

# Diseño experimental de la operación de monitoreo de biodiversidad

Nelson R. Salinas

Jardín Botánico de Bogotá  
Grupo Conservación *in situ*

5 de mayo de 2025

## Introducción

El grupo de investigación “Conservación *in situ*” del Jardín Botánico de Bogotá ha incorporado entre sus objetivos para la actual vigencia el establecimiento de un programa de monitoreo de diversidad vegetal a lo largo del área de jurisdicción del distrito. Para cumplir dicho propósito es necesario implementar un diseño de muestreo estadístico.

Como variables de para orientar el diseño se propone utilizar la diversidad alfa de plantas vasculares (media de especies por unidad de área) y biomasa aérea vegetal (toneladas por km<sup>2</sup>). Algunas variables accesorias pueden ser diversidad filogenética, índices de dominancia ecológica de especies vegetales o valores de diversidad de artrópodos y aves.

## Diseño

Se propone un muestreo sistemático post-estratificado de probabilidades desiguales de muestreo. El diseño será sistemático porque los puntos de muestreo estarán distribuidos a intervalos regulares en el área de estudio. La manera más simple de establecer sistematicidad es a través de una cuadrícula, cuyas celdas servirán como unidades principales de muestreo (*psu*). El tamaño de estas celdas (o resolución de la cuadrícula) se ajustó a 4 km<sup>2</sup>, como una manera de evitar posibles efectos de autocorrelación espacial entre muestras vecinas. Además, otros proyectos del grupo también han utilizado cuadrículas de la misma resolución dentro de su diseño de muestreo. Dentro de cada celda se seleccionará un solo punto de muestreo, que correspondería a la unidad secundaria de muestreo (*ssu*).

Los estratos corresponderán a clases de cobertura vegetal (páramo, bosque, etc.). Durante esta fase exploratoria, los estratos han correspondido a la leyenda nacional de coberturas

de la tierra CORINE Land Cover adaptada para Colombia (IDEAM, 2010). Este esquema de clasificación de coberturas cuenta tanto con un producto cartográfico para el área de estudio como con un protocolo de verificación de campo, lo cual posibilita la preselección de puntos sobre coberturas asumidas y la postestratificación.

La leyenda CORINE Land Cover define bastantes coberturas en Bogotá (más de 60), demasiadas como para utilizarlas como estratos: un número alto de estratos necesariamente implica un número excesivo de unidades muestrales. Por esta razón se utilizarán nueve clases intermedias de la leyenda como estrato, de acuerdo a la agregación del cuadro 1.

Adicionalmente, se asignarán probabilidades diferenciales de selección a las unidades de muestreo, proporcionales al área del tipo de cobertura vegetal dentro del universo de muestreo. De esta manera, se evitará el sobre-muestreo en coberturas comunes (p.e., páramos) y el sub-muestreo en coberturas escasas (p.e., bosques).

Dado que no todas las unidades primarias de muestreo serán visitadas, sino que serán seleccionadas dadas sus probabilidades de muestreo, el efecto neto será que las unidades estarán dispersas aleatoriamente a lo largo y ancho del marco geoestadístico. Para esta clase de muestreos sistemáticos es posible utilizar los estimadores de varianza de un muestreo aleatorio simple o de un muestreo estratificado simple (Lohr, 2021). Sin embargo, se propone utilizar la versión de Hájek (1964) de los estimadores de Horvitz and Thompson (1952) para muestreo aleatorio. Por ejemplo, la varianza del total estimado ( $\hat{T}$ ) es

$$v(\hat{T}_y) = \sum_{i \in S} c_i \left( \frac{y_i}{\pi_i} - \hat{B} \right)^2$$

donde  $y_i$  es la observación de la variable  $y$  en la unidad  $i$ ,  $\pi_i$  es la probabilidad de muestreo de la unidad  $i$ ,  $n$  el tamaño muestral,

$$\hat{B} = \frac{\sum_{i \in S} \frac{c_i y_i}{\pi_i}}{\sum_{i \in S} c_i}$$

y

$$c_i = \frac{n}{n-1} (1 - \pi_i)$$

Para el caso de la media  $\hat{\mu}$ , la varianza está determinada por

$$v(\hat{\mu}) = \frac{1}{N^2} v(\hat{T}_y)$$

donde  $N$  es el numero total posible de muestras en la población.

