



## Análisis de patrones de distribución espacial de individuos de *Inga thibaudiana* y *Cedrelinga cateniformis* en la región Amazonas – Perú

### Analysis of spatial distribution patterns of individuals of *Inga thibaudiana* and *Cedrelinga cateniformis* in the Amazon region - Peru

Juan E. Izquierdo<sup>1,2,\*</sup>

---

**Recibido:** 03 abril 2024 | **Aceptado:** 02 agosto 2024 | **Publicado en línea:** 19 agosto 2024

**Citación:** Izquierdo, JE. 2024. Análisis de patrones de distribución espacial de individuos de *Inga thibaudiana* y *Cedrelinga cateniformis* en la región Amazonas – Perú. Revista Forestal del Perú 39(1): 150-165. DOI: <https://doi.org/10.21704/rfp.v39i1.2175>

---

#### Resumen

Diversos autores ponen de manifiesto que, para poder realizar una adecuada gestión sostenible de los ecosistemas forestales, es de vital importancia tener la capacidad de conocer la estructura espacial de los bosques y las modificaciones que le puede ocasionar debido al aprovechamiento forestal para gestionar de manera sostenible los ecosistemas forestales. Los objetivos de este estudio fueron examinar y caracterizar el patrón espacial del tornillo (*Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke) y guabilla (*Inga thibaudiana* DC.), así como analizar su relación con la altitud (m) sobre el nivel del mar, la distancia (m) de los árboles aprovechables hasta un río y la distancia (m) de los árboles aprovechables hasta un árbol semillero. El análisis estadístico se realizó a través de las herramientas del análisis de patrones puntuales espaciales, que proveen un conjunto de métodos para estimar, a partir de la ubicación georreferenciada de las especies, la intensidad de puntos, la función  $K(r)$  y  $L(r)$ , y realizar pruebas de hipótesis del proceso puntual subyacente en el área de estudio. Asimismo, se evaluaron las relaciones con un conjunto de covariables espaciales. Los métodos utilizados muestran un patrón espacial no homogéneo para todos los árboles de tornillo y guabilla presentes en las áreas de estudio, con una clara agregación de puntos a distancias cortas (aproximadamente 15 metros) que resultó significativa en todo el rango estudiado. También, se determinó que la intensidad de guabilla está relacionada con la distancia al semillero, mientras que la distribución del tornillo se asocia con la altitud sobre el nivel del mar y la distancia a los ríos, lo cual pudo apreciarse al menos en una de las cuatro áreas de estudio.

**Palabras clave:** intensidad, árbol semillero, planes de manejo, distribución Poisson, patrón agregado

---

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Cajamarca (UNC), Cajamarca, Perú.

<sup>2</sup> Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.

\* Autor de Correspondencia: [jeizquierdop@unc.edu.pe](mailto:jeizquierdop@unc.edu.pe)

### Abstract

Various authors show that, to carry out adequate sustainable management of forest ecosystems, it is vitally important to have the ability to know the spatial structure of forests with precision and the modifications that forest exploitation can cause to said structure. Thus, the objectives of this study were: to examine and characterize the spatial pattern of the tornillo (*Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke) and guabilla (*Inga thibaudiana* DC.) and analyze its relationship with the altitude (m) above sea level, distance (m) from the usable trees to a river and the distance (m) of the usable trees to a seed tree. The statistical analysis was carried out through the tools of analysis of spatial point patterns, which provide a set of methods, which based on the georeferenced location of the species allowed estimating: the intensity of points, the function  $K(r)$  and  $L(r)$  and perform hypothesis tests of the underlying specific process in the study area. Likewise, based on the formulation of models, the relationships with a set of spatial covariates were evaluated. The methods used show a non-homogeneous spatial pattern of all the tornillo and guabilla trees present in the study areas, clearly perceiving the aggregation of points at short distances (approximately 15 meters) and significant throughout the range studied. Also, it was determined that the intensity of guabilla is related to the distance to the seedbed, while the tornillo is also related to the altitude above sea level and the distance to the rivers, which could be seen in at least one of the four study areas.

**Key words:** intensity, nurse tree, management plans, Poisson distribution, pattern added

### Introducción

Para asegurar un manejo y gestión forestal sostenible de los ecosistemas forestales, uno de los elementos clave es conocer y comprender la estructura espacial de los ecosistemas forestales y las modificaciones que le puede ocasionar a dicha estructura el aprovechamiento forestal (Corral-Rivas *et al.* 2010). Las perturbaciones antropogénicas, como la explotación forestal, pueden tener un efecto importante en los patrones de distribución de las poblaciones de plantas al modificar los procesos forestales (Webber *et al.* 2010). Por esta razón, el conocimiento del patrón espacial es clave para los estudios de la ecología forestal, ya que presenta evidencias de la estructura de la comunidad vegetal (Capretz *et al.* 2012). Una manera eficaz de caracterizar el patrón espacial es el empleo de la estadística espacial, en donde los resultados pueden combinar con la biología de la especie y poder inferir los procesos que determinan el patrón observado (Webber *et al.* 2010).

En específico, el análisis de patrones puntuales espaciales, que constituye una de las ramas de la estadística espacial, provee un conjunto de herramientas para analizar un patrón puntual espacial. Baddeley *et al.* (2016) definen a un patrón puntual espacial como un conjunto de datos que representan las ubicaciones es-

paciales observadas de cosas o eventos, como la ubicación de los árboles en un bosque, tal como en el caso de esta investigación. El análisis de un patrón puntual espacial permite determinar el tipo de distribución espacial que siguen los eventos (representados en forma de puntos), pudiendo ser: agrupado, aleatorio (homogéneo) o regular, así como evaluar su relación con determinadas covariables espaciales (Salinas-Melgoza 2016). En los bosques tropicales húmedos, los árboles se desarrollan en un ambiente esencialmente heterogéneo y variable (Richards 1996), condiciones que son cruciales para el ordenamiento espacial de los individuos.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo examinar y caracterizar el tipo de patrón espacial de *Inga thibaudiana* DC. (guabilla) y *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke (tornillo) utilizando estadísticas de resumen de segundo orden. Asimismo, se busca determinar si la altitud (m s. n. m.) sobre el nivel del mar, la distancia (m) de los árboles aprovechables hasta un río y la distancia (m) de los árboles aprovechables hasta un árbol semillero, influyen directamente en el patrón espacial de estas especies forestales en la selva tropical de la región Amazonas en el norte de Perú.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

Los territorios de las comunidades nativas de Shaín abarcan 19 347.20 ha; Agkais, 42 306.50 ha; Chayu Atunsamu, 2 569.20 ha; y la comunidad nativa de Kayacusha, 10 560.80 ha. Estas comunidades se ubican en el distrito de Imaza, provincia de Bagua y el distrito de Nieva, provincia de Condorcanqui, departamento de Amazonas, Perú. La región de Amazonas se encuentra ubicada entre las coordenadas referenciales: UTM 9311626 Norte y 184593 Este, Zona: 18M, Datum: WGS-84.

