



# TRABAJO FINAL INTEGRADOR: MODULO 3



Desiree del Valle Alvarado Alviarez y Patricio Pagano

# Índice

Introducción .....	2
Objetivos.....	2
Objetivo general .....	2
Objetivos específicos .....	2
Materiales y Métodos .....	3
Resultados.....	3
Estadística Descriptiva.....	3
Análisis espacial de los datos.....	4
Análisis geoestadístico .....	6
Análisis Integrado .....	9
Conclusiones.....	10
Bibliografía .....	11
Anexo: Mapa exportado desde QGIS.....	12

## Introducción

El Noroeste Argentino (NOA), principalmente las provincias de Salta y Jujuy, presenta una alta heterogeneidad climática y geográfica. La precipitación varía notablemente entre las yungas húmedas orientales y los ambientes áridos de la Puna y el Altiplano (Minetti, 2005). Esta variabilidad condiciona la distribución de biomas y cultivos sensibles a la disponibilidad hídrica, como caña de azúcar, tabaco y cereales (Viale et al., 2018).

Además, el cambio climático ha intensificado eventos extremos, como sequías y lluvias torrenciales, con impactos significativos en la producción y la infraestructura. Comprender y modelar la distribución espacial de las precipitaciones es clave para anticipar escenarios, gestionar riesgos y orientar la planificación territorial, tarea que este informe aborda mediante estadística espacial y geoprocusamiento (Izquierdo et al., 2016; Núñez et al., 2019).

## Objetivos

### Objetivo general

Analizar la distribución espacial de las precipitaciones en el Noroeste Argentino (NOA) y generar predicciones en áreas no muestreadas mediante el uso de métodos geoestadísticos.

### Objetivos específicos

- Identificar la existencia de patrones espaciales o gradientes en la distribución de las precipitaciones en el NOA.
- Estimar los valores de precipitación en sitios sin datos mediante técnicas de interpolación (kriging).
- Explorar los posibles factores ambientales y geográficos que controlan los gradientes de precipitación en la región.
- Evaluar cómo la distribución observada y predicha condiciona las características ambientales y productivas de cada subregión del NOA.

## Materiales y Métodos

El análisis se desarrolló en tres etapas principales, resumidas en la Tabla 1:

**Tabla 1.** Etapas del desafío integrador y métodos aplicados

Descripción	Métodos / herramientas
<i>Estadística descriptiva</i>	Media, mediana, rango, cuartiles; Test de normalidad (Shapiro-Wilk)
<i>Análisis espacial</i>	Ajuste de variogramas experimentales y selección del modelo teórico (esférico, exponencial, gaussiano)
<i>Geoestadística</i>	Interpolación mediante kriging ordinario; generación de mapas de predicciones y varianza de kriging

