha*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Faramea permagnifolia*, *Geonoma cuneata*, *Miconia trinervia* y *Chrysochlamys glauca*.

Acumuladoras de potasio (1,31% < [K foliar] < 1,69%, n=15)

Albizia guachapele, *Dendropanax ravenii*, *Ardisia compressa*, *Chamaedorea deckeriana*, *Chamaedorea pinnatifrons*, *Chamaedorea tepejilote*, *Cordia megalantha*, *Dendropanax arboreus*, *Tabebuia ochracea*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Guazuma ulmifolia*, *Lohocarpus minimifolius*, *Miconia trinervia*, *Psidium guajava* y *Virola sebifera*.

Acumuladoras de fósforo (0,25% < [P foliar] < 0,31%, n=2)

Alnus acuminata y *Pachira quinata*

Acumuladoras de azufre (0,25% < [S foliar] < 0,37%, n=11)

Bactris gracilior, *Bactris hondurensis*, *Elaeis guineensis*, *Chamaedorea deckeriana*, *Chamaedorea pinnatifrons*, *Cordia liesneri*, *Tabebuia ochracea*, *Geonoma deversa*, *Virola koschnyi*, *Miconia trinervia* y *Mouriri gleasoniana*.

Acumuladoras de sodio (298 mg kg⁻¹ < [Na foliar] < 1.419 mg kg⁻¹, n=17)

Dendropanax ravenii, *Ardisia compressa*, *Ardisia dunlapiana*, *Calophyllum brasiliense*, *Cordia cymosa*, *Garcinia madruno*, *Geonoma congesta*, *Geonoma cuneata*, *Geonoma deversa*, *Geonoma longevaginata*, *Inga skutchii*, *Miconia dissitinervia*, *Virola koschnyi*, *Pouteria subrotata*, *Synechanthus warscewiczianus*, *Chrysochlamys glauca* y *Vochysia guatemalensis*-

Acumuladoras de hierro (147 mg kg⁻¹ < [Fe foliar] < 287 mg kg⁻¹, n=10)

Bactris gracilior, *Bactris hondurensis*, *Cassia grandis*, *Cordia alliodora*, *Hymenaea courbaril*, *Virola koschnyi*, *Rehdera trinervis* y *Schizolobium parahyba*.

Acumuladoras de manganeso (148 mg kg⁻¹ < [Mn foliar] < 504 mg kg⁻¹, n=12)

Bactris hondurensis, *Cordia liesneri*, *Dalbergia retusa*, *Hymenaea courbaril*, *Miconia trinervia*, *Pentaclethra macroloba*, *Persea americana*, *Terminalia oblonga*, *Miconia donaeana* y *Virola sebifera*.

Acumuladoras de zinc (36 mg kg⁻¹ < [Zn foliar] < 63 mg kg⁻¹, n=12)

Asterogyne martiana, *Cordia cymosa*, *Cordia liesneri*, *Dalbergia retusa*, *Dendropanax arboreus*, *Dendropanax ravenii*, *Gmelina arborea*, *Miconia donaeana*, *Miconia trinervia*, *Rehdera trinervis*, *Sapium allenii* y *Sapium glandulosum*.

Acumuladoras de nitrógeno (3,24 mg kg⁻¹ < [N foliar] < 3,80 mg kg⁻¹, n=5)

Albizia saman, *Alnus acuminata*, *Cordia alliodora*, *Elaeis guineensis* y *Tabebuia ochracea*.

Acumuladoras de boro (>43 mg kg⁻¹ < [B foliar] < 100 mg kg⁻¹, n=13) *Brosimum*, *Bursera simaruba*, *Chrysochlamys glauca*, *Chrysochlamys skutchii*, *Dipteryx oleifera*, *Elaeis guineensis*, *Miconia dissitinervia*, *Miconia donaeana*, *Miconia trinervia*, *Pentaclethra macroloba*, *Psidium friedrichsthalianum*, *Tabebuia ochracea* y *Terminalia oblonga*.

Acumuladoras de cobre (17 mg kg⁻¹ < [Cu foliar] < 72 mg kg⁻¹, n=4)

Cordia liesneri, *Dalbergia retusa*, *Alnus acuminata* y *Virola sebifera*.

Acumuladoras de aluminio (133 mg kg⁻¹ < [Al foliar] < 11190 mg kg⁻¹, n=6)

Bactris hondurensis, *Cordia alliodora*, *Alnus acuminata*, *Lohocarpus minimifolius*, *Miconia dissitinervia*, *Virola koschnyi*, *Miconia osaensis*, *Ocotea mollifolia*, *Miconia trinervia*, *Pentaclethra macroloba*, *Psidium guajava* y *Rehdera trinervis*.

Especies hiperacumuladoras de elementos

Treinta y cuatro especies se clasificaron como hiperacumuladoras de al menos un elemento, de estas 9 hiperacumulan dos elementos (*Asterogyne martiana*, *Cordia alliodora*, *Dendropanax arboreus*, *Geonoma congesta*, *Geonoma cuneata*, *Geonoma interrupta*, *Geonoma longevaginata*, *Miconia dissitinervia* y *Synechanthus warscewiczianus*) y las otras 25 especies únicamente hiperacumularon un elemento (*Albizia guachapele*, *Bactris caudata*, *Bactris gracilior*, *Bactris hondurensis*, *Bursera simaruba*, *Chamaedorea tepejilote*, *Chrysochlamys skutchii*, *Elaeis guineensis*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Euterpe precatoria*, *Faramea occidentalis*, *Faramea permagnifolia*, *Garcinia magnifolia*, *Geonoma deversa*, *Licania corniculata*, *Miconia donaeana*, *Miconia osaensis*, *Mouriri gleasoniana*, *Pentaclethra macroloba*, *Protium pecuniosum*, *Psidium friedrichsthalianum*, *Quercus costaricensis*, *Virola koschnyi*, *Vochysia ferrugínea* y *Vochysia guatemalensis*).

La lista de elementos que se consideran hiperacumulados ordenados de mayor cantidad de especies por elemento a menor cantidad son Mn (13) > S (9) > Al (6) > Na (5) > Ca (4) > N (1) > K (1) > Mg (1) > Fe (1).

Hiperacumuladoras de N (>3,80%, n=2), *Albizia guachapele* y *Anacardium excelsum*.

Hiperacumuladoras de Ca (>2,73%, n=4) *Bursera simaruba*, *Chrysochlamys skutchii*, *Cordia alliodora* y *Miconia dissitinervia*.

Hiperacumuladoras de Mg (>0,93%, n=1) *Cordia alliodora*.

Hiperacumuladoras de K (>1,69%, n=1) *Psidium friedrichsthalianum*.

Hiperacumuladoras de S (>0,37%, n=9) *Asterogyne martiana*, *Chamaedorea tepejilote*, *Geonoma congesta*, *Geonoma cuneata*, *Geonoma interrupta*, *Geonoma longevaginata*, *Miconia dissitinervia*, *Miconia osaensis* y *Synechanthus warscewiczianus*.

Hiperacumuladoras de Na (>1419 mg kg⁻¹, n=5) *Bactris caudata*, *Bactris gracilior*, *Bactris hondurensis*, *Dendropanax arboreus* y *Licania corniculata*.

Hiperacumuladoras de Fe (>287 mg kg⁻¹, n=1) *Pentaclethra macroloba*.

Hiperacumuladoras de Mn (>504 mg kg⁻¹, n=13) *Asterogyne martiana*, *Dendropanax arboreus*, *Euterpe precatoria*, *Garcinia magnifolia*, *Geonoma congesta*, *Geonoma cuneata*, *Geonoma deversa*, *Geonoma interrupta*, *Geonoma longevaginata*, *Protium pecuniosum*, *Quercus costaricensis*, *Synechanthus warscewiczianus* y *Virola koschnyi*.

Hiperacumuladoras de Cu (>72 mg kg⁻¹, n=1) *Elaeis guineensis*.

Hiperacumuladoras de Al (>11.190 mg kg⁻¹, n=6) *Faramea occidentalis*, *Faramea permagnifolia*, *Miconia donaeana*, *Mouriri gleasoniana*, *Vochysia ferrugínea* y *Vochysia guatemalensis*.

Cuadro 3.1. Tabla de clasificación de especies forestales según la concentración foliar de cada elemento, con el número de registros por especie (“n”), la cantidad de nutrimentos de cada especie por categoría (Min, Acum e Hiper). Los elementos que se encuentran por debajo del percentil 25 de la base general se consideran poco acumulados (Min), los que se encuentra entre el percentil 25 y el 80 son elementos que se encuentran dentro del rango general (Gen), los que se encuentran entre el percentil 80 y 95 se consideran elementos acumulados y los que se encuentran por encima del percentil 95 son hiper-acumulados (Hiper).

Especie	n	Min	Acum	Hiper	N	Ca	Mg	K	P	S	Na	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Al
<i>Albizia guachapele</i>	6	1	1	1	Hiper	Gen	Gen	Acum	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Gen
<i>Albizia saman</i>	17	3	1	0	Acum	Gen	Min	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Min	Gen	Gen	Gen
<i>Alnus acuminata</i>	300	3	4	0	Acum	Min	Min	Gen	Acum	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Acum	Acum
<i>Anacardium Minelsum</i>	6	7	0	0	Min	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Min	Min	Min	Min	Gen	Min
<i>Ardisia compressa</i>	9	2	2	0	Gen	Gen	Gen	Acum	Min	Gen	Acum	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Gen
<i>Ardisia dunlapiana</i>	10	3	1	0	Min	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Acum	Min	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen
<i>Asterogyne martiana</i>	9	4	1	2	Min	Min	Min	Gen	Gen	Hiper	Gen	Gen	Hiper	Acum	Min	Gen	Gen
<i>Astronium graveolens</i>	7	1	0	0	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Gen	Gen
<i>Bactris gasipaes</i>	566	2	0	0	Gen	Min	Gen	Gen	Gen	Gen		Gen	Gen	Gen	Min	Gen	
<i>Bactris hondurensis</i>	6	2	4	1	Gen	Min	Gen	Gen	Gen	Acum	Hiper	Acum	Acum	Gen	Min	Gen	Acum
<i>Brosimum</i>	6	2	3	0	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Acum	Acum	Min	Acum	Gen	Gen
<i>Bursera simaruba</i>	6	2	2	1	Gen	Hiper	Acum	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Acum	Min	Gen
<i>Calophyllum brasiliense</i>	40	5	1	0	Min	Gen	Min	Min	Min	Gen	Acum	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Gen
<i>Carapa nicaraguensis</i>	9	4	0	0	Min	Gen	Gen	Min	Min	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Gen
<i>Cassia grandis</i>	6	2	2	0	Gen	Acum	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Acum	Min	Gen	Gen	Min	Gen
<i>Cedrela odorata</i>	65	3	1	0	Gen	Acum	Min	Min	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Gen	Gen
<i>Chamaedorea deckeriana</i>	6	0	2	0	Gen	Gen	Gen	Acum	Gen	Acum	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen
<i>Chamaedorea tepejilote</i>	6	1	2	1	Gen	Acum	Gen	Acum	Gen	Hiper	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Gen
<i>Chrysochlamys glauca</i>	7	3	4	0	Gen	Acum	Acum	Min	Min	Gen	Acum	Gen	Min	Gen	Acum	Gen	Gen
<i>Chrysochlamys skutchii</i>	9	7	2	1	Min	Hiper	Acum	Min	Min	Min	Gen	Min	Min	Gen	Acum	Gen	Min
<i>Cochlospermum vitifolium</i>	12	1	0	0	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen
<i>Cordia alliodora</i>	42	0	3	2	Acum	Hiper	Hiper	Gen	Gen	Gen	Gen	Acum	Gen	Gen	Gen	Gen	Acum
<i>Cordia cymosa</i>	10	1	3	0	Gen	Acum	Gen	Gen	Min	Gen	Acum	Gen	Gen	Acum	Gen	Gen	Gen
<i>Cordia liesneri</i>	9	2	5	0	Gen	Gen	Acum	Gen	Min	Acum	Gen	Min	Acum	Acum	Gen	Acum	Gen
<i>Cordia megalantha</i>	10	3	3	0	Gen	Acum	Acum	Acum	Gen	Gen	Min	Min	Min	Gen	Gen	Gen	Gen
<i>Dalbergia retusa</i>	55	0	4	0	Gen	Acum	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Acum	Acum	Gen	Acum	Gen
<i>Dendropanax arboreus</i>	14	2	2	2	Min	Gen	Gen	Acum	Min	Gen	Hiper	Gen	Hiper	Acum	Gen	Gen	Gen
<i>Dendropanax ravenii</i>	10	4	4	0	Min	Gen	Acum	Acum	Min	Min	Acum	Min	Gen	Acum	Gen	Gen	Gen
<i>Dipteryx oleifera</i>	38	2	1	0	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Gen	Acum	Gen	Gen
<i>Elaeis guineensis</i>	271	4	4	1	Acum	Gen	Acum	Min	Gen	Acum	Gen	Min	Min	Min	Acum	Hiper	Gen
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	14	1	2	1	Hiper	Min	Acum	Acum	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen
<i>Euterpe precatoria</i>	17	4	0	1	Gen	Min	Min	Min	Min	Gen	Gen	Gen	Hiper	Gen	Gen	Gen	Gen
<i>Fareaea occidentalis</i>	10	4	1	1	Min	Acum	Gen	Min	Min	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Gen	Gen	Hiper