### Insumo de datos

Los datos sobre el recurso forestal utilizados en este estudio provienen de los inventarios forestales para aprovechamiento forestal efectuados entre 2011 y 2017. Estos inventarios fueron proporcionados por la Dirección Ejecutiva de Gestión de Bosques y de Fauna Silvestre de la Autoridad Regional Amazonas con sede en la ciudad de Chachapoyas departamento de Amazonas en Perú.

Esta información pertenece a los PMF (Planes de Manejo Forestal) aprobados para el aprovechamiento forestal, tanto de las comunidades nativas (50 PMF en total) como a personas naturales que cuentan con bosque.

Se procesó y estandarizó la información, considerando áreas con mayor número de individuos de las especies de estudio. Se generó un archivo Excel conteniendo las ubicaciones (coordenadas obtenidas por GPS) de tornillo (167) y guabilla (297), correspondientes a cuatro áreas ubicadas dentro de comunidades nativas, según se muestra en el Cuadro 1.

Este archivo contenía, las coordenadas UTM de cada individuo, permitiendo generar un archivo *shapefile* de puntos con atribuciones como diámetro a la altura del pecho (DAP), altura comercial (HC) y total estimada, nombre científico y común de las especies, su área basal y finalmente su volumen.

Estos puntos se ubican dentro de cuatro áreas de estudio, las cuales fueron seleccionadas por conveniencia, puesto que presentan

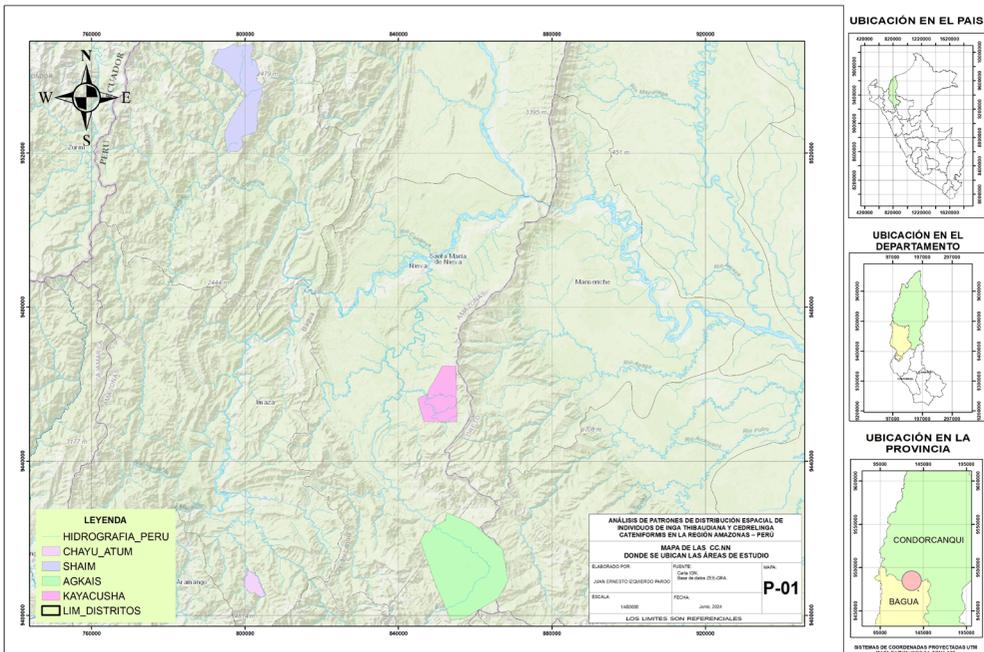


Figura 1. Mapa de las Comunidades Nativas donde se ubican las áreas de estudio.

Áreas de estudio	Número de árboles inventariados por especie	
	<i>Cedrelinga cateniformis</i>	<i>Inga thibaudiana</i>
Área 1	64	81
Área 2	34	119
Área 3	46	63
Área 4	23	34
Total	167	297

**Cuadro 1.** Número de árboles inventariados dentro de las áreas de estudio.

un mayor número de individuos inventariados por especie: Área 1 (dentro de la comunidad nativa Shaim), Área 2 (dentro de la comunidad nativa Chayu Atunsamu), Área 3 (dentro de la comunidad nativa Agkais) y Área 4 (dentro de la comunidad nativa Kayacusha), donde cada una de estas tiene una superficie de 50 ha (500 m × 1000 m).

Se resalta que, por lo general en el estudio de patrones espaciales se suelen establecer parcelas de 1 ha en promedio, pero este estudio utiliza información de inventarios forestales existente sobre grandes extensiones de tierra como ya se realizan en otros estudios (Traissac y Pascal 2014; Wiegand *et al.* 2009).

Asimismo, las áreas de estudio tienen pendientes que varían entre 4 % y 46.85 %, clasificadas en cinco niveles, según el Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor (Decreto Supremo N° 005-2022-MIDAGRI), considerando pendientes planas (0 a 2 %), ligeramente inclinadas (2 a 4 %), moderadamente inclinadas (4 a 8 %), fuertemente inclinadas (8 a 15 %), moderadamente empinadas (15 a 25 %), empinadas (25 a 50%), muy empinadas (50 a 75 %) y extremadamente empinadas (> 75 %).

El inventario realizado fue al 100% y consistió en ubicar, identificar y evaluar los árbo-

Área	Vértices			Características de los árboles		
	N°	X	Y	Estadísticos	DAP (m)	HC (m)
1	1	779384	9418226	Min.	0.41	10
	2	778888	9418162	Median	0.57	17
	3	778762	9419154	Mean	0.6013	16.81
	4	779258	9419218	Max.	1.35	42
2	1	799883	9410068	Min.	0.41	10
	2	800381	9410110	Median	0.56	13
	3	800465	9409114	Mean	0.6053	13.81
	4	799967	9409072	Max.	1.8	22
3	1	848782	9419715	Min.	0.43	8
	2	848734	9420212	Median	0.6	16
	3	849730	9420307	Mean	0.6379	15.57
	4	849777	9419809	Max.	1.55	22
4	1	848482	9450408	Min.	0.41	6
	2	847982	9450408	Median	0.55	14
	3	847982	9451408	Mean	0.5913	14.21
	4	848482	9451408	Max.	1.65	26

**Cuadro 2.** Vértices de las áreas seleccionadas y estadísticos descriptivos de los inventarios forestales.

les con valor comercial, llevándose a cabo en fajas. Es necesario mencionar que los individuos considerados son aquellos destinados al aprovechamiento maderable, y la distribución espacial resultante compromete solo a individuos que tienen o superan el DMC (Diámetro Mínimo de Corte), establecido mediante Resolución Jefatural N°458–2002–INRENA, y en vigencia por la Ley Forestal y de Fauna Silvestre N° 29763. Para el caso de la guabilla es de 41 cm y el tornillo es a partir de los 61 cm.

Cabe mencionar que la muestra corresponde a la totalidad de individuos inventariados de estas dos especies en estado aprovechable, dentro de las áreas de análisis. Por lo tanto, la muestra coincide con la población, requisito fundamental para poder definir a cada uno de los conjuntos de coordenadas de ambas especies como un patrón puntual espacial.