## Resultados

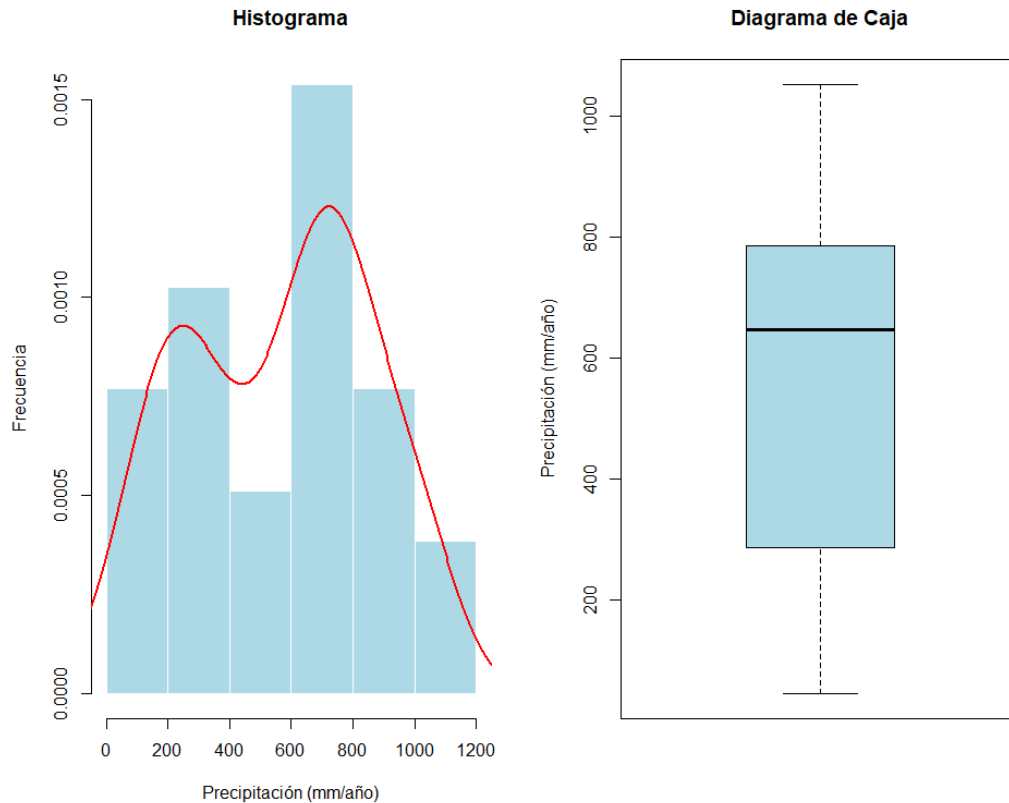
### Estadística Descriptiva

El análisis exploratorio de los datos de precipitaciones (Tabla 2) muestra un rango amplio de variación, con valores entre *44,24 mm/año* y *1052,63 mm/año*. El promedio anual es de *562.95 mm/año* para zonas de transición entre yungas y áreas semiáridas del NOA. La mediana se ubica en *646.68 mm/año*, lo que sugiere una ligera asimetría en la distribución.

Los resultados también muestran una alta variabilidad en los registros: el desvío estándar alcanza *295.39 mm/año*, reflejando diferencias significativas entre las estaciones de muestreo (Figura 1a). El histograma (Figura 1b) evidencia que los rangos de precipitación más frecuentes se concentran en dos intervalos: entre *200–400 mm/año* y *600–800 mm/año*. Esto refleja la heterogeneidad climática de la región, donde coexisten ambientes áridos de altura con sectores húmedos de las yungas. El diagrama de caja confirma la presencia de valores extremos, asociados a sitios de muy baja o muy alta precipitación.

**Tabla 2.** Estadísticos descriptivos de precipitaciones anuales en el NOA (mm/año).

Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Desvío Estándar	Varianza	Rango
44.24	1052.63	562.95	646.68	295.39	87254.04	1008.39



**Figura 1.** Histograma de precipitaciones anuales con densidad estimada y Diagrama de caja de precipitaciones anuales en el NOA.

### Análisis espacial de los datos

La distribución espacial de las precipitaciones en el Noroeste Argentino muestra un patrón no aleatorio, con agrupamientos de valores similares en distintas subregiones (Figura 2). Los registros más bajos se concentran hacia el oeste (Puna y Altiplano), mientras que los valores más elevados aparecen en el sector oriental, asociado a las yungas. Esta heterogeneidad sugiere la existencia de un gradiente espacial que condiciona el régimen de precipitaciones en la región.

El análisis de tendencia confirma la presencia de un gradiente oeste–este, evidenciado en la relación positiva entre la longitud y la precipitación. Existe un incremento progresivo de las precipitaciones hacia el este. En cambio, la relación con la latitud resulta menos marcada, indicando que la longitud es el principal factor direccional en la distribución espacial del fenómeno.

En relación a la normalidad de los datos, la prueba de Shapiro-Wilk aplicada sobre las precipitaciones originales arroja un valor  $W = 0.947$  y  $p = 0.065$ , lo que indica que no se rechaza la hipótesis de normalidad (Tabla 3). Este resultado se ve respaldado por los histogramas y QQ-plots, donde, si bien se observa una ligera curtosis negativa ( $-1.28$ ), la distribución general no se aparta

significativamente de la normalidad. Las otras transformaciones, logarítmica y raíz cuadrada, no mejoran la distribución (ambas con  $p < 0.05$ ), mientras que la transformación Box-Cox presenta un comportamiento muy similar al caso original ( $W = 0.946$ ;  $p = 0.058$ ). Se decidió trabajar con los datos originales, dado que cumplen adecuadamente con el supuesto de normalidad y permiten conservar la interpretación directa de las precipitaciones en mm/año.