<i>Fareamea permagnifolia</i>	11	7	1	1	Min	Gen	Acum	Min	Min	Min	Gen	Min	Gen	Min	Gen	Min	Hiper
<i>Garcinia</i>	10	6	1	0	Min	Acum	Min	Gen	Min	Gen	Gen	Min	Min	Gen	Gen	Gen	Min
<i>Garcinia intermedia</i>	5	5	0	0	Min	Gen	Min	Gen	Min	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Min	Gen
<i>Garcinia madruno</i>	11	7	2	0	Min	Acum	Gen	Min	Min	Gen	Acum	Min	Min	Gen	Gen	Min	Min
<i>Garcinia magnifolia</i>	10	7	0	1	Min	Gen	Gen	Min	Min	Gen	Gen	Min	Hiper	Gen	Min	Min	Min
<i>Geonoma congesta</i>	13	1	1	2	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Hiper	Acum	Gen	Hiper	Gen	Min	Gen	Gen
<i>Geonoma cuneata</i>	18	1	2	2	Gen	Gen	Acum	Gen	Min	Hiper	Acum	Gen	Hiper	Gen	Gen	Gen	Gen
<i>Geonoma deversa</i>	8	6	2	1	Min	Min	Min	Min	Min	Acum	Acum	Gen	Hiper	Gen	Min	Gen	Gen
<i>Geonoma interrupta</i>	6	2	0	2	Gen	Min	Gen	Gen	Gen	Hiper	Gen	Gen	Hiper	Gen	Min	Gen	Gen
<i>Geonoma longevaginata</i>	5	3	1	2	Gen	Min	Gen	Gen	Min	Hiper	Acum	Gen	Hiper	Gen	Min	Gen	Gen
<i>Gmelina arborea</i>	214	0	1	0	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Acum	Gen	Gen	Gen
<i>Guatteria amplifolia</i>	10	6	0	0	Min	Gen	Gen	Min	Min	Gen	Gen	Min	Gen	Min	Gen	Gen	Min
<i>Guatteria chiriquiensis</i>	9	1	0	0	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen
<i>Guatteria pudica</i>	10	2	0	0	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Min
<i>Guatteria pudica</i>	9	4	0	0	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Min	Min	Gen	Gen	Gen	Min
<i>Guazuma ulmifolia</i>	11	0	1	0	Gen	Gen	Gen	Acum	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen
<i>Hieronyma alchorneoides</i>	51	1	0	0	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen
<i>Hymenaea courbaril</i>	35	4	2	0	Min	Gen	Gen	Min	Min	Min	Gen	Acum	Acum	Gen	Gen	Gen	Gen
<i>Inga</i>	18	4	2	0	Gen	Gen	Min	Min	Min	Gen	Gen	Acum	Acum	Min	Gen	Gen	Gen
<i>Inga skutchii</i>	10	2	1	0	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Gen	Acum	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Gen
<i>Inga spectabilis</i>	8	4	0	0	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Min
<i>Licania corniculata</i>	9	5	0	1	Min	Gen	Gen	Min	Min	Gen	Hiper	Min	Min	Gen	Gen	Gen	Gen
<i>Lohocarpus minimifolius</i>	6	0	3	0	Gen	Acum	Gen	Acum	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Acum
<i>Miconia dissitinervia</i>	10	3	3	2	Min	Hiper	Gen	Gen	Min	Hiper	Acum	Min	Gen	Gen	Acum	Gen	Acum
<i>Miconia donaeana</i>	10	2	4	1	Gen	Acum	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Min	Acum	Acum	Acum	Gen	Hiper
<i>Miconia osaensis</i>	10	5	2	1	Min	Acum	Gen	Min	Min	Hiper	Gen	Min	Min	Gen	Gen	Gen	Acum
<i>Miconia trinervia</i>	10	2	7	0	Gen	Gen	Acum	Acum	Min	Acum	Gen	Min	Acum	Acum	Acum	Gen	Acum
<i>Minuartia guianensis</i>	7	1	0	0	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen
<i>Ocotea mollifolia</i>	10	5	1	0	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Min	Gen	Min	Min	Gen	Min	Gen	Acum
<i>Ocotea rivularis</i>	9	4	0	0	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Min	Min	Gen	Min	Gen	Gen
<i>Pachira quinata</i>	93	2	2	0	Gen	Acum	Gen	Gen	Acum	Gen	Gen	Gen	Min	Min	Gen	Gen	Gen
<i>Pentaclethra macroloba</i>	8	5	3	1	Gen	Min	Min	Min	Min	Gen	Gen	Hiper	Acum	Min	Acum	Gen	Acum
<i>Persea americana</i>	111	1	1	0	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Acum	Gen	Gen	Gen	Gen
<i>Platymiscium</i>	8	0	1	0	Gen	Acum	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen
<i>Pouteria lecythidicarpa</i>	9	7	0	0	Min	Gen	Min	Gen	Min	Gen	Gen	Min	Min	Min	Gen	Gen	Min
<i>Pouteria subrotata</i>	8	4	2	0	Gen	Acum	Gen	Gen	Min	Gen	Acum	Min	Min	Gen	Gen	Min	Gen
<i>Pouteria torta</i>	10	8	0	0	Min	Min	Min	Min	Min	Gen	Gen	Min	Gen	Min	Min	Gen	Gen
<i>Pouteria triplarifolia</i>	6	7	1	0	Min	Acum	Min	Gen	Min	Gen	Gen	Min	Min	Gen	Gen	Min	Min
<i>Protium panamense</i>	10	5	0	0	Min	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Min	Min	Min	Gen	Gen	Gen
<i>Protium pecuniosum</i>	14	3	0	1	Min	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Gen	Hiper	Min	Gen	Gen	Gen

<i>Psidium friedrichsthalianum</i>	10	0	2	1	Gen	Acum	Gen	Hiper	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Acum	Gen	Gen
<i>Psidium guajava</i>	20	0	2	0	Gen	Gen	Gen	Acum	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Acum
<i>Quercus costaricensis</i>	11	6	0	1	Min	Min	Min	Gen	Min	Min	Gen	Gen	Hiper	Min	Gen	Gen	Gen
<i>Rehdera trinervis</i>	7	0	3	0	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Acum	Gen	Acum	Gen	Gen	Acum
<i>Sapium allenii</i>	10	3	2	0	Gen	Acum	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Min	Acum	Gen	Gen	Min
<i>Sapium glandulosum</i>	10	1	2	0	Gen	Acum	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Acum	Gen	Gen	Gen
<i>Schizolobium parahyba</i>	48	4	1	0	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Min	Min	Acum	Gen	Min	Gen	Gen	Gen
<i>Swietenia macrophylla</i>	65	3	1	0	Gen	Acum	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Gen	Min	Min	Gen	Gen	Gen
<i>Synechanthus warscewiczianus</i>	6	1	1	2	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Hiper	Acum	Gen	Hiper	Gen	Min	Gen	Gen
<i>Tabebuia ochracea</i>	7	0	4	0	Acum	Gen	Gen	Acum	Gen	Acum	Gen	Gen	Gen	Gen	Acum	Gen	Gen
<i>Tabebuia rosea</i>	9	2	0	0	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Min	Gen	Gen
<i>Tectona grandis</i>	371	1	0	0	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen	Gen
<i>Terminalia oblonga</i>	52	4	2	0	Min	Gen	Gen	Min	Min	Min	Gen	Gen	Acum	Gen	Acum	Gen	Gen
<i>Unonopsis osae</i>	9	7	0	0	Min	Min	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Min	Min	Min	Gen	Gen	Min
<i>Unonopsis theobromifolia</i>	10	7	0	0	Gen	Min	Min	Min	Min	Gen	Gen	Gen	Min	Min	Min	Gen	Gen
<i>Virola koschnyi</i>	12	2	4	1	Gen	Gen	Gen	Gen	Min	Acum	Acum	Acum	Hiper	Min	Gen	Gen	Acum
<i>Virola sebifera</i>	15	1	3	0	Min	Gen	Gen	Acum	Gen			Gen	Acum	Gen		Acum	Gen
<i>Vochysia ferruginea</i>	10	5	0	1	Min	Gen	Min	Gen	Min	Min	Gen	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Hiper
<i>Vochysia guatemalensis</i>	54	3	1	1	Gen	Gen	Gen	Min	Min	Gen	Acum	Gen	Gen	Min	Gen	Gen	Hiper

Cuadro 3.2. Rangos entre el percentil 25 y 80 de la concentración foliar de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu, B, Al y Na, de 96 especies forestales.

Elemento	(n)	N	Ca	Mg	K	P	S	Na	Fe	Mn	Zn	B	Cu	Al
Especie		%												
		mg kg ⁻¹												
<i>Albizia guachapele</i>	6	4,7-5,3	0,6-0,9	0,2-0,4	0,8-1,6	0,16-0,24	0,22-0,26	47-71	88-179	36-77	20-33	7-31	7-8	31-104
<i>Albizia saman</i>	17	3,1-4,9	0,5-1	0,1-0,2	1-1,6	0,13-0,21	0,19-0,28	50-113	77-272	18-58	13-20	9-19	7-15	57-158
<i>Alnus acuminata</i>	300	3,3-3,9	0,4-0,6	0,2-0,2	1-1,3	0,25-0,32	0,13-0,21	66-123	66-92	29-57	29-41	12-19	17-23	16-410
<i>Anacardium excelsum</i>	6	1,4-1,6	0,5-0,7	0,4-0,5	1,1-1,3	0,14-0,19	0,1-0,1	41-79	45-84	10-17	14-17	11-14	7-8	21-41
<i>Ardisia compressa</i>	9	1,8-2	1,1-1,5	0,3-0,5	1,1-1,4	0,08-0,12	0,2-0,33	274-554	53-77	45-100	23-28	12-14	12-14	25-62
<i>Ardisia dunlapiana</i>	10	1,1-1,3	1,1-2,1	0,2-0,3	0,7-1,8	0,05-0,06	0,15-0,16	378-2986	37-73	27-41	16-24	15-19	10-19	21-56
<i>Asterogyne martiana</i>	9	1,7-1,9	0,4-0,6	0,2-0,2	0,8-1,4	0,1-0,12	0,38-0,52	115-221	56-81	501-1168	31-40	11-12	8-10	28-51
<i>Astronium graveolens</i>	7	2,5-3	1,1-1,6	0,3-0,4	0,8-1,1	0,13-0,18	0,17-0,23	75-306	91-304	15-26	13-20	16-39	8-11	25-235
<i>Bactris gasipaes</i>	566	2-3,1	0,4-0,7	0,3-0,4	1,1-1,4	0,18-0,26	0,13-0,16		101-160	70-135	20-33	3-27	4-9	0-0
<i>Bactris hondurensis</i>	6	2,2-2,6	0,2-0,4	0,3-0,4	0,6-0,9	0,11-0,13	0,32-0,38	6365-9026	120-243	285-551	15-18	10-12	7-8	96-202
<i>Brosimum</i>	6	1,7-2,5	0,8-1,4	0,3-0,5	0,6-1	0,07-0,11	0,14-0,17	93-1293	144-236	158-380	14-18	37-60	6-7	96-252
<i>Bursera simaruba</i>	6	2,1-2,3	1,9-3	0,4-0,7	0,9-1,1	0,1-0,16	0,17-0,22	94-112	77-123	34-65	14-16	40-56	4-6	57-78
<i>Calophyllum brasiliense</i>	40	1,4-1,8	0,7-1,2	0,1-0,2	0,4-1	0,07-0,16	0,12-0,18	341-824	107-164	32-101	12-18	25-31	10-17	40-100
<i>Carapa nicaraguensis</i>	9	1,4-1,8	1-2	0,2-0,2	0,4-0,8	0,07-0,11	0,16-0,2	61-673	60-230	34-64	16-23	9-24	6-10	41-124
<i>Cassia grandis</i>	6	2,3-2,5	1,9-3,1	0,2-0,2	0,6-0,8	0,12-0,17	0,22-0,26	64-85	135-214	27-43	19-26	18-27	4-6	62-190

<i>Cedrela odorata</i>	65	2,7-3,4	1,1-2,6	0,2-0,2	0,4-1,2	0,19-0,26	0,21-0,28	34-78	84-226	27-43	29-43	22-37	5-9	40-95
<i>Chamaedorea deckeriana</i>	6	2,5-2,9	1,3-1,7	0,3-0,4	1,5-1,8	0,13-0,14	0,31-0,67	128-195	85-101	36-47	21-22	26-33	10-12	34-58
<i>Chamaedorea tepejilote</i>	6	3,2-3,5	1,7-2	0,3-0,3	1,3-1,6	0,19-0,22	0,47-0,59	61-105	97-121	37-83	20-22	14-17	9-9	49-66
<i>Chrysochlamys glauca</i>	7	1,9-2,5	2,3-2,9	0,4-0,6	0,4-0,7	0,08-0,13	0,21-0,28	326-588	65-85	20-49	25-93	91-116	9-15	33-93
<i>Chrysochlamys skutchii</i>	9	1-1,3	2,2-3,5	0,5-0,7	0,3-0,6	0,04-0,05	0,13-0,14	149-289	33-53	23-34	19-27	64-86	6-10	18-44
<i>Cochlospermum vitifolium</i>	12	2,8-3,4	0,7-0,9	0,2-0,3	1,1-1,5	0,14-0,19	0,14-0,21	27-37	63-146	33-67	16-21	23-40	7-10	37-77
<i>Cordia alliodora</i>	42	3,1-3,7	2,8-3,7	0,9-1,1	1-1,4	0,14-0,17	0,16-0,19	36-64	122-209	32-62	23-34	26-40	13-19	99-293
<i>Cordia cymosa</i>	10	2-2,4	0,8-2,1	0,3-0,4	1-1,4	0,08-0,11	0,15-0,26	478-1784	58-351	81-145	28-39	24-34	14-20	36-459
<i>Cordia liesneri</i>	9	1,8-2,1	1-2,2	0,5-0,7	1,1-1,5	0,05-0,06	0,21-0,36	231-434	41-53	170-346	36-78	26-39	24-31	21-46
<i>Cordia megalantha</i>	10	2,6-3,3	2-3,9	0,8-1	1,3-2,1	0,14-0,2	0,19-0,28	22-28	48-97	23-33	29-46	23-30	16-23	19-89
<i>Dalbergia retusa</i>	55	2,7-3,3	1,3-2,2	0,2-0,3	0,3-1,1	0,1-0,15	0,17-0,23	137-367	61-290	155-431	46-79	21-50	27-46	16-232
<i>Dendropanax arboreus</i>	14	1,5-1,8	0,9-1,3	0,3-0,4	0,9-2,2	0,06-0,08	0,18-0,28	117-4726	37-127	463-759	38-65	27-41	6-8	64-145
<i>Dendropanax ravenii</i>	10	1,7-1,9	1,2-1,6	0,5-0,7	1,3-1,8	0,07-0,08	0,11-0,13	267-2081	44-68	64-248	45-72	33-44	6-7	19-55
<i>Dipteryx oleifera</i>	38	2,4-2,8	0,6-1,1	0,2-0,2	0,7-1	0,11-0,14	0,15-0,17	20-38	82-131	93-157	20-26	48-80	7-11	60-129
<i>Elaeis guineensis</i>	271	3-3,7	0,7-1,6	0,3-0,9	0,3-0,9	0,18-0,23	0,17-0,29	27-42	31-114	16-163	10-26	18-119	8-112	21-40
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	14	3,3-4,7	0,4-0,6	0,8-1,2	1,3-2,4	0,12-0,24	0,15-0,25	13-47	87-218	33-69	13-23	17-45	5-9	38-117
<i>Euterpe precatoria</i>	17	1,8-2,5	0,4-0,8	0,2-0,3	0,4-0,7	0,09-0,17	0,15-0,19	23-64	95-144	229-1289	17-25	12-33	5-11	66-118
<i>Faramea occidentalis</i>	10	1,3-1,5	1,6-1,8	0,3-0,4	0,4-0,5	0,05-0,06	0,14-0,17	235-352	35-52	49-68	19-23	23-31	6-7	13046-15017
<i>Faramea permagnifolia</i>	11	1,1-1,2	1,4-1,9	0,7-0,8	0,2-0,8	0,04-0,05	0,13-0,15	108-238	40-49	63-126	14-17	27-36	4-5	18725-22105
<i>Garcinia</i>	10	1,1-1,4	1,5-2,1	0,2-0,2	0,6-1	0,05-0,09	0,15-0,21	28-59	23-44	12-22	30-33	15-29	5-9	13-22
<i>Garcinia madruno</i>	11	1,3-1,5	2,3-3,2	0,2-0,3	0,4-0,7	0,05-0,06	0,2-0,28	560-1776	27-37	19-29	30-46	24-30	3-4	13-19
<i>Garcinia magnifolia</i>	10	1,3-1,5	0,9-1,4	0,2-0,3	0,5-1	0,06-0,07	0,16-0,2	45-125	26-35	338-1186	21-31	14-24	4-9	12-22
<i>Geonoma congesta</i>	13	2-2,3	0,5-0,6	0,2-0,3	0,7-1,1	0,12-0,13	0,73-0,82	238-407	79-123	706-1772	29-37	11-13	9-12	39-82
<i>Geonoma cuneata</i>	18	1,7-2	0,7-1,1	0,5-0,7	0,8-1,5	0,1-0,11	0,75-1,07	652-1221	75-178	788-2120	24-41	15-18	6-9	43-104
<i>Geonoma deversa</i>	8	1,7-1,9	0,2-0,3	0,1-0,2	0,4-0,6	0,08-0,09	0,29-0,3	235-392	68-92	445-815	30-37	10-11	7-8	31-48
<i>Geonoma interrupta</i>	6	1,9-2,1	0,3-0,5	0,2-0,3	1-1,8	0,11-0,12	0,41-0,57	86-190	98-128	182-716	22-25	10-11	7-9	48-82
<i>Gmelina arborea</i>	214	2,2-3,1	1,2-2,5	0,3-0,5	0,8-1,3	0,19-0,28	0,14-0,17	19-73	48-94	40-86	45-79	32-47	7-13	19-45
<i>Guatteria amplifolia</i>	10	1,6-1,7	0,8-1,2	0,3-0,4	0,3-0,6	0,05-0,06	0,18-0,24	212-344	34-50	73-141	12-15	37-61	7-9	14-24
<i>Guatteria chiriquiensis</i>	9	2,1-2,5	1,3-2,1	0,2-0,3	0,6-0,8	0,08-0,11	0,17-0,22	186-475	48-76	35-59	16-24	21-32	10-13	27-42
<i>Guatteria pudica</i>	10	1,8-2	1,2-1,8	0,4-0,4	0,4-1,1	0,07-0,08	0,16-0,22	115-346	53-72	35-78	15-20	23-36	7-9	18-28
<i>Guatteria pudica</i>	9	2-2,3	0,7-1	0,2-0,3	0,4-0,8	0,09-0,11	0,14-0,17	129-177	35-64	23-31	14-18	20-33	9-10	12-26
<i>Guazuma ulmifolia</i>	11	2-2,3	1,2-1,5	0,4-0,5	1,2-1,6	0,11-0,16	0,15-0,23	44-75	98-187	35-58	16-20	27-38	10-16	71-204
<i>Hieronyma alchorneoides</i>	51	1,9-2,5	0,7-0,9	0,2-0,4	0,8-1,5	0,14-0,19	0,11-0,17	76-155	84-163	29-140	17-28	14-21	11-17	26-70
<i>Hymenaea courbaril</i>	35	1,6-2,1	0,5-0,8	0,2-1,1	0,2-0,7	0,08-0,14	0,1-0,15	30-127	84-417	177-347	21-29	10-22	7-14	57-1517
<i>Inga</i>	18	2,8-3,6	0,4-0,9	0,1-0,2	0,4-0,6	0,08-0,14	0,14-0,19	91-418	109-244	106-390	10-14	14-25	10-18	69-162
<i>Inga skutchii</i>	10	3,1-3,3	0,8-1,2	0,1-0,2	0,5-0,9	0,1-0,13	0,14-0,17	419-839	50-100	45-65	13-20	14-22	11-15	21-60
<i>Inga spectabilis</i>	8	2,8-3,2	0,3-0,7	0,1-0,1	0,7-0,9	0,12-0,14	0,12-0,13	152-188	54-70	37-94	16-20	12-15	12-18	16-30
<i>Licania corniculata</i>	9	1,2-1,3	0,5-1,3	0,2-0,3	0,3-0,8	0,06-0,09	0,14-0,17	1417-2422	32-48	11-22	22-34	14-21	9-12	21-43
<i>Lohocarpus minimifolius</i>	6	3-3,6	1,4-2,3	0,2-0,4	1,4-1,6	0,13-0,19	0,19-0,22	31-67	119-263	40-91	27-37	25-32	9-13	139-409
<i>Miconia dissitinervia</i>	10	1,5-1,7	2,5-3,3	0,2-0,4	0,6-0,9	0,05-0,07	0,38-0,51	508-718	46-63	27-58	25-37	46-66	8-11	5680-6837