### Identificación de variables

#### *Variable dependiente:*

Patrón espacial del tornillo (*Cedrelinga cateniformis*) y guabilla (*Inga thibaudiana*) en la región Amazonas, Perú.

#### *Variables independientes:*

Z1= Altitud (m s. n. m.) sobre el nivel del mar.

Z2= Distancia (m) de los árboles aprovechables hasta un río.

Z3= Distancia (m) de los árboles aprovechables hasta un árbol semillero.

La ubicación de los árboles semilleros fue determinada junto con los inventarios de los árboles aprovechables, asumiendo que estos individuos presentan las mejores características fenotípicas de importancia para el mercado de la madera.

### Metodología

Para realizar este trabajo se asumió que la distribución de los individuos de las especies de árboles sigue un proceso puntual espacial. Este proceso, junto con otros procesos ecológicos, como los patrones de dispersión, germinación, emergencia y crecimiento de las plántulas, así como la supervivencia, determina la ubicación

de los árboles dentro del bosque (Maltez-Muro *et al.* 2007).

#### *Mapeo de puntos y análisis exploratorio espacial de datos:*

Se realizó un análisis exploratorio de los datos espaciales mediante la representación gráfica del patrón puntual a través de un mapa de puntos, donde cada punto representa la ubicación de un árbol en las cuatro áreas de estudio. Este mapa de puntos permitió aproximar el tipo de patrón puntual (aleatorio, regular o agregado) de las especies, ejecutado el programa ArcGis versión 10.5. En un primer momento, se asumió la existencia de un proceso puntual espacial que determina el patrón espacial del tornillo y la guabilla en los bosques de la región de Amazonas en Perú.

El patrón puntual espacial en estudio está conformado por el conjunto  $x = \{x_1, \dots, x_n\}$ , en donde cada punto  $x_i$  representa la ubicación de cada árbol de estas dos especies en coordenadas planas (en metros) WGS 1984 UTM zonas 17S y 18S.

#### *Estimación de la intensidad y de las estadísticas de resumen de segundo orden:*

La intensidad ( $\rho$ ) se utilizó para cuantificar el número de individuos por unidad de área de estudio, calculada en número de puntos por metro cuadrado o kilómetro cuadrado. En esta investigación se verificó que, tanto las áreas de estudio y la ubicación de los árboles se encuentren en el sistema de coordenadas WGS 1984 UTM zona 17S y 18S, lo cual permitió obtener la intensidad en unidades conocidas tales como: número de puntos por metro<sup>2</sup> y/o por km<sup>2</sup>.

En el análisis de un proceso puntual, en primer lugar, se busca la discrepancia entre la distribución encontrada en campo frente a un modelo Poisson, para ello se utilizaron las llamadas funciones K y L. Estas funciones resumen la dependencia espacial (agrupamiento de la entidad) en un rango de distancias y a múltiples escalas. De esta manera la función K de Ripley ilustra cómo cambia el agrupamiento espacial cuando cambia el tamaño de la vecin-

dad. La  $K$  de Ripley  $K(r)$  es, por tanto, el estimador de propiedades de segundo orden que evalúa a todas las escalas, tantas como diferentes radios ( $r$ ) consideremos (Torres 2013). Si el patrón observado cae por encima, debajo o dentro de los intervalos de confianza de Monte Carlo indican un patrón agregado, regular o al azar, respectivamente (Gray y He *et al.* 2009). Se utilizó el entorno RStudio.

Al igual que para el caso univariante, la significancia estadística de la función  $K12(r)$  se determinó con simulaciones (99 turnos toroidales), logrando simular las parcelas generadas aleatoriamente de las mismas dimensiones que la parcela empírica (Camarero *et al.* 2005). Con la finalidad de lograr una mejor interpretación de los resultados se representó gráficamente  $L(r)-r$  o  $L12(r)-r$  frente a  $r$ . Este análisis bivariado se realizó al tornillo y guabilla con la finalidad de verificar la existencia de una repulsión o asociación positiva entre especies.

#### **Pruebas de aleatoriedad espacial completa:**

Se realizó la prueba de aleatoriedad espacial completa con el fin de determinar si la distribución espacial de las especies es completamente aleatoria (intensidad homogénea o proceso Poisson homogéneo), o si se encuentran distribuidos formando agregados en el espacio (intensidad no homogénea), utilizando cuadrantes irregulares y de diagramas de Dirichlet.

#### **Estimación de modelos estadísticos de procesos puntuales:**

El modelamiento estadístico se realiza por medio de la intensidad de puntos, esta se logra estimar para una ubicación específica dentro del área de estudio, siendo los modelos log-lineales los más usados para representar su relación con un conjunto de covariables espaciales.

A los modelos resultantes se les conoce como como modelos paramétricos de procesos puntuales espaciales (Quispe 2016).

Las covariables espaciales utilizadas para la estimación de los modelos son los siguientes:

- La altitud sobre el nivel del mar ( $Z_1$ ),

- La distancia a los ríos ( $Z_2$ ) y
- La distancia al semillero ( $Z_3$ ).

Para evaluar la dependencia espacial de las dos especies de árboles maderables respecto a las covariables espaciales se formularon diversos modelos estadísticos que fueron estimados por el método de Máxima Verosimilitud (Badeley *et al.* 2016).

## **Resultados**

### **Estimación de la intensidad y estadísticas de resumen de segundo orden**

Si en el análisis realizado se asume un proceso Poisson homogéneo o también conocido como proceso puntual espacial completamente aleatorio (CSR), la estimación de la intensidad para cada área de estudio sería  $\hat{\rho} = n/W$ ; donde  $\hat{\rho}$  = representa la intensidad,  $n$  = frecuencia de puntos y  $W$  = área en  $\text{km}^2$ . Los resultados del caso de estudio se muestran en el Cuadro 3, donde se observó que la intensidad para el tornillo del área 1 es de aproximadamente 128 árboles por  $\text{km}^2$ , mientras que para la guabilla es de aproximadamente 162 árboles por  $\text{km}^2$ . En todas las áreas, la intensidad de la guabilla es superior al tornillo, lo que sugiere que es más probable encontrar un árbol de guabilla antes que uno de tornillo.

Los resultados se muestran en la Figura 2, donde los valores estimados de la función "L" se representan en líneas en color negro y el valor teórico en líneas punteadas de color rojo con sus respectivos intervalos de confianza bajo aleatoriedad espacial completo los cuales se muestran en la región de color gris. Los valores estimados son superiores a los valores teóricos en todas las áreas seleccionadas, incluso situándose fuera de la envolvente, lo que confirma la existencia de agregación o *clustering* tanto para el tornillo y guabilla, con resultados similares en todas las áreas analizadas. Por ejemplo, en el área 1, se muestra la existencia de un patrón agregado en un rango aproximado que va desde los 15 m (guabilla) a 130 m. De la misma forma, en el caso del

Áreas de estudio	Especies	Frecuencia de puntos (n)	Área de W (km <sup>2</sup> )	Intensidad (km <sup>2</sup> )
Área 1	tornillo	64	0.5	128
	guabilla	81	0.5	162
Área 2	tornillo	34	0.5	68
	guabilla	119	0.5	238
Área 3	tornillo	46	0.5	92
	guabilla	63	0.5	126
Área 4	tornillo	23	0.5	46
	guabilla	34	0.5	68

**Cuadro 3.** Estadísticas de resumen del patrón puntual homogéneo.

tornillo, el patrón agregado empieza a partir de los 30 m a más.