Clase agregada	Leyenda
1.4. Zonas verdes artificializadas	1.4.1. Zonas verdes urbanas 1.4.1.2. Parques cementerio 1.4.1.3. Jardines botánicos 1.4.2. Instalaciones recreativas
2. Territorios agrícolas	2.1.1. Otros cultivos transitorios 2.1.2.1. Arroz 2.1.3. Oleaginosas y leguminosas 2.1.4. Hortalizas 2.1.5. Tubérculos 2.1.5.1. Papa 2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos 2.2.1.2. Caña 2.2.2.1. Otros cultivos permanentes arbustivos 2.2.2.2. Café 2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos 2.2.3.2. Palma de aceite 2.2.3.4. Mango 2.2.4. Cultivos agroforestales 2.2.5. Cultivos confinados 2.3.1. Pastos limpios 2.3.2. Pastos arbolados 2.3.3. Pastos enmalezados 2.4.1. Mosaico de cultivos 2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos 2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales 2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales 2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales
3.1. Bosques	3.1.1.1.1. Bosque denso alto de tierra firme 3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme 3.1.2.1.1. Bosque abierto alto de tierra firme 3.1.2.2.1. Bosque abierto bajo de tierra firme 3.1.2.2.2. Bosque abierto bajo inundable 3.1.3.1. Bosque fragmentado con pastos y cultivos 3.1.3.2. Bosque fragmentado con vegetación secundaria 3.1.4. Bosque de galería y ripario 3.1.5. Plantación forestal
3.2.1 Herbazales	3.2.1.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado 3.2.1.1.1.2. Herbazal denso de tierra firme arbolado 3.2.1.1.1.3. Herbazal denso de tierra firme con arbustos 3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado 3.2.1.2.2. Herbazal abierto rocoso
3.2.{2 & 3} Arbustales	3.2.2.1. Arbustal denso 3.2.2.2. Arbustal abierto 3.2.3. Vegetación secundaria o en transición 3.2.3.1. Vegetación secundaria alta 3.2.3.2. Vegetación secundaria baja

Cuadro 1: Coberturas CORINE Land Cover agregadas consideradas en el diseño muestral.

## Marco geoestadístico

El universo muestral abarca todas las coberturas vegetales del área urbana y rural de la ciudad de Bogotá. En este sentido se excluyen la áreas de infraestructura artificial y los cuerpos de agua.

En la figura 1 se ejemplifica un posible conjunto de muestras seleccionadas de acuerdo a los lineamientos estipulados anteriormente. Puede observarse que la densidad muestral es más alta en las coberturas de menor representación (plantaciones forestales, bosques), mientras que en los páramos y demás ecosistemas de herbazal, la densidad es mínima. En esta simulación, el número de muestras designadas para la cobertura de bosque fue 28, 37 para los territorios agrícolas, 47 para los herbazales, 30 para los arbustales y 18 para las zonas verdes artificializadas. En esta simulación se asumió que se establecerían 160 muestras, derivadas de ciclos de muestreo que cubren dos años, en los cuales se contarán con 2 brigadas que podrían visitar 1 localidad por semana durante periodos de 10 meses de contratación.

## Temas pendientes por definir con el equipo

**Intensidad de muestreo.** Usualmente, el tamaño muestral es definido indirectamente al seleccionar una varianza máxima objetivo para la variable principal. Sin embargo, en este caso no existe un conjunto de datos en el área de estudio que nos permita realizar una estimación preliminar de la varianza. De esta manera, la principal manera de definir el tamaño de la muestra será el costo de la operación. En las próximas semanas se realizarán reuniones con los demás botánicos del equipo para realizar una tabla de costos aproximados para cada uno de los diferentes diseños de punto muestral.

**Implementación de una estrategia de anonimización.** En este momento no es claro si las localidades de muestreo deben ser alteradas al ser publicadas para proteger la reserva de los dueños de predios.