<i>Miconia donaeana</i>	10	1,9-2,1	2,1-3,1	0,3-0,3	0,5-0,8	0,06-0,08	0,14-0,19	168-268	44-54	140-300	48-63	47-56	6-10	22112-29060
<i>Miconia osaensis</i>	10	1,4-1,6	1,7-2	0,2-0,3	0,2-0,3	0,05-0,07	0,5-0,65	180-276	33-43	24-46	21-27	23-34	7-11	5821-8501
<i>Miconia trinervia</i>	10	1,8-2,1	0,7-0,9	0,5-0,7	1,2-1,6	0,06-0,12	0,26-0,4	261-423	47-60	168-449	34-45	46-52	7-9	5541-7443
<i>Minuartia guianensis</i>	7	2,2-2,8	0,5-1	0,2-0,3	0,5-1	0,13-0,18	0,14-0,16	57-685	75-104	58-103	16-19	23-29	7-10	47-143
<i>Ocotea mollifolia</i>	10	1,8-2,1	0,6-0,9	0,3-0,3	0,7-1	0,06-0,07	0,09-0,11	171-337	44-66	11-28	14-20	13-23	7-12	121-176
<i>Ocotea rivularis</i>	9	1,7-2,3	0,5-1	0,2-0,3	1-1,4	0,08-0,11	0,13-0,15	65-172	22-57	20-35	13-21	9-16	8-10	33-73
<i>Pachira quinata</i>	93	2,3-2,7	1,6-2,2	0,3-0,4	0,7-1	0,23-0,31	0,15-0,17	43-104	74-117	20-34	14-19	27-34	6-14	25-89
<i>Pentaclethra macroloba</i>	8	2,3-2,7	0,4-0,6	0,1-0,2	0,3-0,5	0,08-0,1	0,15-0,17	56-123	301-2055	326-545	13-17	41-55	6-9	329-2478
<i>Persea americana</i>	111	2,3-2,9	0,7-1,6	0,3-0,4	0,9-1,5	0,13-0,19	0,18-0,24	10-29	54-85	142-484	27-50	22-41	9-41	23-65
<i>Platymiscium</i>	8	2,7-3,2	1,8-3	0,4-0,5	0,7-1,5	0,14-0,26	0,17-0,21	37-203	63-94	31-53	19-23	15-25	13-18	28-57
<i>Pouteria lecythidicarpa</i>	9	1,3-1,9	0,8-1,7	0,2-0,2	0,5-0,9	0,04-0,11	0,16-0,18	88-198	26-43	21-28	12-17	20-23	6-8	17-25
<i>Pouteria subrotata</i>	8	2,1-2,6	1,8-2,4	0,2-0,3	0,7-1,3	0,1-0,11	0,19-0,23	255-685	35-54	18-35	22-24	18-26	3-4	22-30
<i>Pouteria torta</i>	10	1,5-1,9	0,4-0,6	0,1-0,2	0,6-0,7	0,04-0,07	0,19-0,23	144-326	39-59	50-414	11-12	11-15	5-8	22-38
<i>Pouteria triplarifolia</i>	6	1,2-1,5	1,6-2,1	0,1-0,2	0,7-0,9	0,06-0,08	0,19-0,24	218-271	34-41	14-31	16-16	22-36	5-5	18-29
<i>Protium panamense</i>	10	1,5-1,9	1-2,2	0,2-0,3	0,5-0,9	0,09-0,12	0,17-0,2	111-218	43-67	24-36	12-19	17-25	5-8	26-40
<i>Protium pecuniosum</i>	14	1,5-2	0,6-0,8	0,2-0,3	0,8-1,1	0,07-0,1	0,19-0,31	109-190	51-168	388-1223	9-15	19-30	6-8	27-133
<i>Psidium friedrichsthalianum</i>	10	2,2-2,7	1,4-2,3	0,2-0,3	1,7-2,6	0,13-0,21	0,16-0,19	73-99	50-71	57-99	24-37	37-67	8-26	30-55
<i>Psidium guajava</i>	20	2,1-2,4	0,9-1,1	0,2-0,3	1,4-1,9	0,15-0,19	0,22-0,28	36-82	97-218	31-154	17-20	28-36	10-19	112-212
<i>Quercus costaricensis</i>	11	1,5-2,3	0,5-0,7	0,1-0,2	0,6-0,8	0,08-0,11	0,09-0,15	46-171	68-122	214-990	15-16	13-22	7-10	68-170
<i>Rehdera trinervis</i>	7	2-3,1	1,1-1,4	0,3-0,4	1,1-1,7	0,11-0,2	0,17-0,22	33-65	153-641	29-53	35-44	25-29	11-16	164-805
<i>Sapium allenii</i>	10	2,1-2,9	1-2,4	0,3-0,5	0,9-2	0,21-0,33	0,18-0,21	92-219	45-74	22-54	35-48	22-40	7-9	15-57
<i>Sapium glandulosum</i>	10	2-2,3	1,6-2,4	0,4-0,6	0,7-1,3	0,13-0,26	0,18-0,22	188-608	42-57	35-82	37-62	14-34	6-6	21-31
<i>Schizolobium parahyba</i>	48	1,8-3,5	1,1-1,4	0,2-0,2	0,4-0,9	0,14-0,17	0,08-0,22	22-30	143-185	33-47	15-17	12-41	7-8	38-56
<i>Swietenia macrophylla</i>	65	1,7-2,5	1,3-2,9	0,2-0,3	0,5-1,3	0,09-0,14	0,21-0,31	24-239	53-136	17-49	12-14	18-37	5-12	18-78
<i>Synechanthus warscewiczianus</i>	6	3-3,2	0,6-1,2	0,3-0,4	0,7-0,9	0,11-0,12	0,37-0,43	225-1199	110-195	360-1424	17-19	14-15	15-22	72-205
<i>Tabebuia ochracea</i>	7	3-3,7	1,2-1,8	0,4-0,6	0,9-1,5	0,16-0,19	0,22-0,27	27-50	118-279	39-77	19-23	41-61	13-15	59-204
<i>Tabebuia rosea</i>	9	2-2,5	1,4-1,7	0,3-0,4	0,7-0,9	0,11-0,15	0,18-0,24	137-517	60-146	25-44	15-25	14-19	9-12	24-88
<i>Tectona grandis</i>	371	1,7-2,4	0,8-1,9	0,3-0,9	0,4-1,1	0,12-0,21	0,13-0,2	13-56	44-108	32-72	22-33	20-37	8-14	21-46
<i>Terminalia oblonga</i>	52	1,6-1,9	1,1-1,9	0,2-0,3	0,5-0,8	0,09-0,14	0,11-0,14	46-118	50-114	103-267	15-22	34-59	7-12	36-96
<i>Unonopsis osae</i>	9	1,8-1,9	0,4-0,7	0,2-0,3	0,4-0,9	0,05-0,08	0,19-0,23	98-303	36-52	28-56	11-16	18-24	7-8	21-30
<i>Unonopsis theobromifolia</i>	10	1,9-2	0,4-0,5	0,2-0,2	0,5-0,8	0,07-0,12	0,19-0,21	111-158	57-83	17-42	14-18	13-17	7-10	34-59
<i>Virola koschnyi</i>	12	1,8-2,3	0,5-1,1	0,2-0,2	0,4-1,1	0,07-0,09	0,25-0,33	154-1101	141-719	490-1161	14-18	18-32	14-22	123-727
<i>Virola sebifera</i>	15	1,3-2,1	0,7-0,8	0,1-0,3	0,9-1,9	0,16-0,25			121-194	65-204	18-29	0-0	16-24	80-4458
<i>Vochysia ferruginea</i>	10	1,6-2	0,6-0,8	0,1-0,2	0,5-1	0,06-0,17	0,14-0,15	62-87	102-391	89-178	10-16	17-22	10-15	12608-15194
<i>Vochysia guatemalensis</i>	54	2,1-2,6	0,8-1,2	0,3-0,4	0,4-1,2	0,08-0,18	0,19-0,26	78-1575	49-189	74-158	12-18	20-32	5-8	18553-25156

3.5 Discusión y Conclusiones

De las 96 especies a las que se les reportó el rango de valores modales de concentración foliar, solamente 9 de ellas cuentan con publicaciones científicas donde se reportan rangos para, *Alnus acuminata* (Mills y Jones 1996, Escobar et al. 1993, Segura et al. 2006, Rodríguez et al. 1984), *Cedrela odorata* (Drechsel y Zech 1991, Paniagua 2005, Ramírez 2014), *Cordia allidora* (Drechsel y Zech 1991, Bergmann et al. 1994, Herrera y Finegan 1997, Wightman et al. 2001, Cadena 1989), *Gmelina arborea* (Drechsel y Zech 1991, Stuhmann et al. 1994, Caguasango y Cadena 2012, Avellán 2012), *Pachira quinata* (Vallejos 1996, Caguasango y Cadena 2012, Montero 1999), *Tectona grandis* (Nwoboshi 1984, 1983, Negi et al. 1995, Drechsel y Zech 1991, Boardmann et al. 1997, Montero y Kanninen 2006), *Terminalia amazonia* (Nichols et al. 1997, Montagnini 2000, Montenegro 2005, Alvarado et al. 2015), *Vochysia guatemalensis* (Cornelius y Mesen 1997, Badilla y Murillo 2014, Camacho 2014) y *Vochysia ferrugínea* (Horn y Montagnini 1999, Alvarado et al. 1997, Herrera y Finegan 1997, Arias et al. 2011).

En el caso de *Alnus acuminata* el rango de concentración foliar (%) intermedio de N propuesto en este estudio (entre 3,3 y 3,9%) se encontró por encima de lo establecido por otros autores (entre 1,92 y 3,84%) (Mills y Jones 1996, Escobar et al. 1993, Segura et al. 2006, Rodríguez et al. 1984). Por otro lado, los rangos la concentración foliar (%) de P, K, Ca, Mg y S propuestos en este estudio (P: 0,25-0,32, K: 1,0-1,3, Ca: 0,4-0,6, Mg: 0,1-0,2, S: 0,13-0,21) se encontraron dentro de los rangos propuestos en la literatura (P: 0,08-0,48, K: 0,20-0,39, Ca: 0,16-0,61, Mg: 0,10-0,34, S: 0,13-0,21).

En el Cuadro 3.2 se muestra una herramienta para la interpretación de análisis foliares de 96 especies forestales, o cuadro de valores intermedios de la concentración foliar de N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Na y Al, proporcionado como un método de diagnóstico foliar para especies forestales, basado en la comparación con otros individuos de la misma especie.

En el caso de la concentración foliar de los micronutrientes (mg kg^{-1}) los rangos intermedios propuestos en este estudio (Fe: 66-92, Mn: 29-57, B: 12-19, Zn: 29-41, Cu: 17-23) también se encontraron dentro de los rangos propuestos en la literatura (Fe: 48-104, Mn: 12-1014, B: 12-50, Zn: 12-80, Cu: 3-30). En el caso de la concentración foliar de Na y Al, no se encontraron referencias al respecto (Mills y Jones 1996, Escobar et al. 1993, Segura et al. 2006, Rodríguez et al. 1984).

