

Introducción al Diseño de Muestreo

Ariel A. Farías, agosto 2024

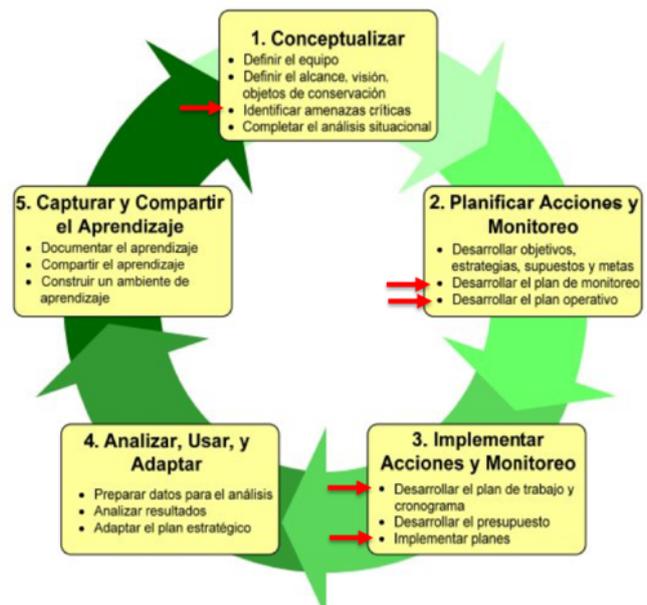


¿Por qué coleccionar datos?

1. *Comprender* el sistema de interés.
2. *Predecir* el estado futuro, o bajo determinadas condiciones, del sistema de interés
3. *Tomar decisiones informadas* para el manejo del sistema de interés.



Investigación Científica



Gestión

Hipótesis y Predicciones

- Explicación lógica de un fenómeno; describe su causa probable o el mecanismo involucrado.
- Se desprende lógicamente del marco teórico y antecedentes.

- Qué se espera observar bajo las condiciones de estudio si la hipótesis científica es verdadera.
- No se desprende de otras hipótesis.

- Patrones Predichos en las variables medidas.
- Evalúa el cumplimiento de las predicciones.
- Describen el patrón cuantitativo; es responsabilidad del investigador asociar dicho resultado a la interpretación sobre el cumplimiento de la hipótesis científica

Un correcto **diseño experimental** (o de muestreo) permite confrontar predicciones y resultados, y asegura una puesta a prueba de hipótesis adecuada y una estimación precisa de los parámetros de interés.



Método Hipotético-Deductivo

Censo vs. Muestreo

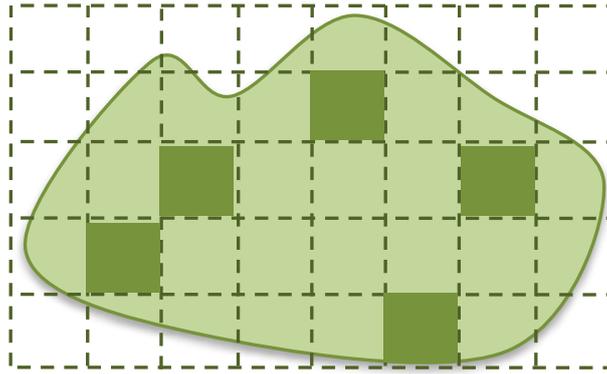
Censo: Se toman datos de **toda la población objetivo**, por lo que la variable de interés se conoce con exactitud (excepto por error de medición).

- Raramente es posible obtener información de toda la población de interés.



Muestreo: Se examinan **subconjuntos representativos (muestras)** de la población objetivo, y la variable poblacional de interés se **estima (infiere estadísticamente)**.





Variable de interés: condición corporal de una especie de roedor en un área protegida.

Población: todos los individuos presentes en el área protegida.

Es **logísticamente imposible censar toda el área** para medir la condición corporal de todos los individuos.

Unidad muestral: grilla de trapeo vivo de 1 ha (100 trampas cada 10 m).

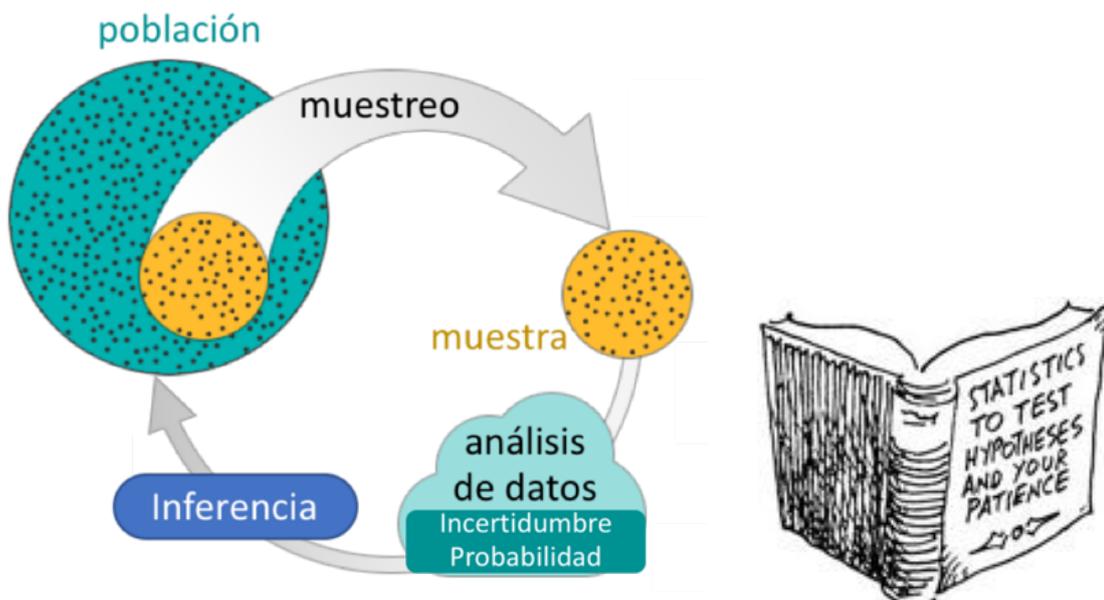
Diseño de Muestreo: 5 cuadrantes de 1 ha elegidos al azar en para instalar grillas de trapeo.