**Análisis bivariado:**

En el análisis bivariado, si la función empírica es significativamente mayor que cero, hay atracción (se esperaría que en donde está ubicado un tornillo, existiría cerca de este una guabilla o viceversa), si es significativamente menor que cero existe repulsión (se esperaría que donde se ubique un tornillo, no se encuentre cercano una guabilla o viceversa). La línea negra continua representa la función  $L_{12}$  cruzada o bivariada (Miranda et al. 2016).

Los resultados de la estimación de  $L_{12}(r)$  se muestran en la Figura 3, donde las líneas de color negro representan las estimaciones de esta función para determinados valores de  $r$  y las líneas punteadas representan sus respectivas envolventes (donde el nivel de significancia equivalente para la simulación es aproximadamente 4.6 %). Los valores estimados de  $L_{12}(r)$  en las cuatro áreas se ubican en la mayor parte dentro de la envolvente para dicha función, lo cual indica que no existe interdependencia entre especies (sin interacción). Con este resultado se puede inferir que, dentro de este rango de distancia analizado (250 m), en los bosques de la región de Amazonas – Perú, no necesariamente se puede encontrar una de estas especies con relación a la otra.

**Prueba de aleatoriedad espacial (CSR):**

Se plantearon las siguientes hipótesis:

H0: La intensidad es homogénea (CSR)

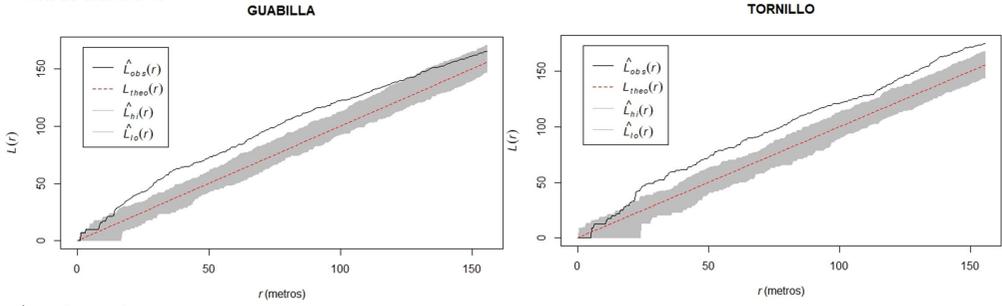
H1: Es un proceso Poisson no homogéneo (intensidad no homogénea).

Los resultados obtenidos del Cuadro 4 muestran un  $p$ -value  $< 0.05$ , en cada una de las áreas de estudio, rechazándose así la hipótesis nula. Es decir, existe suficiente evidencia estadística para afirmar que el patrón puntual de la ubicación de árboles es una realización de un proceso Poisson no homogéneo. Lo cual evidencia la existencia de lugares con mayor presencia de árboles de tornillo y guabilla (intensidad no homogénea) a lo largo del área de estudio. Por tanto, estimar un solo valor de intensidad no es suficiente para describir la distribución espacial de las especies; sería más adecuado estimar la intensidad en cada lugar del espacio de análisis, asumiendo proceso Poisson no homogéneo.

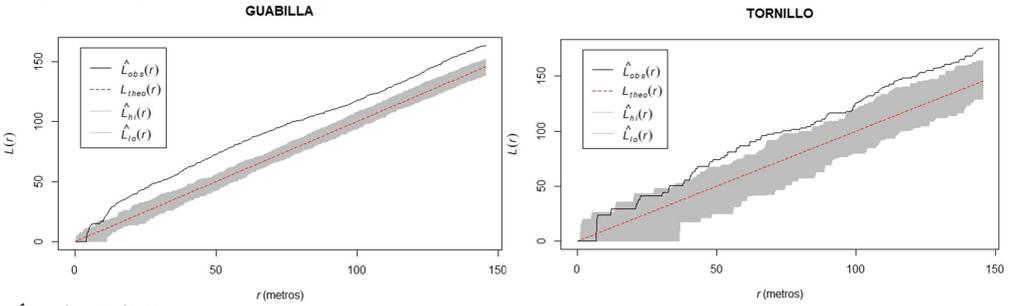
Para una mejor observación, se utilizaron variantes de colores, siendo el color amarillo intenso aquellos lugares que presentaron una mayor cantidad de individuos por unidad de área dentro del área de estudio seleccionada, como se visualiza en la Figura 5.

La estimación no paramétrica de la intensidad permitió identificar zonas con mayor presencia de puntos, logrando entender de mejor forma la distribución espacial presente en el área de estudio y poder estimar de mejor manera la intensidad con la cual se encuentran estos individuos en un ambiente natural, dom-

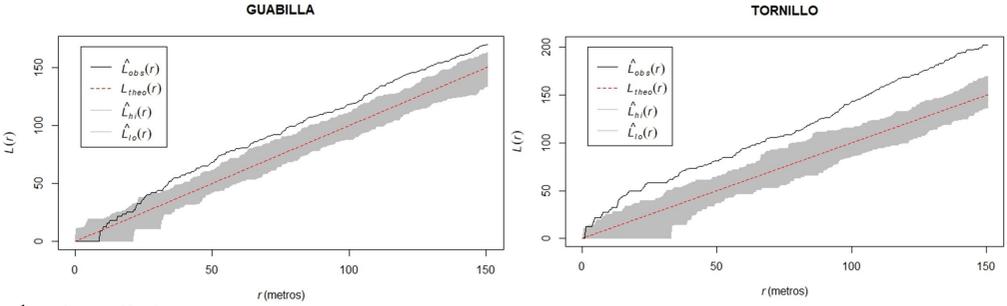
Área de estudio 1:



Área de estudio 2:



Área de estudio 3:



Área de estudio 4:

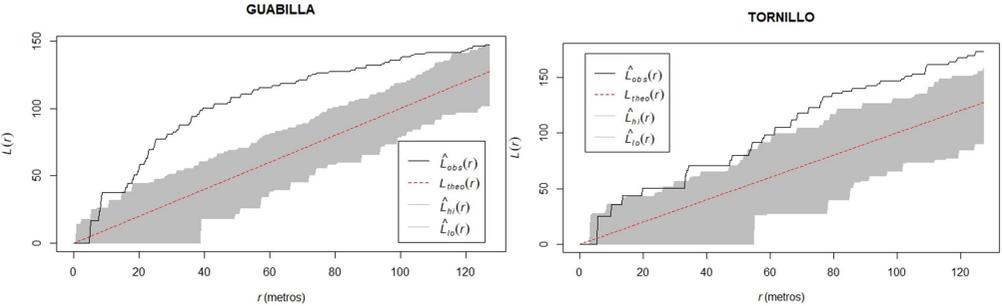
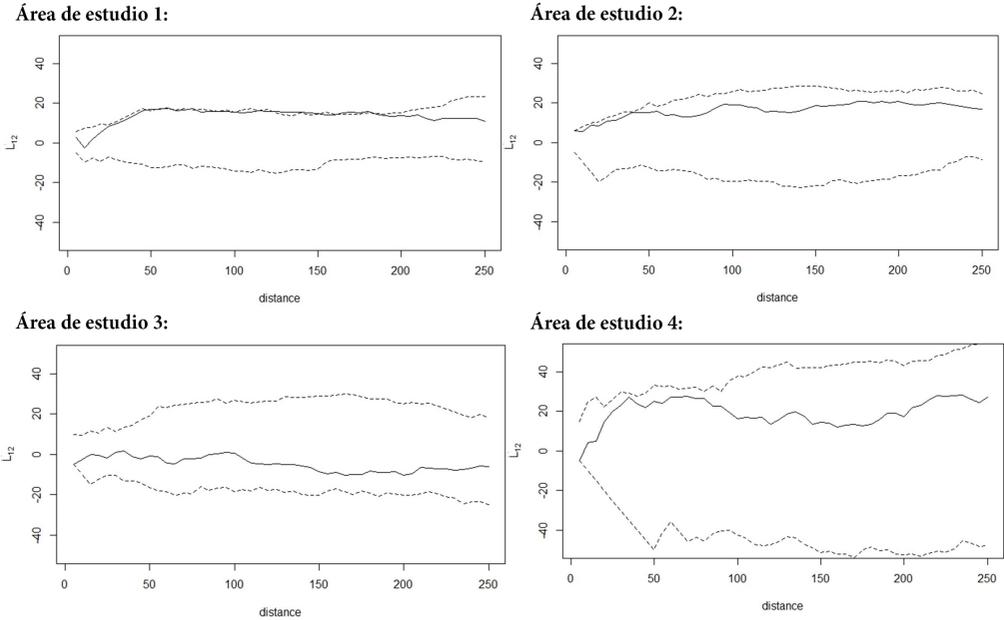


Figura 2. La función L de tornillo y guabilla presentes en las áreas de estudio 1, 2, 3 y 4.



**Figura 3.** Patrón bivariado tornillo vs guabilla en las cuatro áreas de estudio.

inado por especies forestales de gran porte, característico de un bosque tropical.

### Estimación de modelos

Se inició las estimaciones de los modelos que relacionan a la intensidad con una sola covariable a la vez, con el fin de evaluar los efectos de cada una de ellas. En el caso de la guabilla, cuyos resultados se describen en el Cuadro 5, muestran que la intensidad de guabilla (número de guabilla/km<sup>2</sup>) guarda relación con la presencia de árboles semilleros ( $Z_3$ ), ya que el coeficiente asociado a esta covariable resultó altamente significativo (95 % de confianza) para las cuatro áreas de estudio. La relación es negativa, debido a que el signo del coeficiente asociado a esta covariable tiene signo negativo en todas las áreas de estudio, lo cual indica que cuanto menor es la distancia al semillero, mayor será la intensidad de guabilla.

Respecto a las otras covariables, no se identificó relación alguna, a excepción del área cuatro, donde se muestra la relación con la altitud ( $Z_1$ ). Es decir, los patrones de distribución es-

pacial de los árboles maderables aprovechables de guabilla en las áreas analizadas de la región Amazonas son dependientes principalmente de la ubicación de los árboles semilleros, así como del nivel altitudinal, aunque dicho comportamiento solo se observó en el área cuatro, mientras que la distancia al río ( $Z_2$ ) no resultó significativa.

Por ejemplo, el modelo que relaciona la intensidad de guabilla con la distancia al semillero para el área 1, puede describirse de la siguiente forma:

$$\hat{\rho}(u) = e^{-6.93743541 - 0.02449275 \times Z_3}$$

Siendo  $Z_3$  la distancia en metros al Semillero y  $\hat{\rho}(u)$ : es la intensidad de Guabilla en la ubicación  $u$ .

En el caso del tornillo, los resultados de los modelos estimados seleccionados se describen en el Cuadro 6. En el cual se observa que la intensidad del tornillo (número de tornillo/km<sup>2</sup>) guarda relación con todas las covariables analizadas, es decir: nivel altitudinal ( $Z_1$ ), distancia al río ( $Z_2$ ) y la distancia de árboles semilleros

Área	Tipo	Número de polígonos	X <sup>2</sup>	Df	p-value
Área 1	Cuadrados irreg. guabilla tornillo	25	65.736	24	0.000019
		25	43.167	24	0.01904
	Dirichlet guabilla tornillo	35	63.38	34	0.003274
		35	62.334	34	0.004293
Área 2	Cuadrados irreg. guabilla tornillo	25	57.044	24	0.000329
		25	45.815	24	0.009318
	Dirichlet guabilla tornillo	35	94.934	34	0.000000
		25	44.393	24	0.01373
Área 3	Cuadrados irreg. guabilla tornillo	25	59.451	24	0.000152
		25	70.216	24	0.000004
	Dirichlet guabilla tornillo	25	59.68	24	0.000142
		25	61.58	24	0.000076
Área 4	Cuadrados irreg. guabilla tornillo	25	52.106	24	0.001516
		25	65.512	24	0.000020
	Dirichlet guabilla tornillo	40	117.49	39	0.000000
		40	82.787	39	0.000109

**Cuadro 4.** Pruebas de aleatoriedad espacial completa, basado en conteo de cuadrantes.

( $Z_3$ ), ya que el coeficiente asociado a cada co-variable resultó altamente significativo (95 % de confianza) en al menos una de las cuatro áreas de estudio.

Respecto al modelo que relaciona la intensidad de tornillo con la distancia al semillero para el área de estudio 1, puede describirse de la siguiente forma:

$$\hat{\rho}(u) = e^{-7.41335362 - 0.01686287 \times Z_3}$$

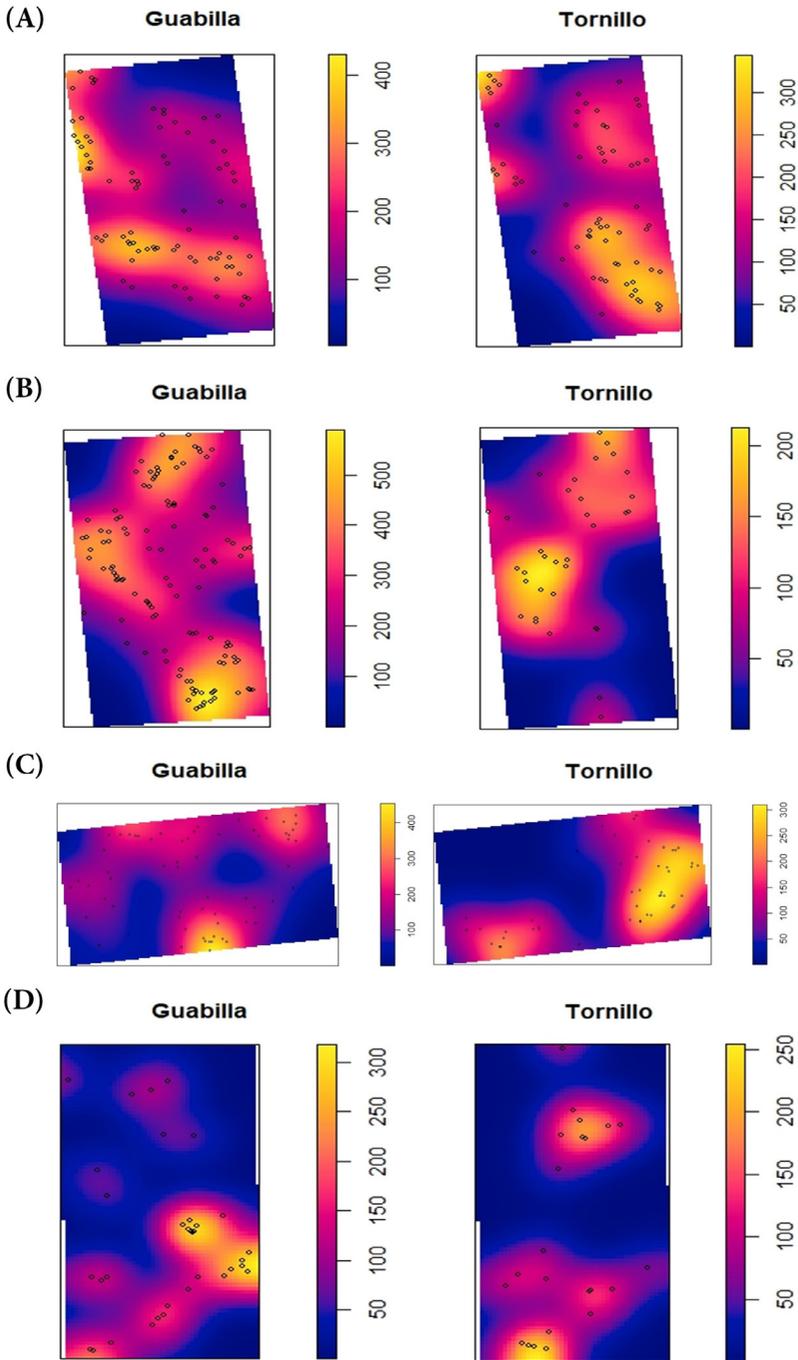
Siendo  $Z_3$  la distancia en metros al Semillero y  $\hat{\rho}(u)$ : es la intensidad de tornillo en la ubicación  $u$ , tal como se visualiza en el Cuadro 6. De forma similar los modelos seleccionados para el tornillo en las demás áreas de estudio se muestran en el Cuadro 6.

## Discusión

Los resultados de esta caracterización, para el caso de tornillo muestran una distribución

espacial no homogénea a lo largo de las áreas de análisis e identificándose la presencia de agregaciones de puntos. Similares resultados fueron obtenidos por Malleux (1974) en el departamento de Loreto, Perú, mediante el método gráfico. Saboya (2013), en un estudio en una parcela de corta anual, a través del método de agrupamiento encontró que el tornillo presentaba distribución agrupada, y que esta se podría deberse a la falta de homogeneidad del terreno del área de estudio. Sin embargo, respecto a la guabilla no se encontró bibliografía similar referentes a patrones de distribución espacial.

El patrón espacial no homogéneo obtenido en las cuatro áreas de estudio puede deberse a la variabilidad de las características ecológicas, edáficas, propios de los bosques tropicales, como el caso de las áreas de estudio ubicadas en los bosques de la región Amazonas. También, considerándose a los pro-



**Figura 4.** Intensidad de los individuos presentes en las áreas de estudio seleccionadas. A (Área 1), B (Área 2), C (Área 3) y D (Área 4).

Áreas de estudio	Modelo	VARIABLES	Estimate	S.E.	C195.lo	C195.hi	Ztest	Zval
Área 1	Poisson No homogéneo (3) Guabilla	(Intercept) Z <sub>3</sub>	-6.93743541 -0.024449275	0.198996071 0.003189092	-7.32746054 -0.03074325	-6.54741028 -0.01824224	*** ***	-34.862173 -7.680164
		(Intercept) Z <sub>3</sub>	-7.387980299 -0.008695579	0.16248756 0.00149056	-7.70645007 -0.01161702	-7.069510525 -0.005774135	*** ***	-45.467974 -5.833766
Área 3	Poisson Homogéneo (3) Guabilla	(Intercept) Z <sub>3</sub>	-7.04849341 -0.03130348	0.231392800 0.004445217	-7.50201496 -0.04001595	-6.59497185 -0.02259102	*** ***	-30.461161 -7.042059
		(Intercept) Z <sub>1</sub>	-27.96815 51.16776	4.275589 11.652872	-36.34815 28.32856	-19.58815 74.00697	*** ***	-6.541357 4.391000
Área 4	Poisson Homogéneo (3) Guabilla	(Intercept) Z <sub>3</sub>	-8.496558061 -0.005551851	0.299480680 0.001581658	-9.083529407 -0.008651844	-7.909586715 -0.002451858	*** ***	-28.370972 -3.510146

**Cuadro 5.** Coeficientes del modelo log - lineal univariado seleccionado para el caso de un proceso espacial Poisson no homogéneo para guabilla en las áreas de estudio. (\*, \*\*, \*\*\*; significativo a una  $p < 0.05, 0.01, 0, 0.001$ , respectivamente).

cesos endógenos (dispersión de semillas) o exógenos como la heterogeneidad del terreno (Condés y Martínez 1998) o los parches presentes en el bosque. Además, se podría considerar las cortas selectivas (uso no comercial) propias de las comunidades nativas presentes en las áreas de estudio. Bleher *et al.* (2002) sugieren que tres grupos de factores potenciales influyen en los patrones espaciales de los árboles: la ubicación y densidad de las fuentes de semillas, la dispersión, y los procesos post - dispersión.

En la actualidad, un plan de manejo forestal se define como un instrumento de gestión forestal con carácter de declaración jurada que constituye la herramienta dinámica y flexible para la implementación, seguimiento y control de actividades orientadas a lograr la sostenibilidad del ecosistema (Ley Forestal y de Fauna Silvestre N° 29763). En ese contexto, los resultados del estudio indican elementos importantes que deberían tomarse en consideración para estas dos especies maderables en su manejo forestal; ya que en el caso de la guabilla se determinó que esta especie no se encuentra distribuida aleatoriamente en el territorio (es decir la probabilidad de encontrar un árbol de guabilla no es la misma en cualquier lugar del territorio), sino más bien se encuentra formando agregados a partir de los semilleros, respecto de los cuales es más probable encontrar en sus inmediaciones árboles aprovechables. Asimismo, en el manejo forestal del tornillo, se puede considerar que esta especie está más presente en zonas cercanas a ríos, mayor altitud y en menor medida, cercana a un semillero en la selva de Amazonas. Este resultado contrasta con lo descrito por Palomino y Barra (2003), quienes indican que el tornillo se encuentra en Bosque Primario de Selva Baja y del Piso Inferior de Selva Alta; colinas medias y altas y en terrazas altas.