Los rangos intermedios de concentración foliar de nutrientes (%) propuestos para *Cedrela odorata* son, N: 2,7-3,4, Ca: 1,1-2,6, Mg: 0,15-0,24, K: 0,4-1,2, P: 0,19-0,26, S: 0,21-0,28, y de los micronutrientes (mg kg^{-1}), Na: 34-78, Fe: 84-226, Mn: 27-43, Zn: 29-43, B: 22-37, Cu: 5-9, Al: 40-95), estuvieron dentro de los rangos establecidos por Drechsel y Zech (1991), Paniagua (2005) y

Ramírez (2014), (N: 1,67-3,5%, Ca: 0,42-2,5%, Mg: 0,03-0,47%, K: 0,7-2,4%, P: 0,1-0,3%, S: 0,15-0,42%, Na: 10-862 mg kg⁻¹, Fe: 50-534 mg kg⁻¹, Mn: 10-177 mg kg⁻¹, Zn: 5-72 mg kg⁻¹, B: 5-37 mg kg⁻¹, Cu: 5-24 mg kg⁻¹, Al: 20-148 mg kg⁻¹).

Los rangos intermedios de concentración foliar de nutrimentos (%) propuestos para *Gmelina arborea* (N: 2,2-3,1, Ca: 1,2-2,5, Mg: 0,3-0,5, K: 0,8-1,3, P: 0,19-0,28, S: 0,14-0,17 y de los micronutrimentos (mg kg⁻¹) Fe: 48-94, Mn: 40-86, Zn: 45-79, B: 34-47, Cu: 7-13, Al: 19-45, estuvieron dentro de los rangos establecidos para la especie por Drechsel y Zech (1991), Stuhmann et al. (1994), Caguasango y Cadena (2012) y Avellán (2012), (N: 1,75-3,92%, Ca: 0,53-3,18%, Mg: 0,16-0,94%, K: 0,39-1,63%, P: 0,08-0,36%, S: 0,1-0,2%, Fe: 24-255 mg kg⁻¹, Mn: 14-312 mg kg⁻¹, Zn: 16-105 mg kg⁻¹, B: 12-65 mg kg⁻¹, Cu: 4-19 mg kg⁻¹, Al: 10-132 mg kg⁻¹). En el caso del sodio no se encontraron reportes de concentración foliar para *Gmelina arborea*.

Los rangos intermedios de concentración foliar de nutrimentos (%) propuestos para *Tectona grandis* (N: 1,7-2,4%, Ca: 0,8-1,9%, Mg: 0,3-0,9%, K: 0,4-1,1%, P: 0,12-0,21%, S: 0,13-0,2%, Fe: 44-108 mg kg⁻¹, Mn: 32-72 mg kg⁻¹, Zn: 22-33 mg kg⁻¹, B: 20-37 mg kg⁻¹, Cu: 8-14 mg kg⁻¹, Al: 21-46 mg kg⁻¹), estuvieron dentro de los rangos establecidos por, (N: 1,14-2,78%, Ca: 0,5-2,2%, Mg: 0,12-0,57%, K: 0,26-2,32%, P: 0,05-0,29%, S: 0,11-0,25%, Fe: 33-390 mg kg⁻¹, Mn: 14-135 mg kg⁻¹, Zn: 14-67 mg kg⁻¹, B: 15-54 mg kg⁻¹, Cu: 4-25 mg kg⁻¹, Al: 20-220 mg kg⁻¹). En el caso del sodio no se encontraron reportes de concentración foliar para *Tectona grandis*.

Los rangos intermedios de concentración foliar de nutrimentos (%) propuestos para *Terminalia amazonia* (N: 1,6-1,9%, Ca: 1,1-1,9%, Mg: 0,2-0,3%, K: 0,5-0,8%, P: 0,09-0,14%, S: 0,11-0,14%, Na: 46-118 mg kg⁻¹, Fe: 50-114 mg kg⁻¹, Mn: 103-267 mg kg⁻¹, Zn: 15-22 mg kg⁻¹, B: 34-59 mg kg⁻¹, Cu: 7-12 mg kg⁻¹, Al: 36-96 mg kg⁻¹), estuvieron dentro de los rangos establecidos por Nichols et al. (1997), Montagnini (2000), Montenegro (2004) y Alvarado et al. (2015), (N: 1,1-2,1%, Ca: 0,5-1,7%, Mg: 0,1-0,3%, K: 0,5-1,4%, P: 0,1-0,25%, S: 0,10-0,15%, Na: 0,02-80 mg kg⁻¹, Fe: 30-100 mg kg⁻¹, Mn: 40-350 mg kg⁻¹, Zn: 6-30 mg kg⁻¹, B: 10-40 mg kg⁻¹, Cu: 5-25 mg kg⁻¹, Al: 10-150 mg kg⁻¹).

Los rangos intermedios de concentración foliar de nutrimentos (%) propuestos para *Vochysia guatemalensis* (N: 2,1-2,6%, Ca: 0,8-1,2%, Mg: 0,3-0,4%, K: 0,4-1,2%, P: 0,08-0,18%, S: 0,19-0,26%, Fe: 49-189 mg kg⁻¹, Mn: 74-158 mg kg⁻¹, Zn: 12-18 mg kg⁻¹, B: 20-32 mg kg⁻¹, Cu: 5-8 mg kg⁻¹, Al: 18.553-25.156 mg kg⁻¹), estuvieron dentro de los rangos establecidos por Cornelius y Mesen (1997), Badilla-Valverde y Murillo-Gamboa (2014) y Camacho (2014), (N: 1,23-3,15%, Ca: 0,63-1,65%, Mg: 0,15-0,50%, K: 0,29-1,46%, P: 0,07-0,23%, S: 0,13-0,20%, Fe: 34-384 mg kg⁻¹, Mn: 50-320 mg kg⁻¹,

Zn: 10-34 mg kg⁻¹, B: 15-55 mg kg⁻¹, Cu: 4-10 mg kg⁻¹, Al: 18.553-25.156 mg kg⁻¹). En el caso del sodio no se encontraron reportes de concentración foliar para *Vochysia guatemalensis*.

Los rangos intermedios de concentración foliar de nutrimentos (%) propuestos para *Vochysia ferruginea* (N: 1,6-2,0%, Ca: 0,6-0,8%, Mg: 0,1-0,2%, K: 0,5-1,0%, P: 0,06-0,17%, S: 0,14-0,15%, Fe: 102-391 mg kg⁻¹, Mn: 89-178 mg kg⁻¹, Zn: 10-16 mg kg⁻¹, B: 17-22 mg kg⁻¹, Cu: 10-15 mg kg⁻¹, Al: 12.608-15.194 mg kg⁻¹), estuvieron dentro de los rangos establecidos por Horn y Montagnini (1999), Alvarado et al. (1997), Herrera y Finegan (1997) y Arias et al. (2011), (N: 1,1-2,0%, Ca: 0,46-1,15%, Mg: 0,06-0,28%, K: 0,22-0,50%, P: 0,05-0,14%, S: 0,1-0,2%, Fe: 50-400 mg kg⁻¹, Mn: 40-500 mg kg⁻¹, Zn: 2-14 mg kg⁻¹, B: 10-40 mg kg⁻¹, Cu: 4-12 mg kg⁻¹, Al: 7300-18866 mg kg⁻¹). En el caso de la concentración foliar de sodio el rango reportado en la literatura fue menor (5-8 mg kg⁻¹) que el rango reportado en este estudio para *Vochysia ferruginea* (62-87 mg kg⁻¹).

Los rangos intermedios de concentración foliar de nutrimentos (%) propuestos para *Cordia alliodora* (N: 3,1-3,7%, Ca: 2,8-3,7%, Mg: 0,9-1,1%, K: 1,0-1,4%, P: 0,14-0,17%, S: 0,16-0,19%, Fe: 122-209 mg kg⁻¹, Mn: 32-62 mg kg⁻¹, Zn: 23-34 mg kg⁻¹, B: 26-40 mg kg⁻¹, Cu: 13-19 mg kg⁻¹, Al: 99-293 mg kg⁻¹), estuvieron dentro de los rangos establecidos por Drechsel y Zech (1991), Bergmann et al. (1994), Herrera y Finegan (1997), Wightman et al. (2001) y Cadena (1989), (N: 1,58-3,33%, Ca: 0,1-2,6%, Mg: 0,09-2,54%, K: 1,0-1,4%, P: 0,11-0,71%, S: 0,17-0,30%, Fe: 23-233 mg kg⁻¹, Mn: 6-77 mg kg⁻¹, B: 14-70 mg kg⁻¹, Al: 37-320 mg kg⁻¹). En el caso del sodio, el zinc y el cobre no se encontraron reportes de concentración foliar para *Cordia alliodora*.

Los rangos intermedios de concentración foliar de nutrimentos propuestos para *Pachira quinata* (N: 2,3-2,7%, Ca: 1,6-2,2%, Mg: 0,3-0,4%, K: 0,7-1,0%, P: 0,23-0,31%, S: 0,15-0,17%, Fe: 74-117 mg kg⁻¹, Mn: 20-34 mg kg⁻¹, Zn: 14-19 mg kg⁻¹, B: 27-34 mg kg⁻¹, Cu: 6-14 mg kg⁻¹, Al: 25-89 mg kg⁻¹), estuvieron dentro de los rangos establecidos por Vallejos (1996), Caguasango y Cadena (2012) (N: 1,99-2,87%, Ca: 0,81-2,71%, Mg: 0,28-0,48%, K: 0,73-1,54%, P: 0,17-0,32%, Fe: 70-263 mg kg⁻¹, Mn: 14-78 mg kg⁻¹). En el caso del azufre, sodio, boro y el aluminio no se encontraron reportes de concentración foliar para *Pachira quinata*.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos se concluye que ochenta y cinco especies tuvieron uno o más elementos cuya MED.CONC se encontró por debajo del percentil 25 de la base de datos general y se les clasificó como minimalistas. Sesenta y siete especies se clasificaron como acumuladoras pues tuvieron en la concentración de uno o más elementos, medianas entre los percentiles 80% y 95% de la población total. Treinta y cuatro especies tenían la MED.CONC de uno o varios elementos por arriba del percentil 95% de la base de datos general, y se clasificaron como hiperacumuladoras.

3.6 Literatura Citada

- Alvarado, A; Camacho, G; Fernández, M; Mezger, J; Mata, R; Bertsch, F; Vaides, E. 2015. (Memorias) Interpretación del análisis foliar de varias especies forestales latifoliadas del trópico americano. In (VIII, 2015, San José, Costa Rica). San José, Costa Rica, s.e. p. 68.
- Alvarado, A; Campos, JJ; Herrera, B. 1997. Evaluación del manejo y clasificación de tierras para uso forestal en América Central. Actas de la III Semana Científica, Turrialba, CR, 3-5 de febrero de 1997, 1997-02-03.
- Arias, D; Calvo, J; Richter, D de B; Dohrenbusch, A. 2011. Productivity, aboveground biomass, nutrient uptake and carbon content in fast-growing tree plantations of native and introduced species in the southern region of Costa Rica. *Biomass and Bioenergy* 35(5):1779-1788.
- Avellán, M. 2012. Determinación y variación de la concentración foliar de nutrimentos de *Gmelina arborea* Roxb. Tesis Lic. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional de Costa Rica. 87 p.
- Badilla, Y; Murillo, O. 2014. Variación de la concentración foliar de nutrimentos en *Vochysia guatemalensis* JD Smith en plantaciones de la zona norte y caribe de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 11(27):1-6.
- Bergmann, C; Stuhmann, M; Zech, W. 1994. Site factors, foliar nutrient levels and growth of *Cordia alliodora* plantations in the humid lowlands of northern Costa Rica. *Plant and Soil* 166(2):193-202.
- Bertsch, F. 2003. Absorción de nutrimentos por los cultivos. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 306 p.
- Boardmann, R; Cromer, R; Lambert, M; Webb, M. 1997. *Forest Plantations*. Australia, CSIRO publishing. p. 571.
- Cadena, M. 1989. Análisis nutricional de la especie *Cordia alliodora* asociado a hidroponía. *Colombia Forestal* 3(5):6-16.
- Caguasango, SM; Cadena, ME. 2012. Modelación de la calidad de índice de sitio–suelo sitio específico mediante criterios de disponibilidad de nutrientes en plantaciones de *Gmelina arborea* y *Pachira quinata* en bosque seco tropical (Zambrano–Bolívar). Tesis Lic. Bogotá, Colombia, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 230 p.
- Camacho, M. 2014. Modelo de absorción de nutrimentos como herramienta para hacer recomendaciones de manejo en plantaciones de *Vochysia guatemalensis* Donn. Tesis Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 103 p.

- Cornelius, JP; Mesen, J. 1997. Provenance and family variation in growth rate, stem straightness, and foliar mineral concentration in *Vochysia guatemalensis*. Canadian Journal of Forest Research 27(7):1103-1109.
- Drechsel, P; Zech, W. 1991. Foliar nutrient levels of broad-leaved tropical trees: a tabular review. Plant and Soil 131(1):29-46.
- Escobar, M; Ortiz, J; López, F. 1993. Diagnóstico de daños nutricionales en cuatro especies forestales empleadas en reforestación. Medellín, Colombia, INDERENA. 88 p.
- Herrera, B; Finegan, B. 1997. Substrate conditions, foliar nutrients and the distributions of two canopy tree species in a Costa Rican secondary rain forest. Plant and Soil 191(2):259-267.
- Horn, N; Montagnini, F. 1999. Litterfall, litter decomposition and maize bioassay of mulches from four indigenous tree species in mixed and monospecific plantations in Costa Rica. International Tree Crops Journal 10(1):37-50.
- Meléndez, G; Molina, E. 2002. Fertilización Foliar: Principios y Aplicaciones. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 125 p.
- Mills, H; Jones, JB. 1996. Plant Analysis Handbook II. Micro.
- Montagnini, F. 2000. (Memorias) Ciclaje de nutrimentos en plantaciones con especies puras y mixtas en región de bosque húmedo tropical. In Consejo Nacional de Rectores. San José, Costa Rica, Oficina de Planificación de la Educación Superior. p. 17-24.
- Montenegro, E. 2005. Efecto del aporte de nutrientes de la biomasa de tres tipos de árboles de sombra en sistemas de manejo de café orgánico y convencional. Tesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 67 p.
- Montero, M. 1999. Factores de sitio que influyen en el crecimiento de *Tectona grandis* Lf y *Bombacopsis quinata* (Jacq.) Dugand, en Costa Rica. Tesis M.Sc. Valdivia, Chile / Turrialba, Costa Rica, Universidad Austral de Chile / CATIE. 111 p.
- Montero, M; Kanninen, M. 2006. Variación de los nutrimentos foliares con la edad de los árboles de *Tectona grandis* Lf. Tesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica, Universidad de Helsinki/ CATIE. 16 p.
- Negi, M; Tandon, Y; Rawat, H. 1995. Biomass and nutrient distribution in young teak (*Tectona grandis* Linn. f) plantations in Tarai region of Uttar Pradesh. Indian Forester 121(6):455-464.
- Nichols, JD; Gillespie, AR; Richter, DD. 1997. Growth, foliar and nutrient status of *Terminalia amazonia* planted in southwestern Costa Rica. Journal of Tropical Forest Science 10(2):233-248.
- Nwoboshi, LC. 1983. Growth and nutrient requirements in a teak plantation age series in Nigeria. I. Linear growth and biomass production. Forest Science 29(1):159-165.