Muestra: individuos capturados

Indicador: razón peso/longitud cabeza+cuerpo.

Muestreo e Inferencia

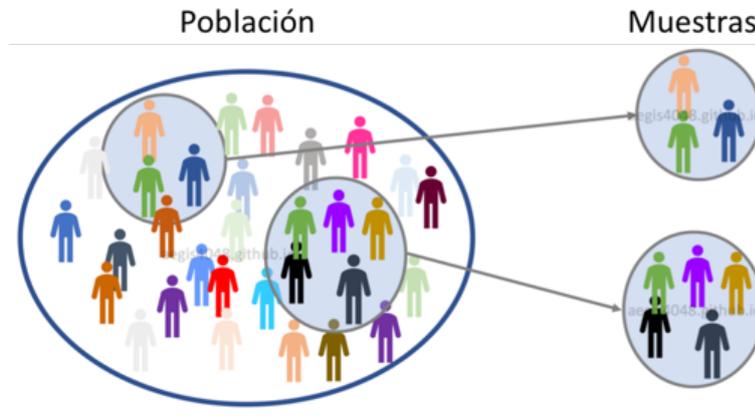
Inferencia Estadística: Hacer enunciados o afirmaciones acerca de una *población* basados en los resultados obtenidos en *muestras* de dicha población [definición coloquial].



➤ **Parámetros:** propiedades que describen una *población*.

➤ **Estadígrafos (estimadores):** propiedades que describen una *muestra*.

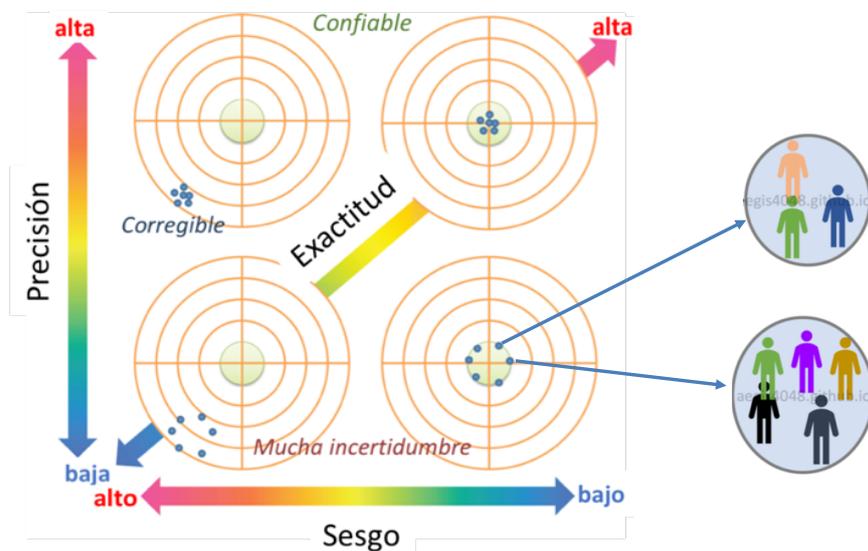
Trabajar con muestras conlleva un *error de muestreo* asociado a su composición, por lo que los *estimadores de la variable de interés* diferirán en algún grado del valor real y desconocido en la población objetivo (incertidumbre).



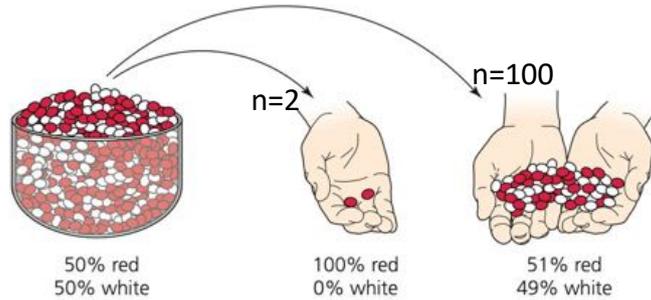
La calidad y alcance de la información obtenida dependerá de la *representatividad* de la muestra y la *confiabilidad* de los estimadores obtenidos.

Muestreo: Características de un Estimador

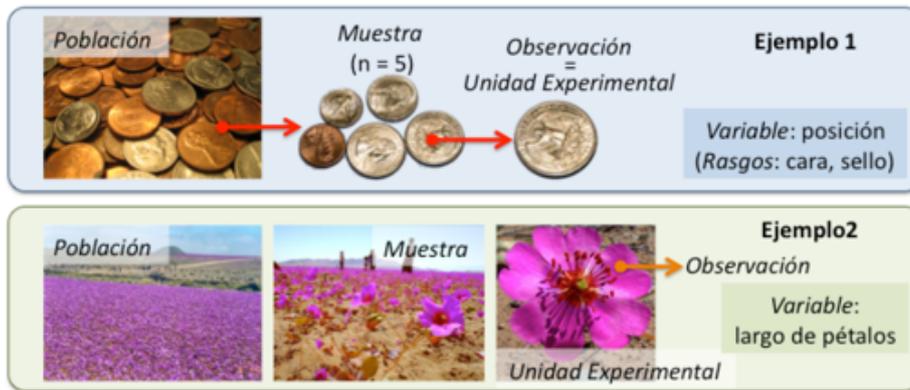
- **Precisión:** tendencia de un estimador a mostrar *valores similares en distintas muestras*.
- **Sesgo:** tendencia de un estimador a *constantemente sobrestimar o subestimar* el parámetro.
- **Exactitud:** Un estimador es exacto cuando es *preciso e insesgado*.
- **Robustez:** La exactitud no depende de las condiciones en que se realiza el estudio.
- **Confiabilidad:** Un estimador es confiable cuando es *exacto* (o al menos *preciso*) y *robusto*.