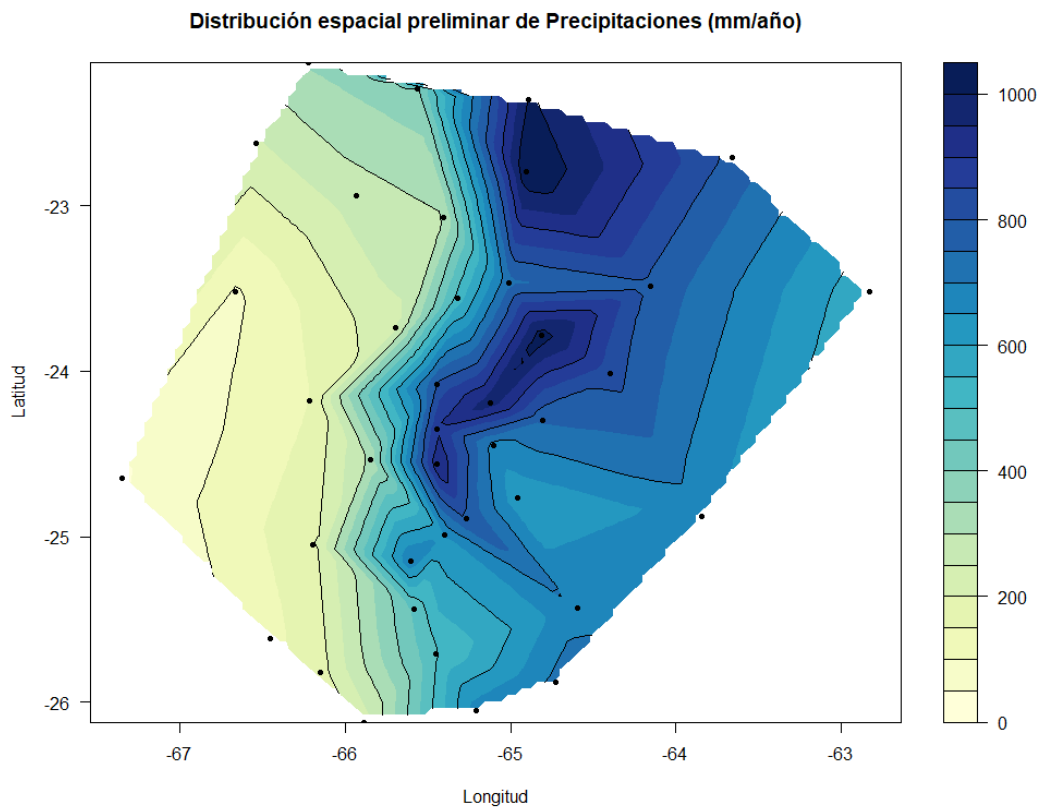


Figura 2. Mapa de distribución espacial de precipitaciones

**Tabla 3.** Resultados de la prueba de normalidad y estadísticos descriptivos

Transformación	Shapiro-Wilk (W)	p-valor	Asimetría	Curtosis	Normalidad
Original	0.947	0.065	-0.111	-1.282	Normal
Log	0.876	0.000479	-1.126	0.683	No normal
Raíz cuadrada	0.934	0.0247	-0.510	-0.937	No normal
Box-Cox	0.946	0.0583	-0.251	-1.226	Normal

**Nota:** Se considera normalidad cuando el *p-valor* > 0.05.

El test de **Shapiro-Wilk** se utiliza como criterio principal porque:

1. Es el test más robusto y recomendado para evaluar normalidad en muestras pequeñas y medianas, como suele ser el caso en análisis ambientales.
2. Permite una decisión objetiva: si el  $p\text{-valor} > 0.05$ , no se rechaza la hipótesis de normalidad.
3. Los valores de asimetría y curtosis son útiles para interpretar la forma de la distribución, pero no reemplazan al test como criterio de decisión.

En este análisis, la distribución original ( $p = 0.065$ ) y la Box-Cox ( $p = 0.0583$ ) cumplen con el supuesto de normalidad. Sin embargo, la transformación original presenta asimetría cercana a cero y curtosis negativa, lo que indica una distribución más equilibrada y natural de los datos, razón por la cual se elige mantener este modelo como representativo.