Considerando la metodología y los resultados obtenidos en este estudio, se podría realizar un análisis de patrón espacial teniendo una base de datos de inventarios de árboles a ser aprovechados en la región Amazonas.

Áreas de estudio	Modelo	Variables	Estimate	S.E.	CI95.lo	CI95.hi	Ztest	Zval
Área 1	Poisson No homogéneo (1) Tornillo	(Intercept) Z <sub>1</sub>	-12.256604240 0.003957995	1.42725342 0.00168559	-1.505397e+01 6.542988e-04	-9.459238947 0.007261691	*** *	-8.587546 2.348136
	Poisson No homogéneo (3) Tornillo	(Intercept) Z <sub>3</sub>	-7.41335362 -0.01686287	0.223753259 0.002795106	-7.85190195 -0.02234118	-6.97480529 -0.01138457	*** ***	-33.131824 -6.032999
Área 2	Poisson Homogéneo (1) Tornillo	(Intercept) Z <sub>1</sub>	-5.239161884 -0.006298951	1.885121155 0.002769726	-8.93393145 -0.01172751	-1.5443923144 -0.0008703875	** *	-2.779218 -2.274214
	Poisson Homogéneo (2) Tornillo	(Intercept) Z <sub>2</sub>	-8.988617757 -0.001725603	0.3222696028 0.0008626983	-9.62025457 -0.00341646	-8.356981e+00 -3.474527e-05	*** *	-27.891609 -2.000239
Área 3	Poisson Homogéneo (3) Tornillo	(Intercept) Z <sub>3</sub>	-7.96066328 -0.01628054	0.296836521 0.003390013	-8.54245217 -0.02292485	-7.378874386 -0.009636239	*** ***	-26.818342 -4.802501
	Poisson Homogéneo (2) Tornillo	(Intercept) Z <sub>2</sub>	-10.789511 4.298944	0.4683099 1.1502806	-11.707381 2.044436	-9.871640 6.553453	*** ***	-23.03925 3.73730
Área 4	Poisson Homogéneo (3) Tornillo	(Intercept) Z <sub>3</sub>	-7.47553059 -0.01693855	0.261168783 0.002920999	-7.9874120 -0.0226636	-6.96364918 -0.01121349	*** ***	-28.623369 -5.798888
	Poisson Homogéneo (1) Tornillo	(Intercept) Z <sub>1</sub>	-36.32808 72.77579	6.153582 16.592505	-48.38888 40.25508	-24.26728 105.29650	*** ***	-5.903566 4.386064
	Poisson Homogéneo (3) Tornillo	(Intercept) Z <sub>3</sub>	-8.05890285 -0.01440739	0.391129481 0.003323621	-8.82550254 -0.02092157	-7.292303150 -0.007893213	*** ***	-20.604182 -4.334848

**Cuadro 6.** Coeficientes del modelo log - lineal univariado seleccionado para el caso de un proceso espacial Poisson no homogéneo para tornillo en las áreas de estudio. (\*, \*\*, \*\*\*; significativo a una p < 0.05, 0.01, 0, 0.001, respectivamente).

Este conocimiento del patrón espacial es clave para los estudios de la ecología forestal, ya que puede presentar evidencias de la estructura de la comunidad vegetal (Capretz *et al.* 2012), así también se puede considerar como un requisito previo para entender muchos problemas en ecología y manejo de bosques (Pommerening y Stoyan 2008). Logrando de esta manera diseñar de mejor manera los esquemas de muestreo en campo y así lograr, tanto un mejor aprovechamiento como un manejo adecuado del recurso maderero de la región Amazonas en Perú.

En esta investigación también visualiza la importancia de la estadística en la ecología, principalmente de la rama de la estadística espacial denominada análisis de patrones puntuales espaciales, los cuales son herramientas valiosas para el análisis exploratorio de datos en el sector forestal, para describir la variabilidad de las masas forestales y para la comprensión y la cuantificación de las relaciones ecológicas, tal cual también lo señala Penttinen y Stoyan (2000). Puntualmente, las estadísticas de patrón de punto espacial se pueden utilizar para inferir la presencia de competencia (interacción intraespecífica e interespecífica) mediante la evaluación de la distribución espacial de los árboles y la determinación de las escalas en las que el patrón espacial es significativamente agregado o regular (Pilla y Ward 2012).

El conocimiento específico del patrón espacial del tornillo y guabilla obtenido en este estudio no solo facilitaría su aprovechamiento forestal maderero, sino que especialmente ofrece valiosa información para las propuestas de ordenamiento forestal, silvicultura, dendrología, etc.; con lo cual se puede avanzar aún más en el desarrollo y técnicas de manejo de los bosques tropicales, como es el caso de Amazonas en Perú. Además, estudios sobre los efectos secundarios de la explotación forestal, como la pérdida de dispersores de semillas, pueden afectar el reclutamiento de árboles, y los impactos accidentales, como daños a las plántulas, árboles jóvenes y el dosel (Babweteera y Brown 2010).

## Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que el tipo de patrón espacial de las especies *Inga thibaudiana*. DC. (guabilla) y *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke (tornillo) en la región de Amazonas, obedece a un patrón agregado (*cluster*). Esto debido a que no se distribuyen aleatoriamente a lo largo de las áreas de estudio, identificándose agregaciones de individuos de ambas especies. Por tanto, se rechaza el proceso puntual espacial Poisson homogéneo. Asimismo, en el análisis bivariado se identificó que no existe interdependencia (sin interacción) entre las especies de guabilla y tornillo en los bosques de la región Amazonas, es decir, no necesariamente se puede encontrar una de estas especies con relación a la otra.

Se evidenció también que la intensidad (número de guabilla/km<sup>2</sup>) de la guabilla guarda relación con la presencia de árboles semilleros (Z3), el cual pudo observarse para las cuatro áreas de estudio. El sentido de dicha relación es negativo, lo cual indica que cuanto menor es la distancia al semillero, mayor será la intensidad de guabilla. Respecto a las otras covariables no se identificó relación alguna, a excepción del área cuatro, donde se muestra la relación con la covariable altitud sobre el nivel del mar (Z1). Para el caso de tornillo se observó que la intensidad (número/km<sup>2</sup>) guarda relación con todas las covariables analizadas, es decir: altitud sobre el nivel del mar, distancia al río y la distancia de árboles semilleros, ya que el coeficiente asociado a cada covariable resultó altamente significativo (95 % de confianza) en al menos una de las cuatro áreas de estudio. De esta manera, se puede sugerir que al momento de realizar el muestreo de ambas especies; considerar un muestreo adaptativo por conglomerado, tomando en cuenta la ubicación del árbol semillero en el caso de la guabilla. Mientras que en el caso del tornillo se recomienda además incluir la distancia a los ríos y la altitud sobre el nivel del mar.