La precisión incrementa con el tamaño de muestra (i.e. número de unidades de muestreo o experimentales).



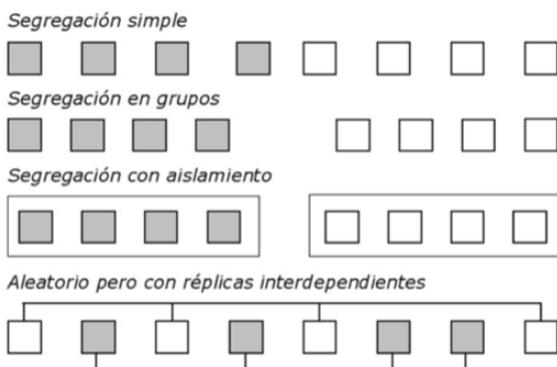
Unidad de muestreo o experimental (Réplica): mínima unidad *'independiente'* sobre la cual se realiza(n) la(s) observación(es) o medición(es) de interés.



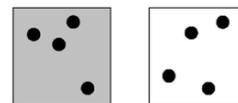
Replicación: repetición *"independiente"* del mismo experimento o medición sobre dos o más unidades experimentales (o de muestreo).

- (1) Permite *cuantificar incertidumbre* en estimación (error estándar, intervalos de confianza).
- (2) Aumenta la *precisión* en la estimación de *parámetros* y reduce simultáneamente errores tipo I y II.
- (3) Determina si los resultados son *reproducibles* y la *robustez* de la inferencia.
- (4) Provee un seguro frente a *resultados anómalos*.

Pseudoreplicación: considerar como unidades experimentales independientes submuestras de una misma unidad experimental.



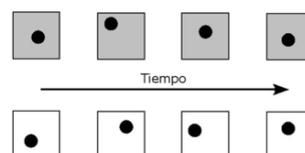
a) Pseudoreplicación simple



b) Pseudoreplicación de sacrificio



c) Pseudoreplicación temporal



Una correcta replicación requiere *asignación aleatoria* y *entremezcla* de unidades de muestreo (o experimentales) para evitar *pseudoreplicación* (Hurlbert 1984).

La única forma de garantizar **precisión y representatividad** es utilizando **tamaño de muestra muy grandes**, donde las **unidades de muestreo** son **seleccionadas al azar**...

... Pero **cada unidad de muestreo tiene un costo** asociado (tiempo, dinero, capital humano, etc.), por lo que dicho diseño ideal puede no ser asequible .

- Existe un **compromiso entre costo y precisión**

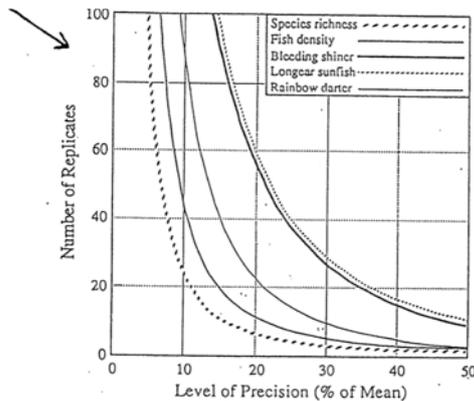
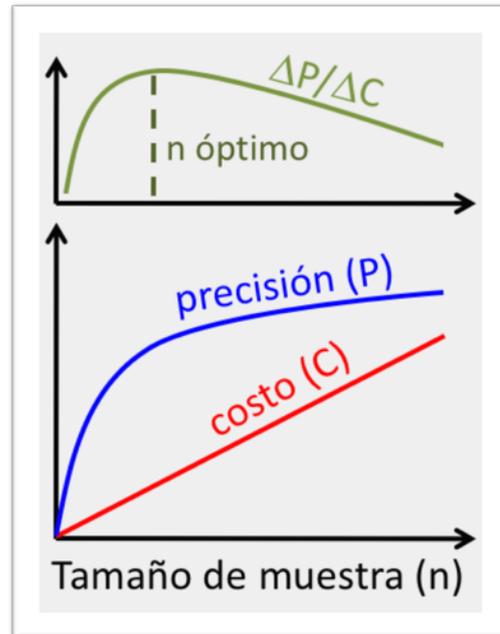


FIGURE 1.—Sample size versus precision at the 95% confidence level, expressed as a percentage of the mean, for estimates of species richness and biomass of fish for all age-classes in bluff pools at the Burnt Cabin site, Jacks Fork River, Missouri.



Diseño de Muestreo (o Experimental)

El **diseño de muestreo** (o **experimental**) involucra tomar decisiones sobre:

- ¿Cuál es el **tamaño de muestra óptimo**? (i.e. n° de réplicas)
- ¿Cuál es la mejor **disposición de las unidades de muestreo** (o **experimentales**) en tiempo y espacio?
- En estudios manipulativos, ¿cuál es el **diseño de tratamientos** adecuado, y cómo **asignar tratamientos** entre unidades experimentales?



¿Cómo evitar esto?