## Referencias

- Hájek, J. (1964). Asymptotic theory of rejective sampling with varying probabilities from a finite population. *The Annals of Mathematical Statistics*, 35(4):1491–1523.
- Horvitz, D. G. and Thompson, D. J. (1952). A generalization of sampling without replacement from a finite universe. *Journal of the American statistical Association*, 47(260):663–685.
- IDEAM (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land*

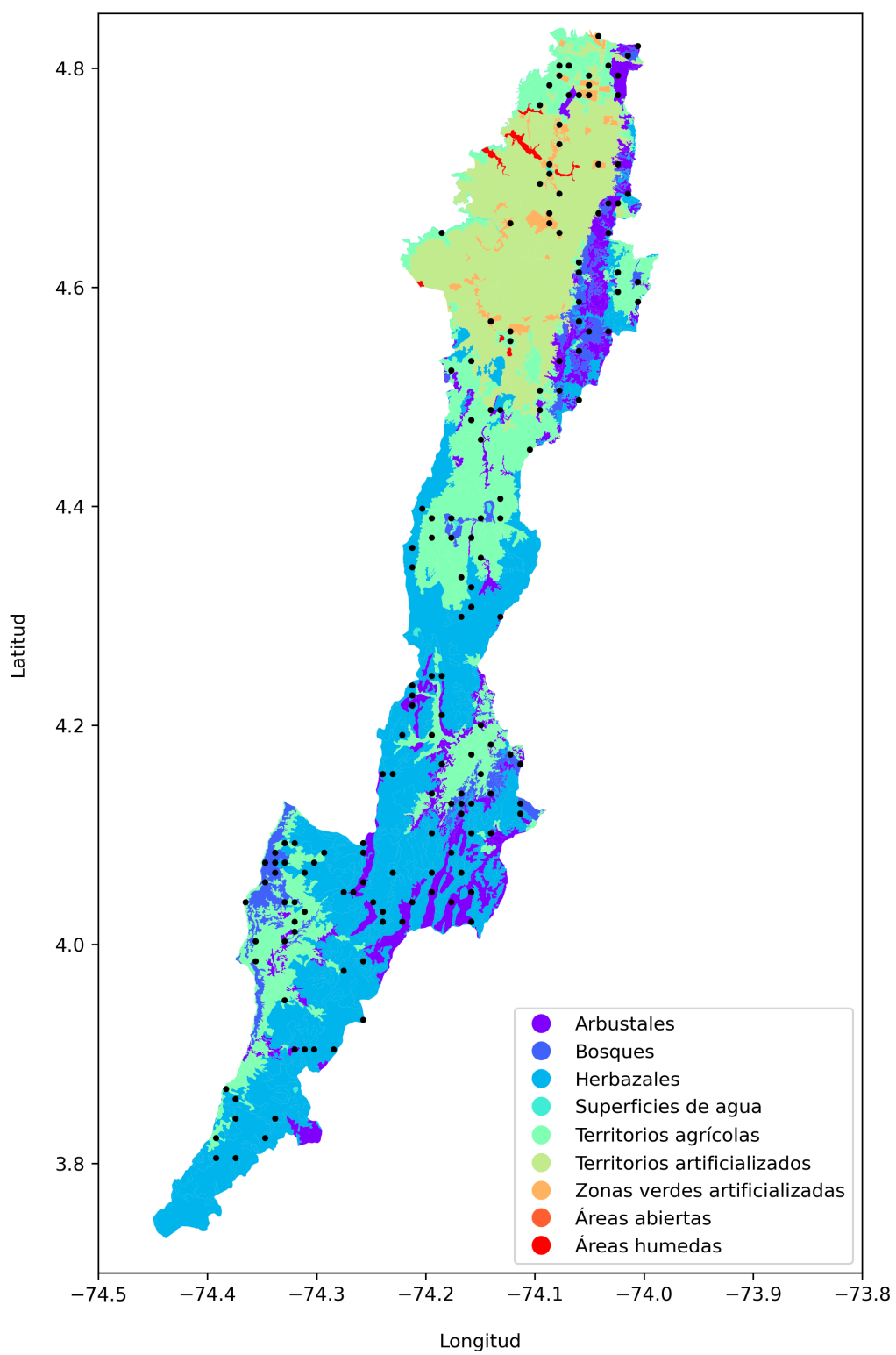


Figura 1: Simulación de selección de puntos muestrales (n=160).

*Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000.* Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Lohr, S. L. (2021). *Sampling: design and analysis*. Chapman and Hall/CRC.