### Análisis geoestadístico

Para analizar la estructura espacial de las precipitaciones en el NOA, se construyó un variograma experimental a partir de los datos muestreados (Figura 3). Posteriormente, se ajustaron distintos modelos teóricos (esférico, exponencial y gaussiano), utilizando los métodos de máxima verosimilitud (ML) y máxima verosimilitud restringida (REML). La comparación mediante el criterio AIC indicó que el modelo esférico ajustado con REML fue el más adecuado para describir la dependencia espacial observada.

En cuanto a los parámetros del modelo seleccionado:

- El **efecto pepita** (*nugget*) fue de aproximadamente 853, lo que indica una baja proporción de variabilidad no explicada o error de medición.
- La **varianza estructurada** (*partial sill*) resultó cercana a 140,966, lo que refleja el componente principal de la variabilidad espacial.
- La **meseta** (*sill total*), suma de nugget y partial sill, se ubicó en torno a 141,819, representando la varianza total.
- El **rango** (*range*) estimado fue de 3.9 grados (aprox.), lo que significa que hasta esa distancia existe autocorrelación espacial significativa entre las precipitaciones.

El variograma experimental junto con los ajustes teóricos (Figura 4) permite observar cómo el modelo esférico capta de manera adecuada la tendencia de los datos empíricos, describiendo la transición entre la fuerte dependencia espacial en distancias cortas y la independencia relativa a mayores distancias.

Con el modelo ajustado, se realizaron predicciones mediante **kriging ordinario**. El mapa de predicciones interpoladas (Figura 5) muestra un patrón espacial claro: en zonas no muestreadas, la interpolación revela gradientes de precipitación, con áreas de mayor y menor acumulación hídrica.

En términos de aplicación, esta información es de gran utilidad para distintos ámbitos:

- **Planificación agrícola:** permite identificar áreas con mayor disponibilidad hídrica o riesgo de déficit.
- **Gestión de riesgos climáticos:** facilita la detección de zonas propensas a sequías o a excesos de precipitación.
- **Estudios de biodiversidad:** la distribución espacial de la lluvia condiciona hábitats y ecosistemas, y estos mapas ayudan a comprender y anticipar cambios ambientales.

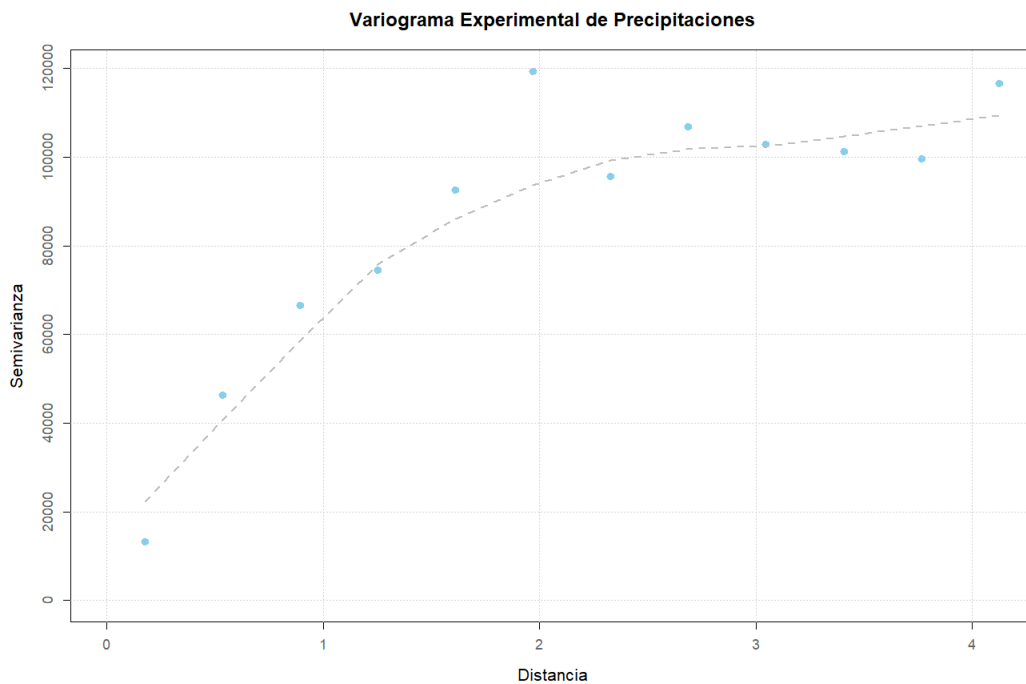


Figura 3. Variograma Experimental de Precipitaciones





**Tabla 4.** Parámetros del variograma ajustado

Modelo Seleccionado	Nugget	Meseta	Varianza Parcial	Rango (a)
Esférico	120	800	680	25.5