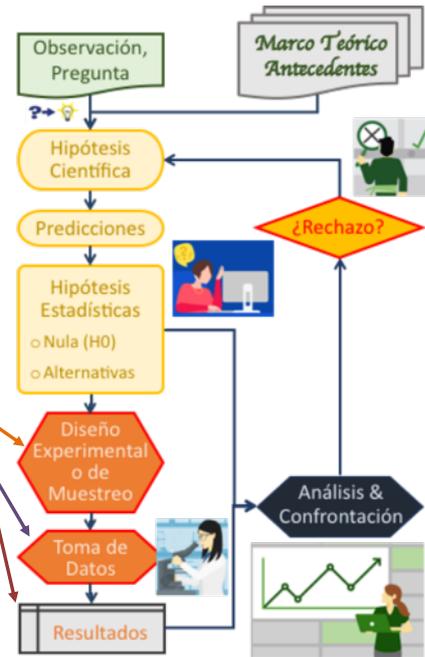
Un diseño correcto requiere:

- **Conocimiento** sobre los factores que generan heterogeneidad (i.e. **antecedentes**, **muestreo piloto**).
- Si ésta es producto de la **dinámica intrínseca** del sistema bajo estudio (i.e. **marco teórico**).
- Si es de **interés** cuantificar el patrón de heterogeneidad o sólo controlarlo (i.e. **hipótesis y objetivos**).

Errores serios en el diseño del estudio o la toma de datos difícilmente pueden repararse *a posteriori* (no existe "magia estadística").

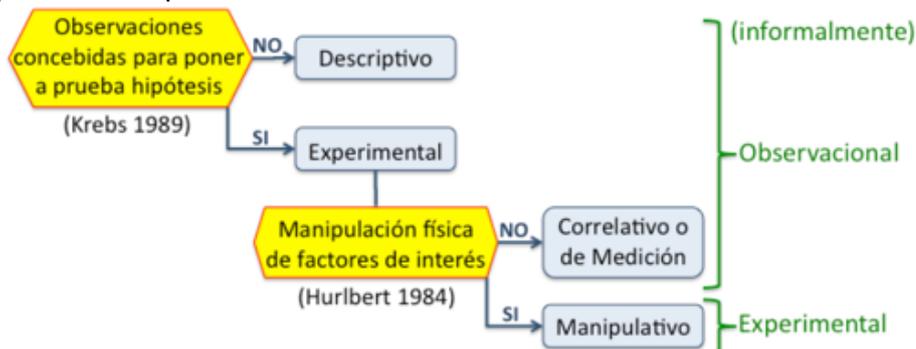
Diseño del Estudio: Planificación Reversa (Sutherland 2006)

1. ¿Cuál es la **pregunta específica**?
2. ¿Qué **resultados** son necesarios para contestar esas preguntas?
3. ¿Qué **datos** se necesitan para completar esos resultados?
4. ¿Qué **protocolo** se requiere para obtener esos datos?
5. ¿Es posible coleccionar esos datos con **recursos disponibles**?
6. **Modificación** del plan según recursos disponibles.
7. Creación de las **planillas** de datos.
8. Comenzar y enfrentarse a la **realidad**.



Aproximaciones Experimentales y No Experimentales: Compromisos

El método científico involucra *experimentación (sensu lato)* para poner a prueba la capacidad de una hipótesis de explicar el fenómeno de interés.



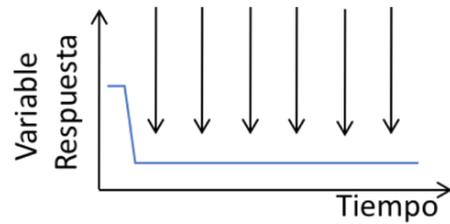
- Los **experimentos manipulativos** son los únicos capaces de determinar en forma confiable **relaciones causa efecto**.
- Pero son **menos realistas y generalizables**, y lógicamente **más costosos**.

Tipos de Diseño: duración de la perturbación

Distintos tipos de perturbación, naturales o experimentales, entregan diferente información sobre el sistema de interés.

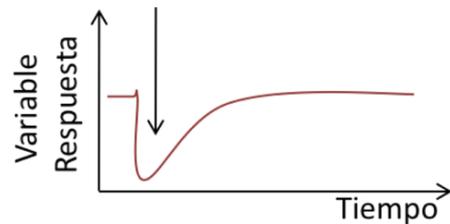
Perturbación Crónica (Experimentos de Presión):

- La intervención ocurre repetidamente, o se mantiene en forma continua (e.g. exclusión) durante el período de estudio.
- **Ventaja:** útil para evaluar resistencia, y efectos sostenidos.
- **Desventaja:** muestreo continuado con alto costo logístico.



Perturbación Aguda (Experimentos de Pulso):

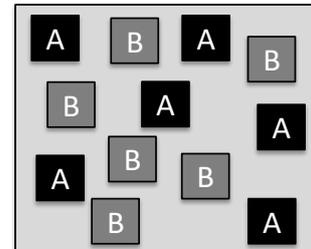
- La intervención ocurre sólo una vez, tras lo cual el sistema puede recuperarse 'normalmente'.
- **Ventaja:** útil para medir resiliencia y para evaluar procesos dinámicos (e.g. sucesión, dependencia de condiciones iniciales, etc.); menor costo logístico.
- **Desventaja:** puede no evaluar efectos sostenidos, o que se expresan con un retardo.