- _____. 1984. Growth and nutrient requirements in a teak plantation age series in Nigeria. II. Nutrient accumulation and minimum annual requirements. *Forest Science* 30(1):35-40.
- Paniagua, A. 2005. (Memorias). Respuesta de *Cedrela odorata* a dosis crecientes de carbonato de calcio y P₂O₅ en un Fluventic Dystropept en invernadero. In (I, 2004, Heredia, Costa Rica). Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional, INISEFOR. p. 11.
- Peña, D. 2014. Fundamentos de Estadística. Madrid, España, Alianza editorial. 688 p.
- Ramírez, D. 2014. Estimación de la absorción de nutrimentos de cedro amargo (*Cedrela odorata* L.) como mecanismo de diagnóstico para mejorar las recomendaciones de manejo sostenible de la especie en plantaciones de pequeños agricultores del Programa Forestal de CoopeAgri RL, Costa Rica. Tesis Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 81 p.
- Reimann, C; Filzmoser, P; Garrett, RG. 2005. Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *Science of the Total Environment* 346(1-3):1-16.
- Reuter, D; Robinson, JB. 1997. Plant Analysis: an Interpretation Manual. 2 ed. Australia, CSIRO publishing. 571 p.
- Rodriguez, C; Miguel, C; Subramaniam, P. 1984. Seasonal fluctuations of the mineral concentration of alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) from the field. *Plant and Soil* 78(1-2):201-208.
- Salazar, C; Castillo, S del. 2018. Fundamentos Básicos de Estadística.
- Segura, JM; Castillo, A; Alvarado, A; Blanco, FA. 2006. Variación del contenido foliar de nutrimentos de *Alnus acuminata*. 30(1):53-63.
- Spiegel, MR. 2009. Estadística. 4 ed. DF, México, McGraw-Hill. 577 p.
- Stuhrmann, M; Bergmann, C; Zech, W. 1994. Mineral nutrition, soil factors and growth rates of *Gmelina arborea* plantations in the humid lowlands of northern Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 70(1-3):135-145.
- Vallejos, OS. 1996. Productividad y relaciones del índice de sitio con variables fisiográficas edafoclimáticas y foliares para *Tectona grandis* Lf, *Bombacopsis quinatum* (Jacq.) Dugand y *Gmelina arborea* Roxb. en Costa Rica. Tesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 147 p.
- Wightman, KE; Shear, T; Goldfarb, B; Hagggar, J. 2001. Nursery and field establishment techniques to improve seedling growth of three Costa Rican hardwoods. *New Forests* 22(1-2):75-96.

CAPÍTULO IV

El análisis foliar como herramienta de diagnóstico en especies arbóreas latifoliadas de Costa Rica: efecto de las variables ambientales sobre la concentración foliar de nutrimentos

4.1 Resumen

Costa Rica posee un gran porcentaje de área cubierta por bosques y plantaciones forestales comerciales, los cuales se presenta una combinación de factores edafoclimáticos muy diversa. A raíz de la poca de información acerca de la relación entre la concentración foliar de nutrimentos de las especies forestales neotropicales y de los factores edafoclimáticos que afectan su nutrición mineral, surge la necesidad de caracterizar la variación y la distribución del contenido foliar de nutrimentos en bosques y plantaciones forestales del país. Por lo anterior, el objetivo del trabajo fue cuantificar como influyen los factores ambientales como la clasificación del suelo, la altitud, la precipitación media anual, la temperatura y la zona de vida, la sobre variación en la concentración foliar de elementos en especies arbóreas de Costa Rica. Para esto, se analizó una base de datos de concentraciones foliares de elementos de especies arbóreas de Costa Rica que contiene un total de 3.559 registros. Por medio de PCA se agruparon las variables ambientales que se afectan entre sí y los elementos cuyas concentraciones se ven a afectadas por dichas variables. Por medio del análisis de correlaciones se modeló la variación de la concentración foliar de los elementos agrupados en el primer componente principal en función de las variables ambientales agrupadas en este mismo componente. Se encontró que la altitud y la temperatura afectan significativamente la concentración foliar de N, P, K y B, de manera que, al aumentar la altitud, la temperatura disminuye y la concentración foliar de N, P y K, aumenta mientras que la del boro disminuye. En las zonas donde hay mayor precipitación, los árboles se adaptan a acumular Mn, S y Al foliar mientras que en sitios donde hay menor precipitación los árboles tienen mayor concentración foliar de Ca y Mg.

4.2 Introducción

Los bosques son ecosistemas terrestres muy diversos pues son el hábitat de más del 80% de las especies vegetales y animales (Osborne 2000, Ortega 2012); en Costa Rica el Inventario Nacional Forestal (SINAC 2015) registra una lista que contiene 1.506 especies forestales considerado como uno de los mayores registros del mundo tropical.

Holdridge y Grenke (1971), clasifican los bosques de Costa Rica en doce zonas de vida definidas a partir de la combinación de cinco pisos altitudinales (basal, premontano, montano bajo, montano y subalpino) con variantes climáticas de humedad (seco, húmedo, muy húmedo y pluvial). Así, se encuentran en el piso basal los bosques seco (bs-T), húmedo (bh-T) y muy húmedo (bmh-T), en el piso premontano los bosques húmedo (bh-P), muy húmedo (bmh-P) y pluvial (bp-P), en el piso montano bajo los bosques húmedo (bh-MB), muy húmedo (bmh-MB) y pluvial (bp-MB), en el piso montano los bosques muy húmedo (bmh-M) y pluvial (bp-M) y en el piso subalpino el bosque de páramo pluvial (bp-SA) (Figura 4.1).

Así como las especies vegetales varían con los pisos altitudinales y las zonas de vida (Holdridge 1967, Nadeau y Sullivan 2015), la disponibilidad, la distribución y la concentración foliar de los nutrientes entre las especies forestales también (Soethe et al. 2008). El crecimiento de los bosques y la productividad forestal depende de factores bióticos y ambientales como la biodiversidad, la disponibilidad de luz, la temperatura y la cantidad de agua y nutrientes (Alvarez Clare y Mack 2011, Nadeau y Sullivan 2015). Según BassiriRad (2005) el establecimiento, adaptación y evolución de las especies forestales dependen, en su mayoría, de la capacidad y disponibilidad que tengan los árboles de adquirir nutrientes del medio en que estos se desarrollan.

Para el manejo sostenible de los bosques y plantaciones forestales se requiere de mayor información sobre la distribución y la variación de nutrientes entre las especies arbóreas que los conforman, y su relación con las condiciones edafoclimáticas en las que se desarrollan (Rodríguez y Álvarez 2010, Alvarado y Raigosa 2012, Camino y Pierre Morales 2013). Debido a la falta de información sobre los factores edafoclimáticos que influyen sobre la nutrición mineral de bosques y plantaciones forestales de especies arbóreas tropicales (Drechsel y Zech 1991, Alvarado y Raigosa 2012, Alvarado 2016), surge la necesidad de caracterizar el efecto de los factores climáticos sobre la variación y la distribución del contenido foliar de nutrientes en especies arbóreas de bosques y plantaciones forestales de Costa Rica. El objetivo de este trabajo fue cuantificar la relación de los factores ambientales como la clasificación del suelo, la altitud, la precipitación media anual, la temperatura y la zona de vida sobre variación en la concentración foliar de elementos en especies arbóreas de Costa Rica.

4.3 Materiales y Métodos

La información analizada en el presente proyecto se generó en trabajos de graduación dirigidos por el Dr. Alfredo Alvarado (Mollinedo García 2003, Vaides López 2004, Segura et al. 2005, 2006, Avellán 2012, Portuguez Umaña 2012, Fernández-Moya et al. 2013 Ramírez 2014). De manera paralela algunas empresas nacionales e internacionales contribuyeron con material foliar o prestaron sus plantaciones para ampliar la base de datos en México, Guatemala, Panamá y Colombia, a pesar de que para el presente estudio solo se utilizará información de Costa Rica. Mucha de la información obtenida sobre las especies nativas, fue suministrada por el Dr Eduardo Chacón, a partir del proyecto “Controles climáticos y paisajísticos de la biodiversidad como procesos del ecosistema en los bosques tropicales muy húmedos del suroeste de Costa Rica” y por el Dr. William Fonseca y colaboradores en el proyecto “Construcción de Funciones Alométricas para Costa Rica en el Contexto del Proyecto de Protección Ambiental a través de la Protección de los Bosques de Centro América”.

La base de datos contiene un total de 3.559 registros de análisis foliares de especies arbóreas de Costa Rica distribuidos en todo el país (Figura 4.5). Cada árbol tiene información sobre la fecha de muestreo, la clasificación taxonómica de 21 órdenes, 61 familias, 145 géneros y 196 especies, su nombre común, la localidad y las coordenadas geográficas del lugar de donde proviene la muestra y las concentraciones foliares de N (n=3.403), P (n=3.549), K (n= 3.545), Ca (n=3.555), Mg (n=3.546), S (n=2.553), Fe (n=3.499), Mn (n=3.538), Cu (n=3.541), Zn (n=3.524), B (n=2.740), Na (n=1.818) y Al (n=2.100). La base incluye además registros obtenidos a partir de bases de datos georeferenciadas de clasificación de suelo a nivel de suborden, de clima como temperatura (°C) máxima, media y mínima, precipitación media anual (mm), días de lluvia, zona de vida, cantidad de meses secos al año y la altitud (msnm), dichas condiciones ambientales se presentan en los mapas de la Figura 4.1 a la 4.5.

Los mapas de las Figuras 4.1 a la 4.4, fueron generados en el software (libre y de código abierto) de procesamiento y generación cartográfica QGIS, a partir de los datos disponibles en el portal de información espacial del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) y el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica (CIA 2016).

La figura 4.5 con información espacial de suelos, se generó por el Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica, mientras que los datos de temperatura media anual, precipitación media anual, elevación, zonas de vida y de cobertura de bosque, los cuales son vectoriales de tipo ráster, fueron accesados a través del SNIT con el servicio de características web (WFS, por sus siglas en inglés) disponible en su página web. Los detalles del procesamiento y metodología de cálculo de cada una de estas capas vectoriales y ráster, son dependientes de la fuente base que posea el portal de

datos espaciales, por lo que para obtener más detalle sobre la metodología utilizada para su confección, se recomienda consultar los metadatos disponibles en el Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT, s. f.).

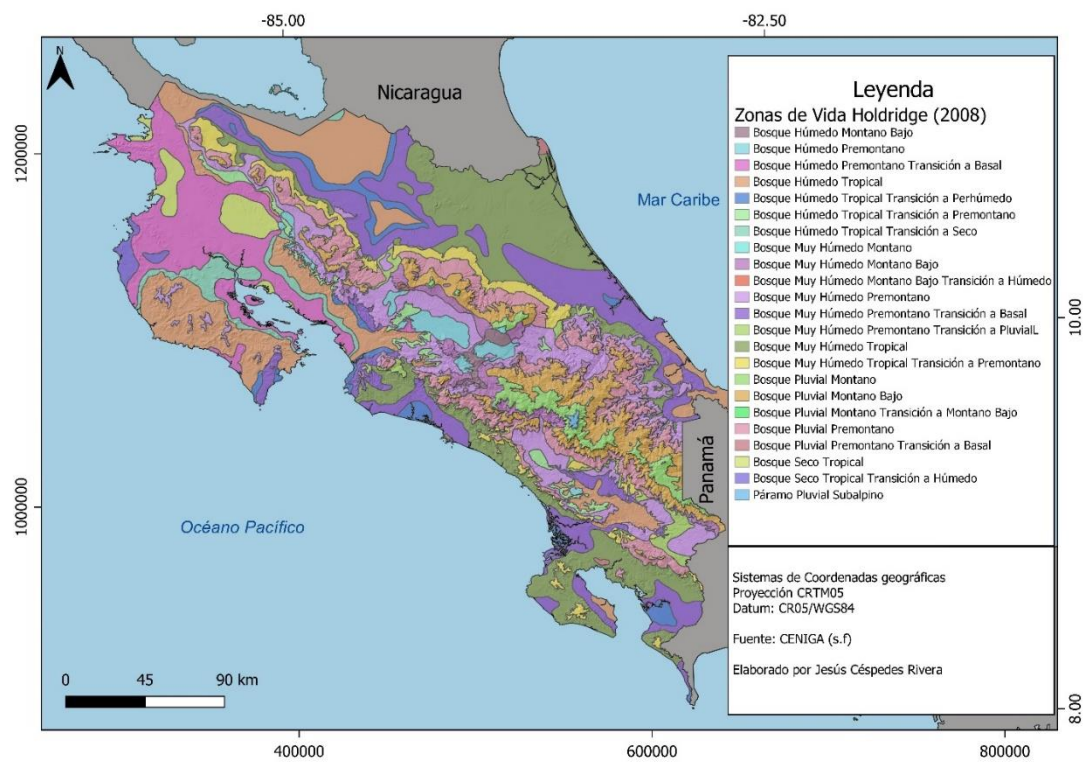


Figura 4.1. Mapa de zonas de vida Costa Rica.

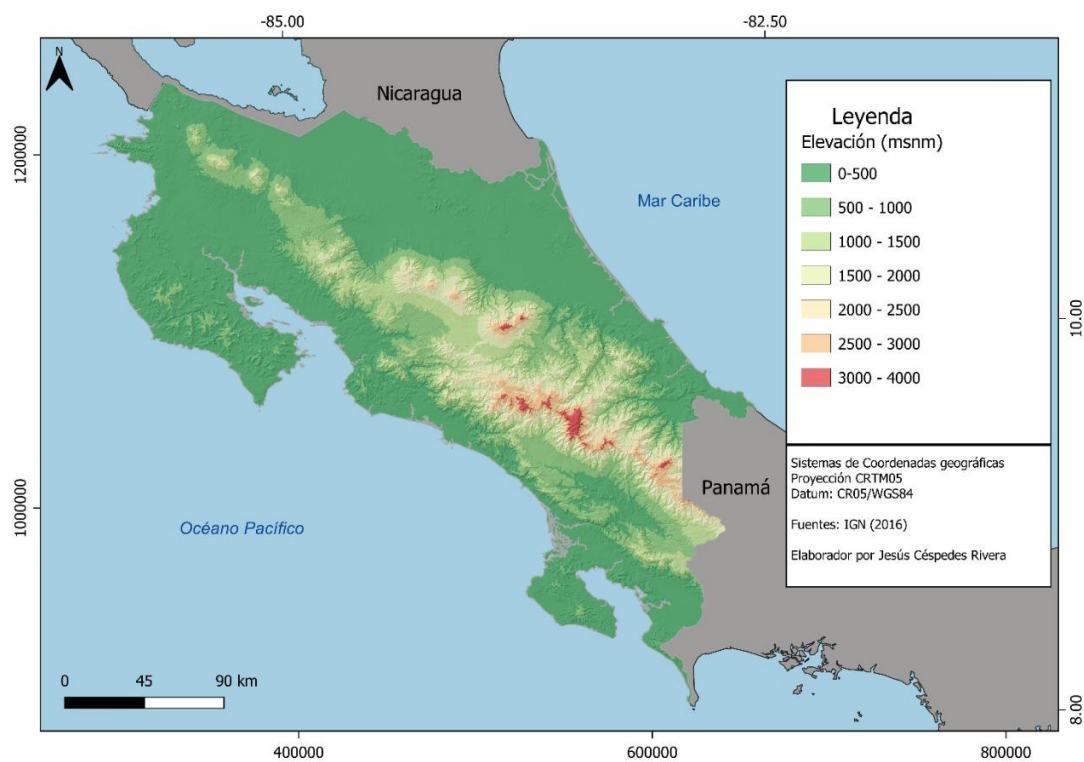


Figura 4.2. Mapa de elevación de Costa Rica.