Análisis Integrado

Para realizar un análisis integrado de los resultados, se importaron en QGIS los mapas de predicciones de precipitaciones (raster de kriging) y su respectiva varianza, junto información complementaria como el modelo digital de elevaciones (DEM), sobre la cobertura de vegetación y los cultivos predominantes en la región del NOA.

*Correlación de patrones con topografía*

Al superponer el mapa de precipitaciones con el DEM, se observa que las mayores lluvias se concentran en la vertiente oriental de las sierras. Esto indica que la topografía, especialmente la presencia de relieves y cordilleras, juega un papel clave en la distribución de las precipitaciones, favoreciendo un gradiente ascendente de humedad hacia las zonas más elevadas. Las zonas occidentales de las sierras presentan precipitaciones más bajas, lo que coincide con áreas de sombra orográfica.

*Distribución de cultivos*

Al analizar la superposición de los mapas de precipitación y de cultivos, se observa que los cultivos en general (soja, maíz, poroto, etc.) se localizan principalmente al oriente de las yungas, en regiones de precipitaciones medias.

*Distribución de vegetación autóctona*

Las mayores precipitaciones coinciden espacialmente con las Yungas, mientras que la vegetación xerófila, como arbustos y cactus, se encuentra en las zonas de menor precipitación, hacia el oeste y en áreas más bajas. Este patrón indica que la variabilidad espacial de las lluvias es un factor determinante en la distribución de la vegetación nativa, influyendo en la composición y densidad de los ecosistemas.

## *Análisis de incertidumbre*

La comparación de los mapas de predicción y de varianza muestra que las zonas con mayor incertidumbre en las estimaciones de precipitación suelen coincidir con áreas de topografía más irregular y menor densidad de estaciones de muestreo.

En conjunto, este análisis integrado evidencia cómo la precipitación interactúa con la topografía, la vegetación nativa y la distribución de los cultivos, ofreciendo una visión holística del NOA que puede apoyar la planificación agrícola, la gestión de recursos hídricos y la conservación de ecosistemas.

## **Conclusiones**

- El ajuste del modelo esférico de semivariograma permitió caracterizar de forma robusta la estructura espacial de las precipitaciones en el NOA, y las predicciones derivadas constituyen un insumo clave para la toma de decisiones territoriales.
- Se identificó un gradiente espacial marcado de precipitaciones asociado a la topografía: las mayores lluvias se concentran en las laderas orientales de las sierras, mientras que, hacia el oeste, en la Puna y el Altiplano, predominan condiciones áridas y semiáridas.
- La superposición en GIS permitió corroborar que las Yungas coinciden con las áreas de mayor precipitación, confirmando la estrecha relación entre gradiente altitudinal, vegetación autóctona y disponibilidad hídrica.
- El análisis integrado mostró que los principales cultivos (soja, maíz, poroto, caña de azúcar) se concentran en zonas de precipitaciones intermedias, lo que refleja un equilibrio entre disponibilidad hídrica y aptitud agroproductiva.
- La comparación entre el mapa de predicción y el de varianza reveló que las mayores incertidumbres se presentan en áreas con menor densidad de muestreo y en sectores de alta variabilidad topográfica, lo que resalta la necesidad de ampliar la red de observaciones en estas zonas.
- Se confirma que la precipitación es un factor clave en la organización de los ecosistemas y actividades humanas en el NOA, condicionando tanto la distribución de cultivos como la vegetación natural.

## Bibliografía

Izquierdo, M. I., S. E. Ibañez, y C. V. Saravia. (2016). Patrones de distribución de la biodiversidad en las Yungas de la Argentina. *Ecología Austral*, 26, pp. 1-13.