Tipos de Diseño: replicación temporal vs. espacial

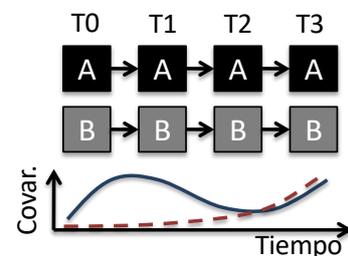
Experimentos de "fotografía":

- Cada unidad experimental (o de muestreo) es cuantificada una única vez.
- Cada tratamiento se replica en el espacio.
- **Ventaja:** independencia de réplicas.
- **Desventaja:** no se conoce la evolución temporal del sistema, y dificultad de aplicar a grandes escalas espaciales.



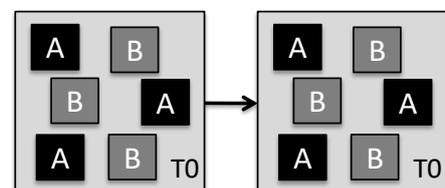
Experimentos de trayectoria:

- Cada unidad experimental (o de muestreo) se visita varias veces en el tiempo.
- Cada tratamiento se (pseudo)replica en el tiempo (i.e. población seguida en el tiempo).
- **Ventaja:** análisis dinámico de la respuesta, y abordaje de sistemas difíciles de replicar espacialmente.
- **Desventaja:** dependencia temporal de las muestras.



Diseño de medidas repetidas (aproximación mixta):

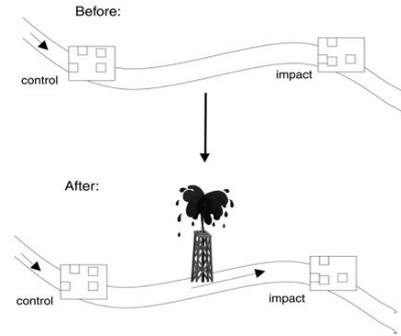
- Varias réplicas de cada tratamiento se siguen en el tiempo.
- **Ventajas y desventajas** intermedias a los anteriores.



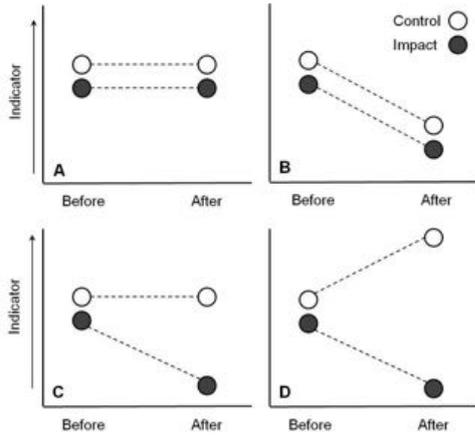
Tipos de Diseño: evaluación de impacto con baja replicación

Diseño BACI ("before-after-control-intervention"):

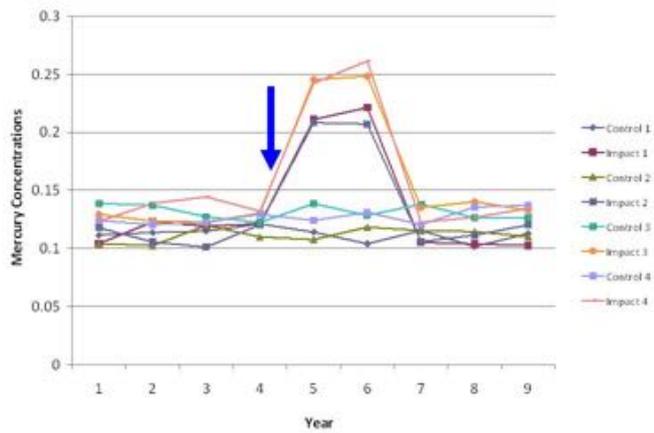
- Sitio(s) con y sin impacto, con réplicas temporales antes y después.
- Lo relevante es la **interacción Factor x Tiempo**.
- **Ventaja:** efectos en sistemas difíciles de replicar.
- **Desventaja:** La inferencia se restringe al sitio impactado (no es generalizable) y requiere ausencia de efectos confundidores importantes.



Caso más simple: sin réplicas

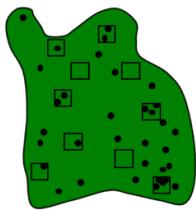


Caso más complejo: con réplicas espaciales y temporales

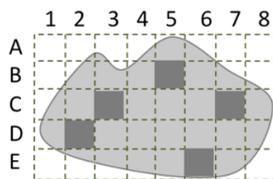


Diseños de muestreo básicos

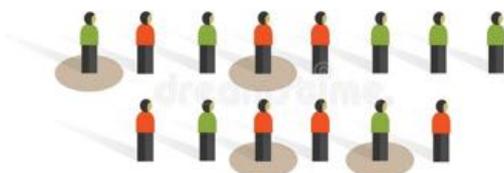
Diseño Aleatorio: muestreo NO sesgado, en el cual **cada unidad de muestreo potencial** en la población **tiene IGUAL probabilidad** de ser incorporada en la muestra.



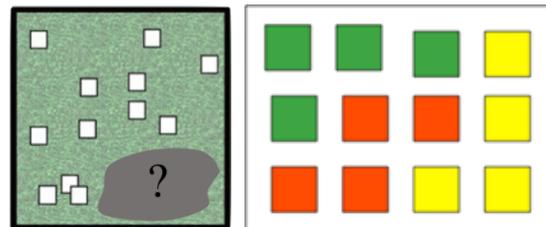
Cuadrantes aleatorios



Cuadrantes aleatorios en grilla regular



- Dado un **tamaño de muestra adecuado**, el muestreo aleatorio **garantiza independencia de las muestras y buena representación** de todo el espacio de muestreo.
- Si existen **restricciones logísticas** sobre el número de muestras, **porciones relevantes** de la población **pueden no ser consideradas**; importante en ambientes heterogéneos.
- Puede ser **muy difícil de aplicar en campo**, particularmente si la extensión del estudio es muy grande, o existen áreas inaccesibles.