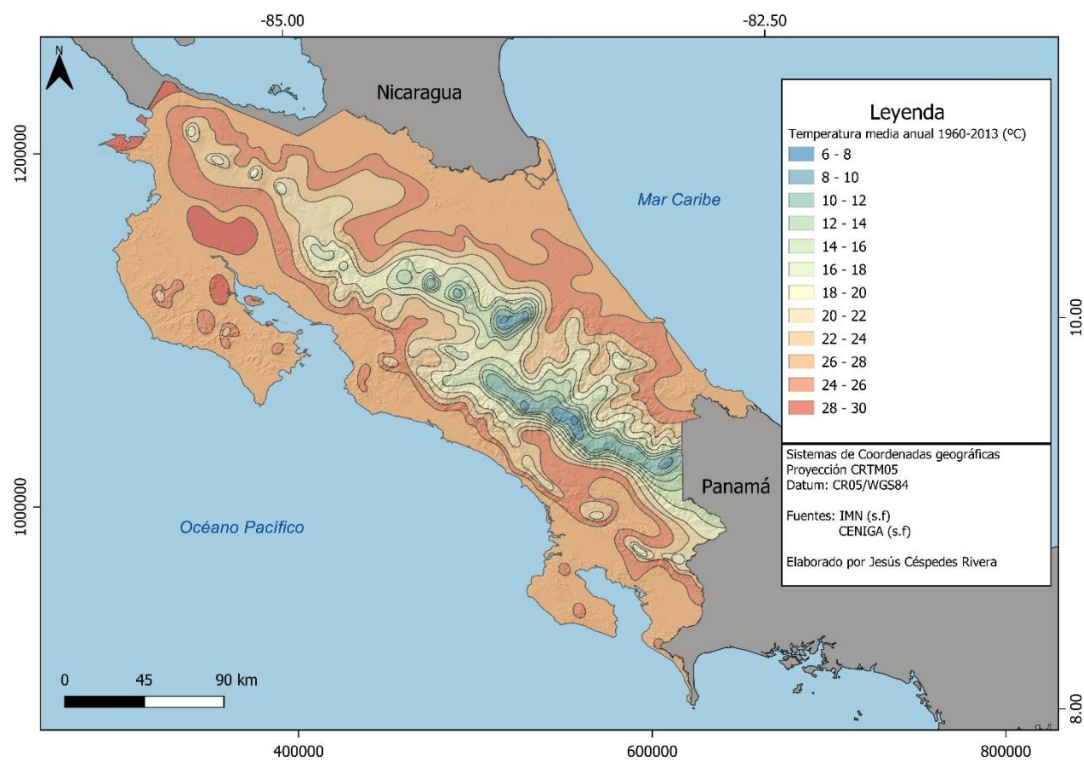


Figura 4.3. Mapa de temperatura media ambiente anual de Costa Rica.

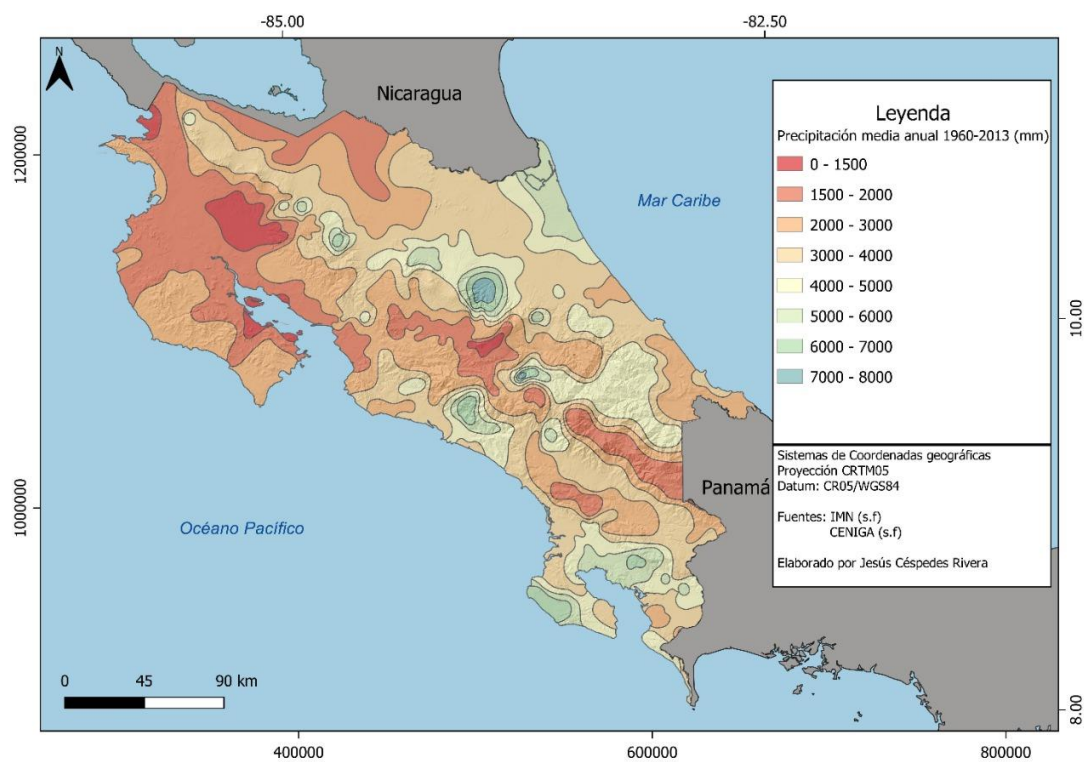


Figura 4.4. Mapa de precipitación anual media de Costa Rica.

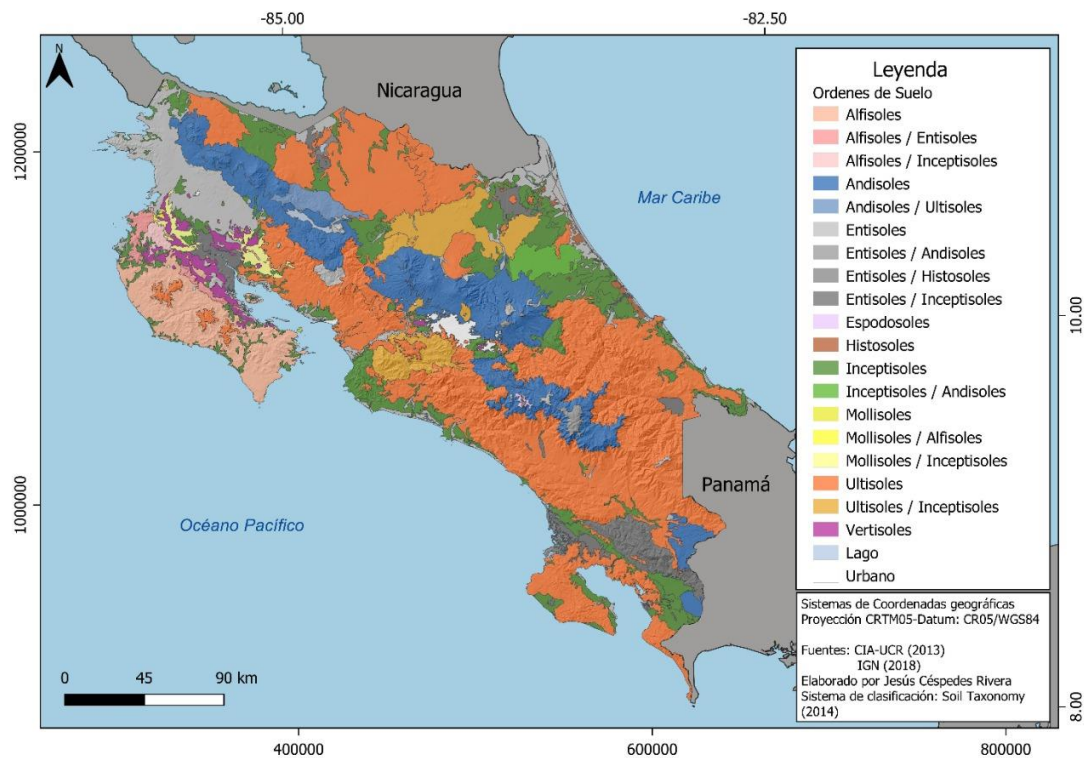


Figura 4.5. Mapa de órdenes de suelos de Costa Rica.

El análisis de los datos se realizó en el software estadístico RStudio Version (1.0.153), para establecer las relaciones entre la concentración foliar de elementos en especies arbóreas de Costa Rica y los factores ambientales en los que se desarrollan, se realizó un análisis multivariado de componentes principales (PCA) por medio del paquete estadístico FactoMineR (Lê et al. 2008) con la base de datos de contenidos foliares y variables ambientales disponible en:

http://agro.ucr.ac.cr/Bases_de_datos_agronomia_2021/Alfredo_Alvarado/

Las variables categóricas como orden y suborden de suelo y zonas de vida, se incluyeron en el PCA como variables suplementarias cualitativas. A partir del agrupamiento de las variables cuantitativas que arrojó el PCA en el primer componente principal, se realizaron modelos de regresión lineal con sus respectivos gráficos y estimadores (Figura 4.6) con el fin de establecer las relaciones específicas de la concentración foliar de cada elemento agrupado en el primer componente con las variables ambientales agrupadas en el mismo componente.

4.4 Resultados

Según el PCA los primeros tres explican el 49% de la variabilidad de la concentración foliar (Figura 4.6). El primer componente explica un 25%, el segundo un 13% y tercero 11%; los demás componentes generados en el mismo análisis explican menos de un 8% de dicha variabilidad. Para efectos de este trabajo solamente se ahondará en los 3 componentes principales con el fin de establecer las relaciones que se dan entre la concentración foliar de nutrimentos y las variables ambientales.

La distribución espacial de las variables cuantitativas obtenidas a partir del análisis de PCA, indica el grado de correlación que existe entre las mismas (Figura 4.6, Cuadro 4.1). Las variables ambientales que mayor correlación tienen con el primer componente (Figura 4.6, dimensión 1), son la temperatura de manera proporcional (+0,9) y la altitud forma inversamente proporcional (-0,9). También correlacionan positivamente con este componente las concentraciones foliares de B (+0,4) y el Mg (+0,3) y de manera negativa las de P, K y N (-0,4, -0,4 y -0,3 respectivamente). El boro tiene una correlación proporcional con la temperatura (pendiente=1.8) e inversamente proporcional con la altitud (-0,01), mientras que el N, P, y K, poseen una relación inversamente proporcional con la temperatura (0,08, 0,009 y 0,03 respectivamente) e inversamente proporcional con la altitud (-0,0004, -0,00004, -0,0002) (Figura 4.6).

El resultado numérico del PCA (Cuadro 4.1) muestra los valores de correlación de las variables cuantitativas con cada componente, el grado de ajuste de las variables cualitativas (r^2), y su significancia estadística (valores de p). Los resultados correspondientes a las variables cualitativas indican que la zona de vida es la variable que presenta el mejor ajuste ($r^2=0,92$) con el componente 1, seguida de la especie arbórea ($r^2=0,88$) y del suborden de suelo ($r^2= 0,71$), lo que sugiere que estas variables también se encuentran ligadas con la variación de altitud y la temperatura.

Las variables cuantitativas que poseen mayor correlación con el segundo componente principal son la concentración foliar de Cu, B, N, Mg y P (0,8, 0,7, 0,6, 0,5 y 0,5 respectivamente) y la especie arbórea y el orden de suelo fueron las variables cualitativas que también se agruparon en este componente ($r^2= 0,71$). El componente principal 3, agrupa las variables ambientales de precipitación (0,6), días de lluvia (0,8) y meses secos al año (-0,7). Los elementos que tienen mayor correlación con este componente son el Mn, el S, y el Al (0,3, 0,3 y 0,2) y el Ca y el Mg (-0,4 y -0,3).

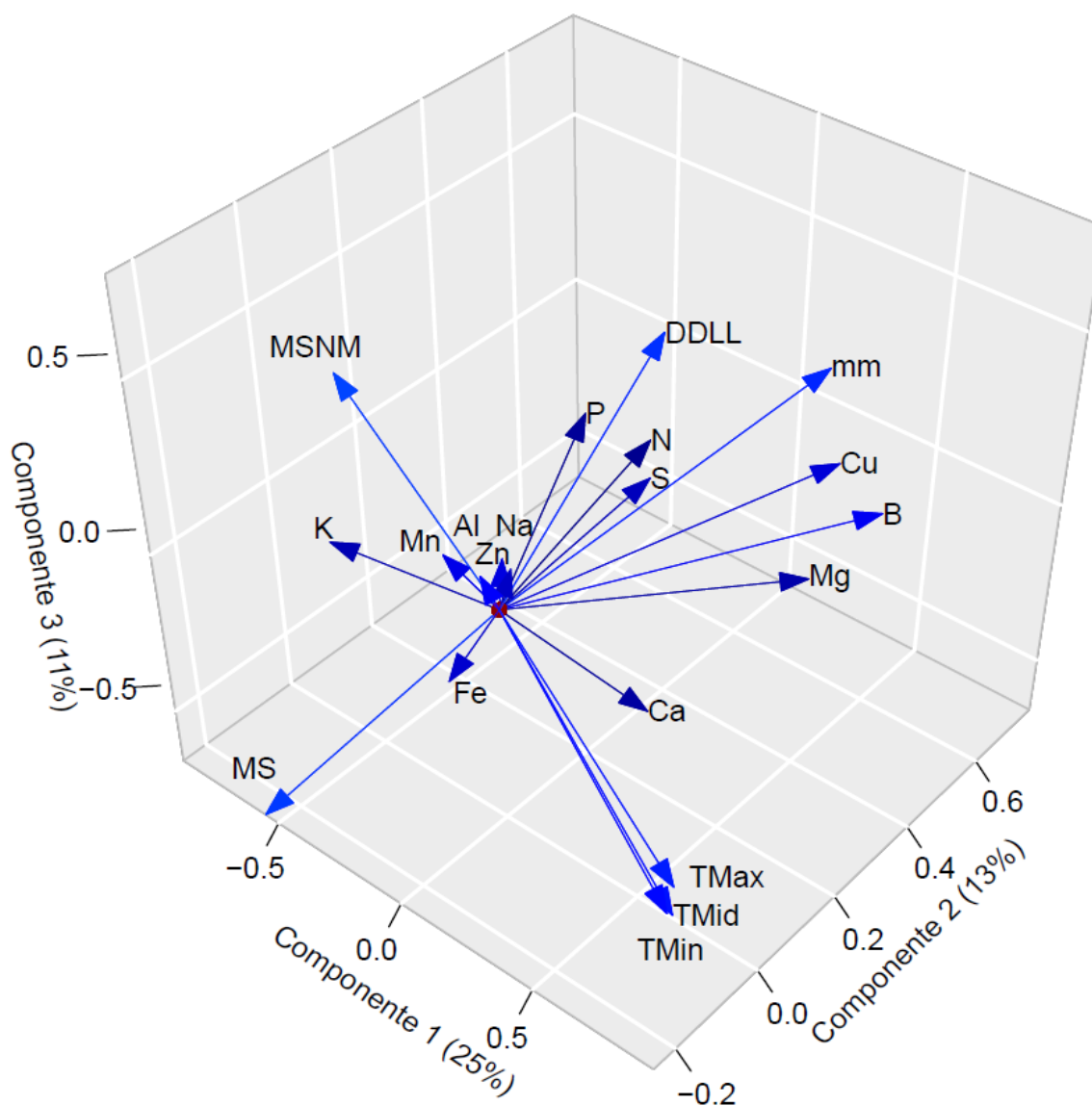


Figura 4.6. Distribución espacial de variables cuantitativas (N= Nitrogeno, P= Fósforo, K= Potasio, Ca= Calcio, Mg= Magnesio, S= Azufre, Fe= Hierro, Mn= Manganeseo, Cu= Cobre, Zn= Zinc, B= Boro, Na= Sodio, Al= Aluminio, Tmax= Temperatura máxima, Tmin= Temperatura mínima, Tmid= Temperatura media, MS= Meses secos, mm= milímetros de precipitación anual, MSNM= Altitud en metros sobre el nivel del mar) evaluadas en especies forestales de Costa Rica y analizadas por un PCA. Las flechas corresponden a todas las variables cuantitativas de la base de datos, posición indica si la relación de la variable con el componente es proporcional (+) o inversamente proporcional (-), y la longitud de las flechas representa la magnitud de la correlación de la variable con cada componente.