Por otra parte, considerando el patrón de puntos espaciales no homogéneos obtenidos para ambas especies en un bosque no manejado como en el caso del área 1, en donde se

muestra la existencia de un patrón agregado en un rango aproximado que va desde los 15 m hasta los 130 m para la guabilla. De la misma forma, en el caso del tornillo, se aprecia que el patrón agregado empieza a partir de los 30 m a más, contrastando este resultado con lo obtenido por Malleux (1974), quien luego de analizar todas las trochas de muestreo cada 100 metros ubicó espacialmente cada árbol de tornillo dentro del gráfico de muestreo. Este estudio puede servir a la biogeografía de estas dos especies estudiadas en los bosques de Amazonas en Perú. Es decir, se puede lograr modelar su distribución espacial tomando en cuenta las variables espaciales consideradas en esta investigación, además de considerar variables bioclimáticas que son típicamente utilizadas en este tipo de estudios. Finalmente, es necesario un muestreo más intensivo de ambas especies con el fin de obtener resultados más definitivos.

### Contribución de los autores

JEI: diseño y ejecución, desarrollo de la metodología, curación de datos y supervisión.

### Conflicto de intereses

Los autores no incurrir en conflictos de intereses.

### Fuentes de financiamiento

Esta investigación no recibió ninguna subvención específica de ninguna agencia de financiación, sector gubernamental ni comercial o sin fines de lucro.

### Aspectos éticos / legales

Los autores declaran no haber incurrido en aspectos antiéticos ni haber omitido normas legales.

### ID ORCID

Juan E. Izquierdo

<https://orcid.org/0000-0001-7492-1396>

### Referencias

- Babweteera, F; Brown, N. 2010. Spatial Patterns of Tree Recruitment in East African Tropical Forests That Have Lost Their Vertebrate Seed Dispersers. *Journal of Tropical Ecology* 26(2):193-203.
- Baddeley, A; Rubak, E; Turner, R. 2016. Spatial point patterns: methodology and applications with R. Chapman and Hall/CRC. 828 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b19708>.
- Bleher, B; Oberrath, R; Böhning-Gaese, K. 2002. Seed dispersal, braeding system, tree density and the spatial pattern of trees—a simulation approach. *Basic and Applied Ecology* 3(2):115-123.
- Camarero, J; Gutiérrez, E; Fortin, MJ; Ribbens, E. 2005. Spatial patterns of tree recruitment in a relict population of *Pinus uncinata*: forest expansion through stratified diffusion. *Journal of Biogeography* 32(11): 1979-1992.
- Capretz, RL; Batista, JLF; Sotomayor, JFM; da Cunha, CR; Nicoletti, MF; Rodrigues, RR. 2012. Spatial pattern of four forest communities by Ripley's K function in São Paulo state. *Ciência Florestal* 22(3):551-565.
- Condés, S; Martínez-Millán, J. 1998. Comparación entre los índices de distribución espacial de árboles más usados en el ámbito forestal. *Investigación Agraria-Sistemas y Recursos Forestales* 7(1/2):173-187.
- Corral-Rivas, J; Wehenkel, C; Castellanos-Bocaz, H; Vargas-Larreta, B; Diéguez-Aranda, U. 2010. A permutation test of spatial randomness: Application to nearest neighbour indices in forest stands. *Journal of Forest Research* 15(4):218-225. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10310-010-0181-1>.
- Gray, L; He, F. 2009. Spatial point-pattern analysis for detecting density-dependent competition in a boreal chronosequence of Alberta. *Forest Ecology and Management* 259(1):98-106.
- Malleux, J. 1974. Analisis de dispersion de 10 especies forestales de un bosque húmedo tropical. *Revista forestal del Perú* 5(1-2):55-66.

- Miranda, A; Hernández, HJ; Bustamante, R; Díaz, EM; González, LA; Altamirano, A. 2016. Regeneración natural y patrones de distribución espacial de la palma chilena *Jubaea chilensis* (Molina) Baillon en los bosques mediterráneos de Chile central. *Gayana Botánica* 73(1):54-63.
- Maltez-Mouro, S; García, L; Marañón, T; Freitas, H. 2007. Recruitment patterns in a mediterranean oak forest: A case study showing the importance of the spatial component. *Forest Science* 53(6):645-652.
- Palomino, J; Barra, M. 2003. Especies forestales nativas con potencial para reforestación en la provincia de Oxapampa y fichas técnicas de las especies de mayor prioridad. Programa Selva Central Oxapampa, ProNaturaleza. Oxapampa, Perú. 109 p.
- Pillay, T; Ward, D. 2012. Spatial pattern analysis and competition between acacia karroo trees in humid savannas. *Plant Ecology* 213(10):1609-1619. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11258-012-0115-4>.
- Penttinen, A; Stoyan, D. 2000. Recent applications of point process methods in forestry statistics. *Statistical science* 15(1):61-78. DOI: <https://doi.org/10.1214/ss/1009212674>.
- Pommerening, A; Stoyan, D. 2008. Reconstructing spatial tree point patterns from nearest neighbour summary statistics measured in small subwindows. *Canadian Journal of Forest Research* 38(5):1110-1122. DOI: <https://cdn-sciencepub.com/doi/abs/10.1139/X07-222>.
- Quispe, B. 2016. Modelos estadísticos en procesos puntuales espaciales Poisson para evaluar la distribución espacial de los hechos delictivos en Lima, Perú. 99 p.
- Richards, PW. 1996. The tropical rain forest. Second edition. Cambridge University. United Kingdom. Great Britain. 575 p.
- Salinas-Melgoza, MA. 2016. Aspectos ecológicos de patrones espaciales de árboles tropicales, caracteres de historia natural y tipo de hábitat en una selva húmeda neotropical. Tesis de doctorado. Chajul Chiapas, México. 94 p.
- Saboya, N. 2013. Distribución espacial de las especies arbóreas aprovechables, de la parcela de corta anual 2 bloque II de la comunidad nativa Santa Mercedes, río Putumayo, Perú. Tesis de doctorado. Universidad Nacional de la Amazonia Peruana. 81 p.
- Torres, MT. 2013. Análisis de los patrones de distribución espacial de las poblaciones de agaves invasoras en la llanura costera eólica del parque natural de Cabo de Gata-Níjar. Trabajo Fin de Grado de la Universidad de Almería. 52 p.
- Traissac, S; Pascal, JP. 2014. Birth and life of tree aggregates in tropical forest: hypotheses on population dynamics of an aggregated shade-tolerant species. *Journal Of Vegetation Science* 25(2):491-502. DOI: <https://doi.org/10.1111/jvs.12080>.
- Webber, BL; Norton, BA; Woodrow, IE. 2010. Disturbance affects spatial patterning and stand structure of a tropical rainforest tree. *Austral Ecology* 35(4):423-434.
- Wiegand, T; Martínez, I; Huth, A; Associate Editor: Peter D. Taylor, & Editor: Donald L. DeAngelis. 2009. Recruitment in Tropical Tree Species: Revealing Complex Spatial Patterns. *The American Naturalist* 174(4):E106-E140. Disponible en <http://www.jstor.org/stable/10.1086/605368>.