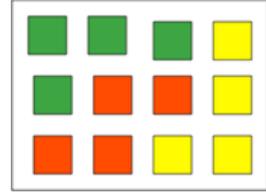
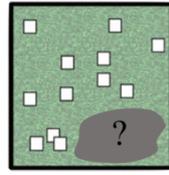


bajo número de réplicas puede generar muestras no representativas (baja cobertura, sesgo, falta de entremezcla) o correlaciones espúreas.

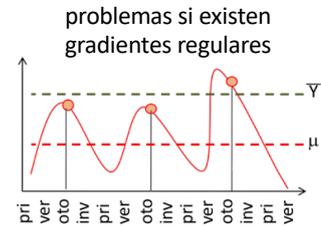
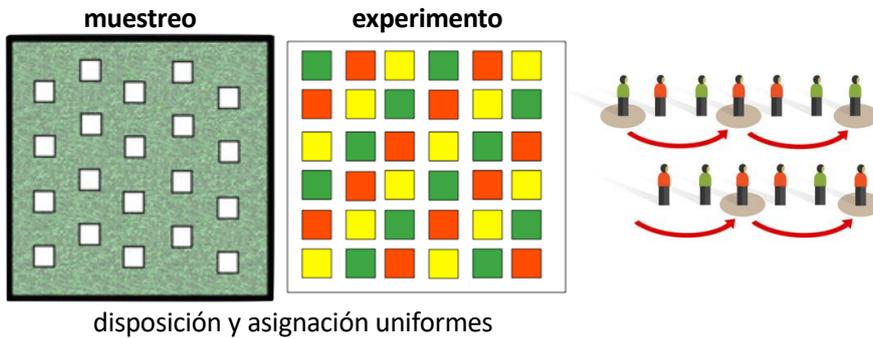
Diseños de muestreo básicos

Diseño Sistemático (o Regular): muestreo en el cual las unidades de muestreo presentan una **separación** (espacial o temporal) **regular** entre sí.

- Garantiza una **buena cobertura** de todo el espacio de muestreo.
- Puede ser **parcialmente probabilístico** al determinar aleatoriamente el punto de inicio y dirección del muestreo.
- Permite **cuantificar gradientes** en forma precisa, y **evaluar autocorrelación y estructura endógena**.
- Puede generar dependencia entre las muestras debido a **patrones regulares o cíclicos subyacentes**.
- Puede ser **difícil de aplicar en campo**, particularmente si existen áreas, períodos o unidades de muestreo inaccesibles.



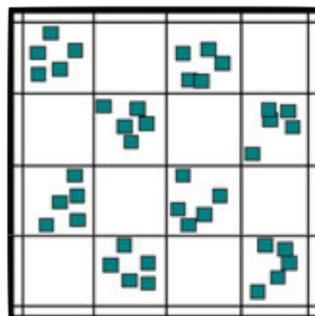
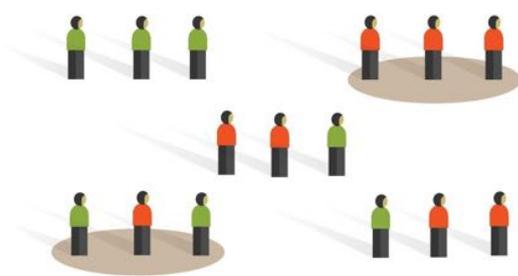
evita casos como este (aleatorio), donde el efecto de variables confundidoras podría ser importante



Diseños de muestreo básicos

Diseño Agregado: muestreo en el cual se definen **grupos de unidades relacionadas** (e.g. espacialmente cercanas, familiares, etc.) dentro de la población y **se seleccionan aleatoriamente unidades de muestreo dentro de estas**.

- Garantiza una **buena cobertura de todo el espacio de muestreo**.
- Permite optimizar recursos al dirigir el muestreo a porciones particulares de la población.
- Generar **dependencia entre las muestras** y sesgos por **factores correlacionados** a los agrupamientos.

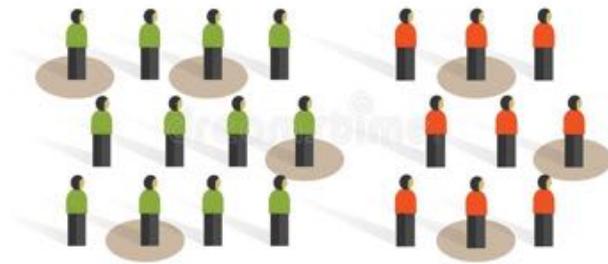
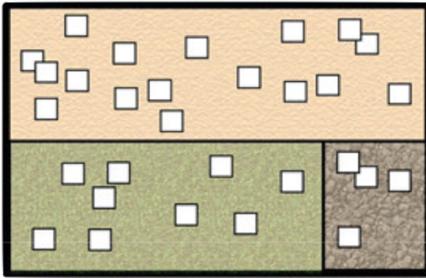


diseño agregado sobre un diseño sistemático



Diseño Estratificado: la asignación de unidades de muestreo se realiza dentro de subdivisiones del espacio de muestreo (i.e. estratos) definidos a partir de la heterogeneidad espacial o temporal conocida y relevante.