Cuadro 4.1. Agrupación de las variables cuantitativas que correlacionan de forma significativa ($p < 0,05$) con los tres componentes principales, y el grado de ajuste de las variables cualitativas (r^2) con cada componente, y su significancia estadística (p valores).

Componente 1			Componente 2			Componente 3		
Variables cuantitativas								
Variable	Corr.	valor p	Variable	Corr.	valor p	Variable	Corr	valor p
Temperatura mínima	0,932	<0,001	Cu	0,764	<0,001	Días de lluvia	0,775	<0,001
Temperatura máxima	0,906	<0,001	B	0,728	<0,001	Precipitación	0,551	$5,76 \times 10^{-282}$
Temperatura media	0,892	<0,001	N	0,587	<0,001	Mn	0,312	$3,85 \times 10^{-81}$
B	0,376	$1,3 \times 10^{-119}$	Mg	0,543	$2,23 \times 10^{-272}$	S	0,258	$3,21 \times 10^{-55}$
N	-0,334	$2,70 \times 10^{-93}$	P	0,472	$8,64 \times 10^{-197}$	Al	0,235	$1,02 \times 10^{-45}$
K	-0,355	$3,02 \times 10^{-106}$				Mg	-0,278	$2,34 \times 10^{-64}$
P	-0,419	$2,15 \times 10^{-151}$				Ca	-0,366	$5,00 \times 10^{-113}$
Altitud	-0,912	<0,001				Meses secos	-0,671	<0,001
Variables cualitativas								
Variable	R^2	valor p	Variable	R^2	valor p	Variable	R^2	valor p
Especie	0,878	<0,001	Especie	0,540	<0,001	Especie	0,596	<0,001
Zona de Vida	0,920	<0,001	Orden de suelos	0,409	<0,001	Orden de suelos	0,507	<0,001
						Suborden de suelos	0,566	<0,001
						Zona de Vida	0,598	<0,001

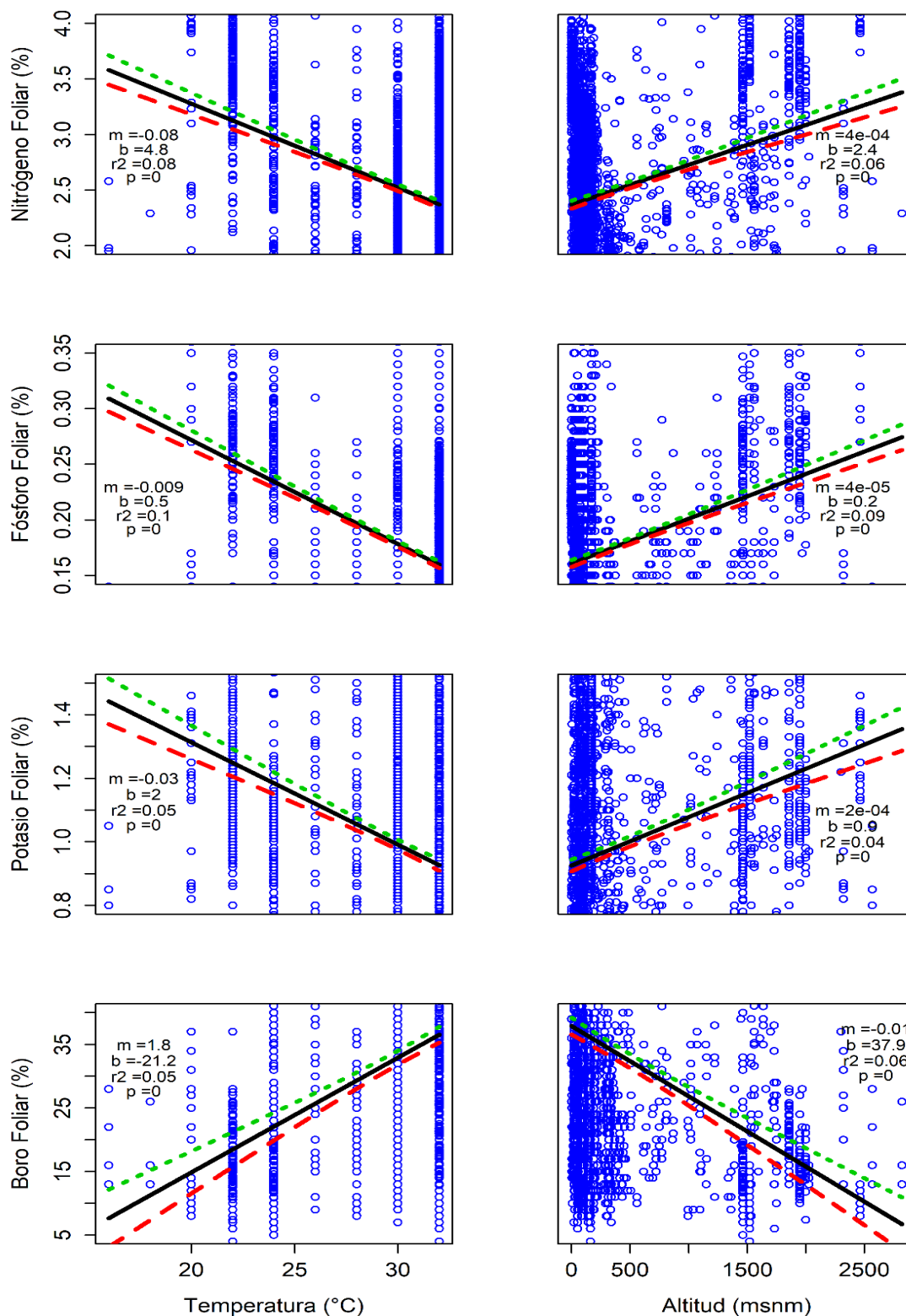


Figura 4.7. Modelos lineales que correlacionan la temperatura ambiental (°C) y altitud (msnm), con la concentración foliar de N, P, K y B. Todos los modelos (línea negra) son estadísticamente significativos, las líneas verde y roja delimitan el intervalo de confianza de cada modelo de predicción, con una probabilidad de error (p) menor al 5%. m= pendiente, b= intercepto y r²= ajuste.

4.5 Discusión y Conclusiones

Pocos estudios evalúan la relación entre la concentración foliar de nutrimentos en las especies arbóreas tropicales, el relieve y el clima, variables que a su vez dependen del nivel de escalamiento en que se estudian. En algunos casos, la temperatura y la altitud explican la mayor variación en las concentraciones foliares de algunos elementos como ha sido demostrado en varias regiones del mundo (Ballard 1984, Araújo y Haridasan 1988, Boardman y McGuire 1990, Drechsel y Zech 1991, Drechsel y Zech 1993, Lehto et al. 2010, Condit et al. 2013). Los efectos de la elevación, el clima y el suelo sobre la concentración foliar y la distribución de especies también han sido ampliamente reconocidos por otros autores (Rhoades 1996, Soethe et al. 2008, Valladares y Niinemets 2008, Fyllas et al. 2009, Lugo et al. 2012, Fisher et al. 2013, Sobrado 2014, Nadeau y Sullivan 2015), especialmente cuando el área de estudio es pequeña y se reduce la variación geológica y geomorfológica de los ecosistemas comparados.

En los sistemas de clasificación de ecosistemas a nivel centroamericano se reconoce la relación entre el clima y la fisionomía de la vegetación al definir 19 zonas de vida considerando principalmente las condiciones bioclimáticas prevalentes en la zona, dejando aparte las asociaciones edáficas cuando estas son relevantes al tema (Holdridge 1967). Estas mismas formaciones vegetales en Costa Rica manifiestan las condiciones climáticas y del relieve del país y su flora es un reflejo de lo diverso que son los ecosistemas tropicales (Vargas 1997, 1999, 2001, Anchukaitis y Horn 2005, Kappelle y van Uffelen 2006). Lo anterior permite explicar de manera parcial el porqué de la variación en la concentración foliar de nutrimentos en el presente estudio ya que las especies comparadas están expuestas a condiciones ambientales muy diversas que pueden parcialmente asociarse a las zonas de vida que definen su tasa de fotosíntesis, mecanismos de tolerancia a las condiciones ambientales, reciclaje de nutrimentos y disponibilidad de nutrimentos, entre otras variables.

En el presente estudio, la interacción entre especies y el primer componente principal puede relacionarse con patrones filogenéticos de familias dominantes adaptadas a ecosistemas de fertilidad baja en donde uno o dos elementos definen la absorción de los demás nutrimentos (Ostertag y DiManno 2016). Lambers et al. (2006) y Manos y Stanford (2001) concluyen que las Ericaceae pueden desarrollarse en suelos ácidos e infértiles gracias a su asociación con micorrizas, que incrementan la absorción de nutrimentos, las Cyperaceae son abundantes en comunidades herbáceas con especies de sistemas radicales adaptados a suelos con contenidos bajos de P y las Pinaceae y Fagaceae en suelos poco fértiles de sitios de montaña en regiones tropicales.

La cantidad de nutrimentos asociada al follaje depende de la concentración disponible de los mismos en el suelo (Stanley y Montagnini 1999) y de la especie arborea y su edad. Algunas especies como *Eucalyptus globulus* y *Tectona grandis* presentan contenidos muy altos de N (90-175 kg ha⁻¹) y

Ca (200-300 kg ha⁻¹) en la corteza del tronco (Grimm y Fassbender 1981a, 1981b; Totey 1992; Negi et al. 1995) cuando generalmente los valores rondan entre 20-75 kg N ha⁻¹ y 25-125 kg Ca ha⁻¹, mientras que otras como *Alnus acuminata* acumulan el N en el follaje (Segura et al. 2006). Aunque son pocos los estudios sobre adaptación de especies a ecosistemas tropicales que se relacionan con su acumulación de nutrimentos a nivel foliar algunos autores las reconocen como tolerantes, no-acumuladoras, acumuladoras e hiperacumuladoras (Watanabe y Osaki 2002, Kochian et al. 2015) dependiendo de los niveles de concentración foliar. Así, en suelos ácidos pueden encontrarse casos de acumulación foliar de Al (Chenery 1951, Kellman 1979, Haridasan 1982, Schlatter y Gerding 1995, Breulmann 1996, Resende et al. 2005, Metali et al. 2015; Arias-Jimenez 2016) y de Mn (Fernando et al. 2006, 2007, 2009) y en otros tipos de suelo de Ba, Co, Ni y Sr (Breulmann 1996) y de Cd y Zn (Ma et al. 2005).

Las variables ambientales significativas en el presente trabajo que se asocian al tercer componente principal (precipitación, meses secos y días de lluvia) también permiten diferenciar las regiones macroclimáticas del país como tropical estacionalmente seco, tropical húmedo y muy húmedo y la parte montañosa y de colinas. Este efecto se reconoce a nivel mundial en los sistemas de clasificación de suelos que los separaban como “pedocales” y “pedalferes” para referirse a aquellos en que se acumulan bases como Ca, principalmente derivados de rocas básicas y en ambientes secos, de otros en los que acumulan Al y Fe principalmente formados en regiones calientes y húmedas (Marbut 1927, Baldwin et al. 1938, Fyllas et al. 2009, Quesada et al. 2009, 2010). En Centro América el efecto no es tan notorio debido a la falta de ecosistemas muy secos y a lo inestable de los paisajes debido al tectonismo y vulcanismo activo, aunque puede notarse en los documentos desarrollados para Costa Rica (Bertsch 1987, Méndez y Bertsch 2012), Honduras (Gonzalez et al. 2008) y Panamá (Villareal et al. 2013).

Esta relación entre la cantidad de precipitación anual de un determinado sitio y el contenido de Ca, Mg, Fe y Al tiene una explicación desde el punto de vista de la formación del suelo (Marbut 1927, Baldwin et al. 1938). Al disminuir la precipitación pluvial disminuye el número de días con lluvia, pero se eleva la duración de la estación seca, lo que determina en general la adaptación de especies arbóreas a cada ecosistema y a la disponibilidad de agua de los mismos (Clark 2002, Álvarez 2007). En los ecosistemas más secos tiende a acumularse una mayor cantidad de N, Ca y Mg disponibles en el suelo, pero una menor cantidad de Al (Bertsch 1987, Méndez y Bertsch 2012) en particular en suelos Vertisoles o con características vérticas en los que dominan las arcillas expandibles como la motmorillonita, lo que se refleja en la concentración foliar de la vegetación. Lo contrario es cierto para especies adaptadas a ecosistemas húmedos y muy húmedos asociados a suelos fuertemente meteorizados como *Vochysia guatemalensis*, *Vochysia ferruginea* y otras (Montagnini 1992).

Tomando en cuenta los resultados obtenidos se puede concluir que la altitud y la temperatura afectan significativamente la concentración foliar de N, P, K y B de manera que, al aumentar la altitud, la temperatura disminuye y la concentración foliar de N, P y K aumenta mientras que la del boro disminuye. En las zonas donde hay mayor precipitación, los árboles tienden a acumular más Mn, S y Al, que en lugares donde hay menor precipitación, donde en su lugar, los árboles tienen mayor concentración foliar de calcio y magnesio.