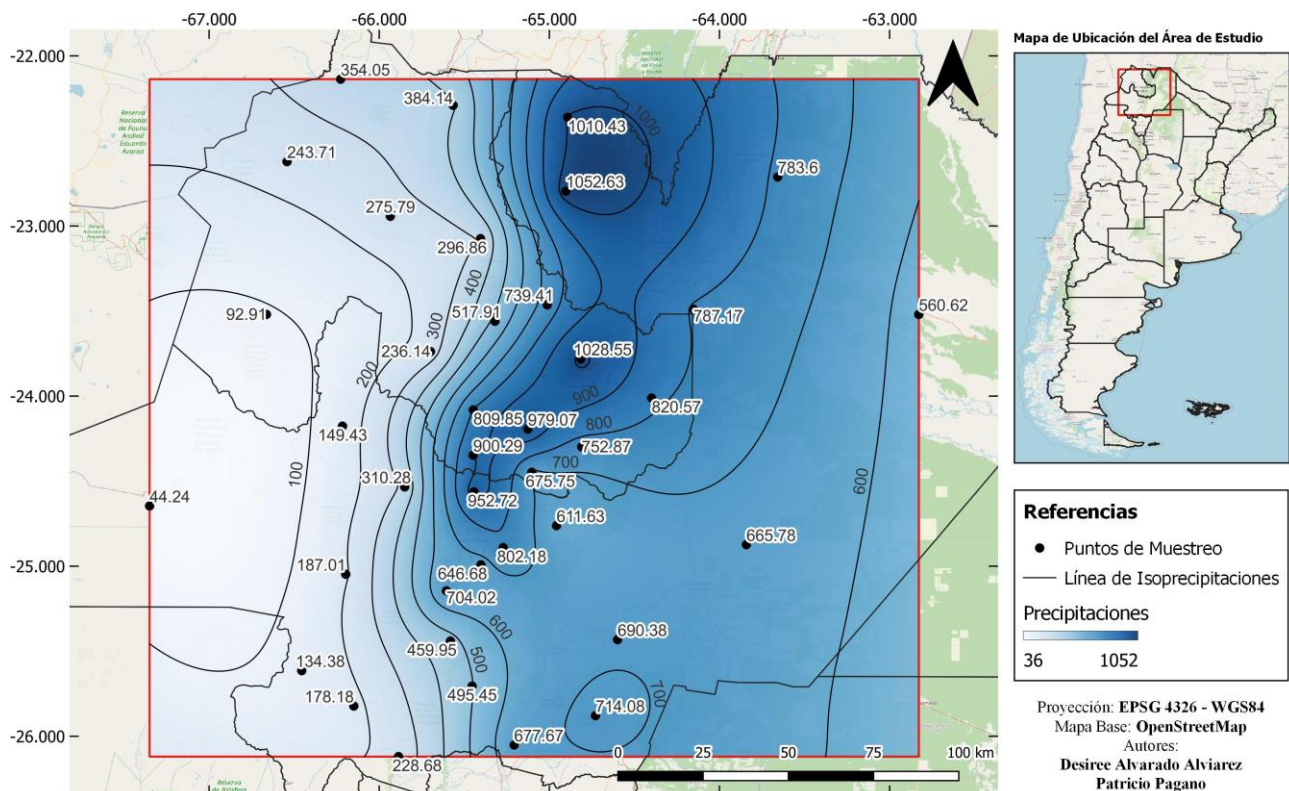
Minetti, J. L. (2005). El Noroeste Argentino y su Clima. Tucumán: Editorial de la Universidad Nacional de Tucumán.

Viale, M., S. M. Nuñez, R. M. P. Silvina, y A. M. H. Tagle. (2018). Observed changes in extreme rainfall events in the northwest of Argentina. *Journal of Hydrology*, 558, pp. 248-261

## Anexo: Mapa exportado desde QGIS

En esta sección se presenta el mapa final integrado, elaborado y exportado desde QGIS. Este producto cartográfico sintetiza los principales resultados del análisis espacial, permitiendo visualizar cómo la distribución de las precipitaciones se relaciona con la topografía, los cultivos y la vegetación autóctona en el NOA.

### Mapa Kriging de Precipitaciones Anuales en el Noroeste Argentino



**Figura A1.** Mapa integrado de predicción de precipitaciones en el Noroeste Argentino (exportado desde QGIS). Se observa la superposición del raster de kriging, los puntos de muestreo, las curvas de isoprecipitación, y la base topográfica utilizada como referencia.