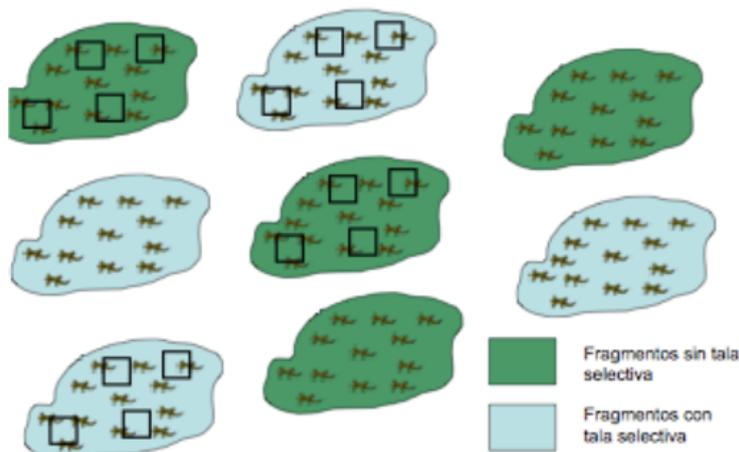
- Aumenta la precisión al **eliminar la variabilidad “entre estratos”**.
- Mejora la cobertura del muestreo y la eficiencia, y permite **buena representación de estratos de minoritarios**.
- Útil para dar cuenta de **distribución agregada (grupos)**.
- La **definición de los estratos** no es trivial y **puede requerir un estudio (piloto) previo**, y complejizar los análisis en algún grado siendo necesario **ponderar los valores** obtenidos por la representación de cada estrato en la población.



La asignación de unidades de muestreo puede ser proporcional a la extensión de cada estrato, o seguir una relación entre información ganada (e.g. variabilidad dentro del estrato) y costo (adaptativa).

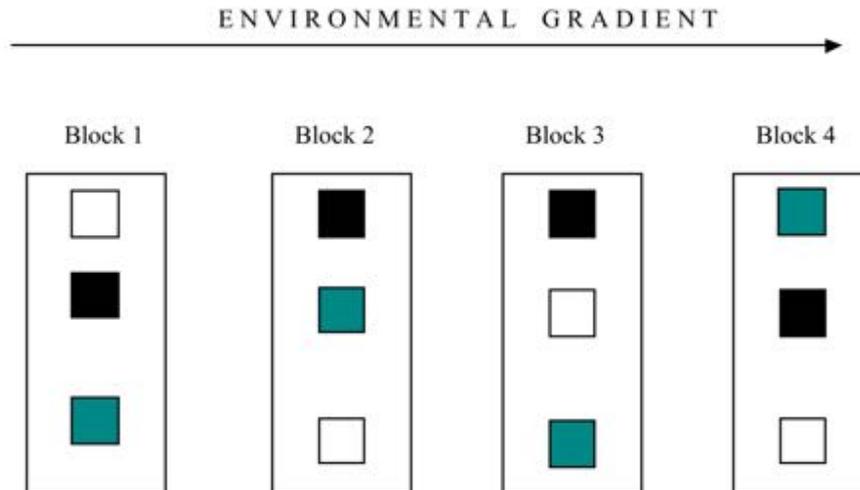
Diseño Anidado: la asignación de unidades de muestreo (o tratamientos) se realiza dentro unidades (naturales o artificiales) mayores, debido a características del sistema de estudio o limitantes logísticas.

- Permite poner a prueba efectos naturalmente jerárquicos (e.g. a distintos niveles de una cuenca, a distintos niveles taxonómicos, etc.).
- Permite obtener información de gran resolución (diferencias entre unidades de observación) cuando existen limitaciones logísticas en el número de réplicas reales.
- El número de réplicas reales es menor al de observaciones, y por lo tanto la incorporación de dos niveles jerárquicos reduce el número de grados de libertad.



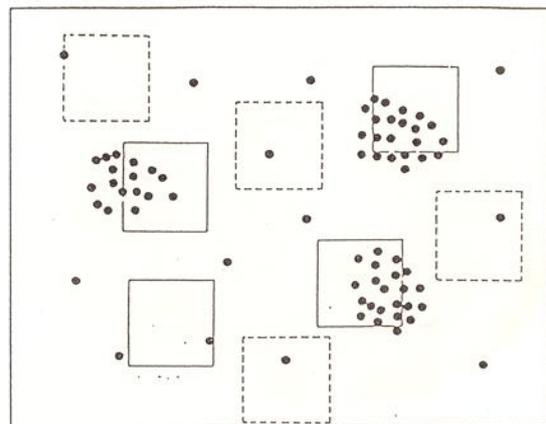
Diseño En Bloques: se establecen bloques de unidades experimentales a lo largo de un gradiente (conocido o potencial), dentro de los cuales la asignación de los tratamientos es aleatoria.

- Aumenta la precisión al eliminar la variabilidad “entre estratos”.
- Elimina el efecto de variables confundidoras.
- reduce el número de grados de libertad.



Diseño Adaptativo: la asignación de unidades de muestreo se realiza en función de los datos que se van obteniendo.

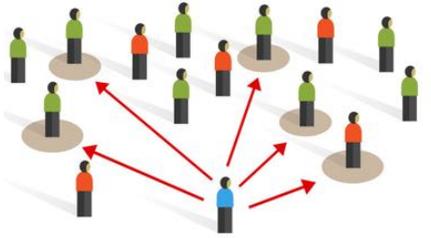
- Permite optimizar la asignación de esfuerzo de muestreo cuando la distribución de la variable es muy agregada, los factores causales de dicha distribución no son conocidos, y el número de elementos a contar o medir es muy bajo (e.g. especies raras).
- Métodos de análisis complejos (e.g. anidamiento, autocorrelación)



Diseños de muestreo básicos

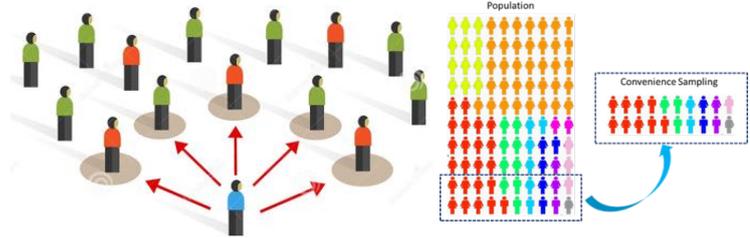
Diseños No Probabilísticos: diseños que no buscan la independencia ni representatividad (estadística) de los datos (e.g. estudios cualitativos).