4.6 Literatura Citada

- Alvarado, A; Raigosa, J. 2012. Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales. *Agronomía Costarricense* 36:113-115.
- Alvarez, JG. 2007. Effects of Land Cover Changes on the Water Balance of the Palo Verde Wetlands, Costa Rica. Tesis M.Sc. Enschede, Holanda, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation. 85 p.
- Alvarez, S; Mack, MC. 2011. Influence of precipitation on soil and foliar nutrients across nine Costa Rican forests. *Biotropica* 43(4):433-441.
- Anchukaitis, KJ; Horn, SP. 2005. A 2000-year reconstruction of forest disturbance from southern Pacific Costa Rica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 221(1-2):35-54.
- Arias Jimenez, JC. 2016. Do metal tolerance traits explain spatial distribution patterns in metallicolous vascular plant species? Tesis M.Sc. Ouro Preto, Brasil, Universidade Federal de Ouro Preto. 39 p.
- Avellán, M. 2012. Determinación y variación de la concentración foliar de nutrimentos de *Gmelina arborea* Roxb. Tesis Lic. Heredia, Costa Rica, Universidad Nacional de Costa Rica. 87 p.
- Baldwin, M; Kellogg, CE; Thorp, J. 1938. Soil classification. Indiana, USA, Bobbs-Merrill Indianapolis. 979-1001 p.
- Ballard, R. 1984. Fertilization of plantations. *Nutrition of Plantation Forests* :327-360.
- BassiriRad, H. 2005. Nutrient acquisition by plants: an ecological perspective. Berlin, Alemania, Springer Science & Business Media, vol.181. 43-61 p.
- Bertsch, F. 1987. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. 1 ed. San José, Costa Rica, Editorial Universidad de Costa Rica. 78 p.
- Boardman, R; McGuire, D. 1990. The role of zinc in forestry. I. Zinc in forest environments, ecosystems and tree nutrition. *Forest Ecology and Management* 37(1-3):167-205.
- Breulmann, G. 1996. Distribution characteristics of mineral elements in tree leaves of a mixed Dipterocarp forest in Sarawak, Malaysia. *Tropics* 6(1/2):29-38.
- Camino, R de; Morales, JP. (2013). Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades. Turrialba, Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 392 p.
- Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA). 2016. Mapa digital de Suelos de Costa Rica (en línea, sitio web). Consultado 18 nov. 2019. Disponible en http://www.cia.ucr.ac.cr/?page_id=139.
- Chenery, E. 1951. Some aspects of the aluminium cycle. *Journal of Soil Science* 2(1):97-109.

- Clark, DB. 2002. Los factores edáficos y la distribución de las plantas. Ecología y conservación de bosques neotropicales. LUR, Cartago, Costa Rica :193-221.
- Condit, R; Engelbrecht, BM; Pino, D; Pérez, R; Turner, BL. 2013. Species distributions in response to individual soil nutrients and seasonal drought across a community of tropical trees. Proceedings of the National Academy of Sciences 110(13):5064-5068.
- Drechsel, P; Zech, W. 1991. Foliar nutrient levels of broad-leaved tropical trees: a tabular review. Plant and Soil 131(1):29-46.
- Drechsel, P; Zech, W. 1993. Mineral nutrition of tropical trees. Tropical Forestry Handbook 1:515-567.
- Fernández, J; Alvarado, A; Forsythe, W; Marchamalo, M. 2013. Effect of teak (*Tectona grandis*) plantations on hydraulic conductivity and porosity of alfisols in Costa Rica. Journal of Tropical Forest Science 25:259-267.
- Fernando, D; Bakkaus, E; Perrier, N; Baker, A; Woodrow, I; Batianoff, G; Collins, R. 2006. Manganese accumulation in the leaf mesophyll of four tree species: a PIXE/EDAX localization study. New Phytologist 171(4):751-758.
- Fernando, D; Woodrow, I; Bakkaus, E; Collins, R; Baker, A; Batianoff, G. 2007. Variability of Mn hyperaccumulation in the Australian rainforest tree *Gossia bidwillii* (Myrtaceae). Plant and Soil 293(1-2):145-152.
- Fernando, DR; Guymer, G; Reeves, RD; Woodrow, IE; Baker, AJ; Batianoff, GN. 2009. Foliar Mn accumulation in eastern Australian herbarium specimens: prospecting for 'new' Mn hyperaccumulators and potential applications in taxonomy. Annals of Botany 103(6):931-939.
- Fisher, JB; Malhi, Y; Torres, IC; Metcalfe, DB; Van de Weg, MJ; Meir, P; Silva-Espejo, JE; Huasco, WH. 2013. Nutrient limitation in rainforests and cloud forests along a 3,000-m elevation gradient in the Peruvian Andes. Oecologia 172(3):889-902.
- Fyllas, NM; Patino, S; Baker, T; Bielefeld, G; Martinelli, L; Quesada, C; Paiva, R; Schwarz, M; Horna, V; Mercado, L. 2009. Basin-wide variations in foliar properties of Amazonian forest: phylogeny, soils and climate. Biogeosciences 6:2677-2708.
- González, JP; Jarvis, A; Cook, SE; Oberthür, T; Rincón-Romero, M; Bagnell, JA; Días, MB. 2008. Digital soil mapping of soil properties in Honduras using readily available biophysical datasets and gaussian processes. s.l., Springer. p. 367-380.
- Grimm, U; Fassbender, H. 1981. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela, 3: Ciclo hidrológico y translocación de elementos químicos con el agua (suelos). Turrialba 31(2):89-100.

- _____. 1981. Ciclos bioquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. I. Inventario de las reservas orgánicas y minerales (N, P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Al, Na). Turrialba 31(1):27-37.
- Haridasan, M. 1982. Aluminium accumulation by some cerrado native species of central Brazil. *Plant and Soil* 65(2):265-273. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02374657>.
- Holdridge, LR. 1967. *Life Zone Ecology*. San José, Costa Rica, Tropical Science Center. 206 p.
- Holdridge, LR; Grenke, WC. 1971. *Forest Environments in Tropical Life Zones: a pilot study*. Oxford, UK, Pergamon Press. 741 p.
- Kellman, M. 1979. Soil enrichment by neotropical savanna trees. *The Journal of Ecology* 67:565-577.
- Kochian, LV; Piñeros, MA; Liu, J; Magalhaes, JV. 2015. Plant adaptation to acid soils: the molecular basis for crop aluminum resistance. *Annual Review of Plant Biology* 66:571-598.
- Lambers, H; Shane, MW; Cramer, MD; Pearse, SJ; Veneklaas, EJ. 2006. Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: matching morphological and physiological traits. *Annals of Botany* 98(4):693-713.
- Lê, S; Josse, J; Husson, F. 2008. FactoMineR: an R package for multivariate analysis. *Journal of statistical software* 25(1):1-18.
- Lehto, T; Ruuhola, T; Dell, B. 2010. Boron in forest trees and forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 260(12):2053-2069.
- Lugo, AE; Martínez, OA; da Silva, JF. 2012. Aboveground biomass, wood volume, nutrient stocks and leaf litter in novel forests compared to native forests and tree plantations in Puerto Rico. *Bois et Forêts des Tropiques*. 314 (4): 7-16.
- Ma, JF; Ueno, D; Zhao, F-J; McGrath, SP. 2005. Subcellular localisation of Cd and Zn in the leaves of a Cd-hyperaccumulating ecotype of *Thlaspi caerulescens*. *Planta* 220(5):731-736.
- Manos, PS; Stanford, AM. 2001. The historical biogeography of Fagaceae: tracking the tertiary history of temperate and subtropical forests of the Northern Hemisphere. *International Journal of Plant Sciences* 162(S6):S77-S93.
- Marbut, CF. 1927. A scheme for soil classification. *Proceedings and Papers. 1st. Inter. Congr. Soil Sci.* 4:1-31.
- Méndez, JC; Bertsch, F. 2012. El uso de bases de datos en el estudio de la fertilidad de los suelos agrícolas de Costa Rica: Estado actual y principales cambios en el tiempo. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 8(1):27-33.
- Metali, F; Abu Salim, K; Tennakoon, K; Burslem, DF. 2015. Controls on foliar nutrient and aluminium concentrations in a tropical tree flora: phylogeny, soil chemistry and interactions among elements. *New Phytologist* 205(1):280-292.

- Mollinedo-García, MS. 2003. Relación suelo-planta, factores de sitio y respuesta a la fertilización, en plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis* L. f.), en la zona Oeste, Cuenca del canal de Panamá. Tesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 89 p.
- Montagnini, F. 1992. Mixed tree plantations: experiments with native trees in Costa Rica and Argentina. *Agroforestry Today* 4(3):4-5.
- Nadeau, MB; Sullivan, TP. 2015. Relationships between plant biodiversity and soil fertility in a mature tropical forest, Costa Rica. *International Journal of Forestry Research* 2015(32946):13.
- Ortega, M. 2012. Ecología del paisaje y caracterización de la cobertura forestal, según piso altitudinal de la microcuenca del río La Balsa, Costa Rica, para establecer criterios para el manejo integrado de cuencas. Tesis Lic. Cartago, Costa Rica, Instituto tecnológico de Costa Rica. 46 p.
- Osborne, PL. 2000. *Tropical Ecosystems and Ecological Concepts*. Cambridge, UK, Cambridge University Press. 448 p.
- Ostertag, R; DiManno, NM. 2016. Detecting terrestrial nutrient limitation: a global meta-analysis of foliar nutrient concentrations after fertilization. *Frontiers in Earth Science* 4:23.
- Portuguez, EM. 2012. Estimación de la extracción de nutrimentos por parte aérea en plantaciones de teca (*Tectona grandis* Linn. f.) de las empresas Panamerican Woods y CYM Investment Group Ltda. en la península de Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. Tesis M.Sc. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 92 p.
- Quesada, C; Lloyd, J; Schwarz, M; Baker, T; Phillips, OL; Patiño, S; Czimczik, C; Hodnett, M; Herrera, R; Arneeth, A. 2009. Regional and large-scale patterns in Amazon forest structure and function are mediated by variations in soil physical and chemical properties. *Biogeosciences Discussion* 6:3993-4057.
- Quesada, C; Lloyd, J; Schwarz, M; Patino, S; Baker, T; Czimczik, C; Fyllas, N; Martinelli, L; Nardoto, G; Schmerler, J. 2010. Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. *Biogeosciences* 7(5):1515-1541.
- Ramírez, D. 2014. Estimación de la absorción de nutrimentos de cedro amargo (*Cedrela odorata* L.) como mecanismo de diagnóstico para mejorar las recomendaciones de manejo sostenible de la especie en plantaciones de pequeños agricultores del Programa Forestal de CoopeAgri RL, Costa Rica. Tesis Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 81 p.
- Resende, AV; Furtini, AE; Curi, N. 2005. Mineral nutrition and fertilization of native tree species in Brazil: research progress and suggestions for management. *Journal of Sustainable Forestry* 20(2):45-81.
- Rhoades, C. 1996. Single-tree influences on soil properties in agroforestry: lessons from natural forest and savanna ecosystems. *Agroforestry Systems* 35(1):71-94.

- Rodríguez, J; Álvarez, J. 2010. Nutrición y Fertilización de las Plantaciones Forestales. Santiago, Chile, Gráfica LOM. 521 p.
- Schlatter, JE; Gerding, V. 1995. Método de clasificación de sitios para la producción forestal, ejemplo en Chile. *Bosque* 16(2):13-20.
- Segura, JM; Castillo, A; Alvarado, A; Blanco, FA. 2006. Variación del contenido foliar de nutrimentos de *Alnus acuminata*. 30(1):53-63.
- Segura, M; Castillo, Á; Alvarado, A; Blanco, F. 2005. Extracción de nutrimentos en plantaciones de jaúl (*Alnus acuminata*) en la cuenca del río Virilla, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(2):109-120.
- SINAC, R-C-G. 2015. Inventario Forestal Nacional de Costa Rica 2014-2015 (en línea, sitio web). Disponible en https://www.sirefor.go.cr/pdfs/INF_CostaRica_ParaWeb.pdf.
- Sistema Nacional De Información Territorial (SNIT). 2020. Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) (en línea, sitio web). Consultado 28 nov. 2020. Disponible en <https://www.snitcr.go.cr/Visor/nodos2>.
- Sobrado, M. 2014. Relationship between leaf micro-and macro-nutrients in top canopy trees in a mixed forest in the upper Rio Negro in the Amazon region. *American Journal of Plant Sciences* 5(10):1423.
- Soethe, N; Lehmann, J; Engels, C. 2008. Nutrient availability at different altitudes in a tropical montane forest in Ecuador. *Journal of Tropical Ecology* 24(4):397-406.
- Stanley, WG; Montagnini, F. 1999. Biomass and nutrient accumulation in pure and mixed plantations of indigenous tree species grown on poor soils in the humid tropics of Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 113(1):91-103.
- Totey, N. 1992. Fertilizer management in forest plantations. Non-traditional sectors for fertilizer use (Tandon HLS, ed). Fertilizer Development and Consultation Organization, New Delhi, India. pp :107-128.
- Vaides, EE. 2004. Características de sitio que determinan el crecimiento y productividad de teca (*Tectona grandis* Lf), en plantaciones forestales de diferentes regiones en Guatemala. Tesis M.Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 68 p.
- Valladares, F; Niinemets, Ü. 2008. Shade tolerance, a key plant feature of complex nature and consequences. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 39:237-257.
- Villareal, J; Name, B; García, R. 2013. Zonificación de suelos de Panamá en base a niveles de nutrientes. *Ciencia Agropecuaria* 21:71-89.

Watanabe, T; Osaki, M. 2002. Mechanisms of adaptation to high aluminum condition in native plant species growing in acid soils: a review. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 33(7-8):1247-1260.

CAPÍTULO V

5.1 Conclusiones Generales

La base de datos reúne 3.559 registros georeferenciados sobre la concentración foliar (%) de N, P, K, Ca, Mg, S, y la concentración foliar (mg kg^{-1}) de Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo, Na y Al, de 197 especies forestales, que representan 145 géneros, 61 familias y 29 Órdenes. Cada registro posee información de variables ambientales como altitud, temperatura máxima, media y mínima, precipitación anual media, zona de vida y la clasificación del suelo a nivel de suborden de los sitios donde se encuentran los árboles muestreados.

Ochenta y cinco especies tuvieron uno o más elementos cuya MED.CONC se encontró por debajo del percentil 25 de la base de datos general, y se les clasificó como minimalistas. Sesenta y siete especies se clasificaron como acumuladoras de elementos, pues tuvieron en la concentración de uno o más elementos, medianas entre los percentiles 80% y 95% de la población total. Treinta y cuatro especies tenían la MED.CONC de uno o varios elementos por arriba del percentil 95% de la base de datos general, y se clasificaron como hiperacumuladoras.

La altitud y la temperatura afectan significativamente la concentración foliar de N, P, K y B, de manera que, al aumentar la altitud, la temperatura disminuye y la concentración foliar de N, P y K aumenta mientras que la del boro disminuye. En las zonas donde hay mayor precipitación, los árboles tienden a acumular más Mn, S y Al, que en lugares donde hay menor precipitación, donde en su lugar, los árboles tienen mayor concentración foliar de calcio y magnesio.

5.2 Recomendaciones Finales

Se recomienda aumentar la base de datos en cantidad de registros y diversidad de especies, para incrementar la precisión con la que podemos describir y clasificar las especies forestales según su concentración foliar de nutrimentos.

Se recomienda a los investigadores dedicados a la nutrición mineral de especies forestales sumarse a este esfuerzo aportando los resultados de los análisis foliares que posean o que realizarán en el futuro, presentando la información ordenada de manera que posea los requerimientos mínimos para ser incluidos dentro de la base de datos

La selección los futuros registros que se deseen ingresar a la base de datos deben contar con su respectiva clasificación taxonómica a nivel de especie, que provienen de muestras de tejido foliar de árboles mayores a tres años y que cuentan con resultados de la concentración foliar de nutrimentos. La información de cada registro debe poseer su ubicación geográfica (coordenadas) que permitan relacionar los registros con variables ambientales disponibles en las bases de datos georreferenciadas de Costa Rica.

5.4 Anexos