Muestreo Propositivo



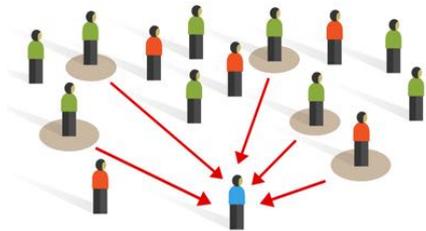
Búsqueda de información específica

Muestreo de Conveniencia



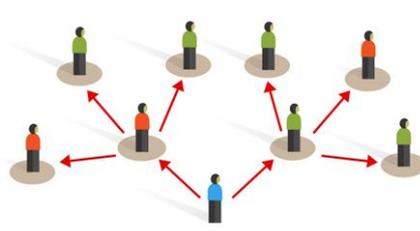
Casos donde hay gran dificultad logística

Muestreo de Respuesta Voluntaria



Depende del interés de los respondentes

Muestreo de Bola de Nieve

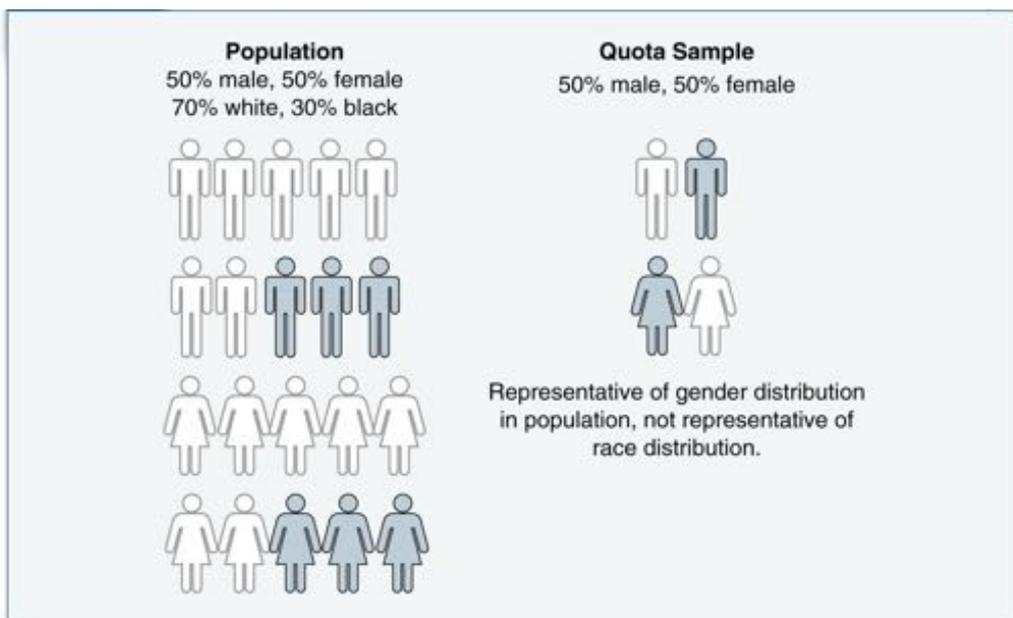


Muestreo guiado por respondentes

Diseños de muestreo básicos

Diseños No Probabilísticos: diseños que no buscan la independencia ni representatividad (estadística) de los datos (e.g. estudios cualitativos).

Muestreo por cuotas: busca tener dato de cada estrato, pero no su representatividad.



“Monitoring of populations is politically attractive but ecologically banal unless it is coupled with experimental work to understand the mechanisms behind system changes.” (Krebs 1991)

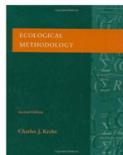
Bibliografía Recomendada



Gotelli, N.J., & A.M. Ellison (2012). *A Primer of Ecological Statistics*, 2nd ed. Sinauer.
Buena introducción a diseño experimental y de muestreo, y las técnicas estadísticas asociadas a cada tipo de experimento. Lenguaje sencillo, no requiere conocimientos avanzados de estadística. Por lo menos 1ra ed. (2004) disponible en la biblioteca de la PUC.



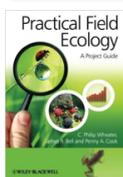
Sutherland, W.J. (ed.) (2006). *Ecological Census Techniques: A Handbook*, 2nd ed. Cambridge Univ. Press.
Introducción básica sobre muestreo y diseños de muestreo. Lenguaje sencillo, no requiere conocimientos avanzados de estadística. Enfoque más metodológico.



Krebs, C.J. (1999). *Ecological Methodology*, 2nd ed. Addison-Welsey Euc. Pub.
Discusión básica diseños experimental y de muestreo. Referencia clásica.



Quinn, G.P., & M.J. Keough (2002). *Experimental Design and Data Analysis for Biologists*. Cambridge Univ. Press.
Discusión detallada de diseño experimental (y de muestreo), y técnicas estadísticas relacionadas. Referencia clásica; requiere conocimientos básicos de estadística; nivel técnico avanzado.



Weather, C.P. & P.A. Cook (2011). *Practical Field Ecology*. Wiley-Blackwell.
Descripción detallada de metodologías de campo para distintos tipos de organismos y variables ambientales, y discusión muy básica de técnicas analíticas y formas de presentación de resultados.