



DETERMINACIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS DE PRODUCTIVIDAD A PARTIR DE HISTORIAS DE MAPAS DE RENDIMIENTO.

**Trabajo final de graduación presentado para obtener el grado de
Ingeniero Agrónomo**

Autores: PUNDANG HAAG, Diego Javier.

REBOLLO, Juan Pablo.

Director: FARRELL, Mauricio Aníbal. EEA INTA, Anguil.

**Co-Director: NOELLEMAYER, Elke. Cátedra de Edafología y
Manejo de Suelos, Facultad de Agronomía, UNLPam.**

Evaluadores: QUIROGA, Alberto. EEA INTA, Anguil.

**RIESTRA, Diego. Cátedra de Agrotécnica, Facultad de
Agronomía, UNLPam.**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA**

Santa Rosa (La Pampa) Argentina 2016

RESUMEN

La variabilidad topográfica y el régimen hídrico, entre otros factores, generan diferencias en el potencial de rendimiento, aún dentro del mismo lote. Si bien este hecho es ampliamente conocido, las prácticas de manejo tradicionalmente aplicadas han sido de tipo uniforme. Este trabajo tiene como objetivo determinar subregiones dentro del lote con características similares de productividad, a las que llamamos, zonas homogéneas. En un lote agrícola en el noreste de la provincia de La Pampa, en cercanías de la localidad de Dorila, se llevó a cabo el monitoreo de cosecha durante cuatro campañas, con dos cultivos diferentes (maíz y girasol), obteniendo así mapas de rendimientos. Luego de la limpieza, interpolación y rasterización, y filtrado de estos mapas se procedió a la clasificación de los rendimientos en 3 rangos: bajo, medio y alto. Además se realizó un mapa de altimetría del lote, en el cual se diferenciaron zonas bajas, medias y altas. Se determinó la variabilidad temporal y espacial del rendimiento en cada campaña para luego obtener un mapa final en el cual se reconocen cuatro subregiones: zonas estables por bajos, medios y altos rendimientos, y zonas inestables. Se concluyó que la altimetría del terreno como así también las precipitaciones y su distribución afectan tanto la variabilidad temporal como espacial del rendimiento del cultivo. Sin embargo, ninguna de estas variables explica el rendimiento de manera acertada por sí misma. En años normales a secos, los bajos presentaron mayor productividad que las medias lomas y lomas. Sin embargo, en años con precipitaciones superiores a la media los bajos presentaron menor productividad.

Palabras claves: mapas de rendimiento, zonas homogéneas, productividad, altimetría, precipitaciones.

ABSTRACT

Topographic variability and the rainfall regime, among other factors, generate different yield potentials even in the same field. Although this is widely known, traditional management practices are uniform across the field. This study was aimed to determine sub regions, homogenous zones, within a field with similar production characteristics. During four growing season crop yields of corn and sunflower were monitored in one field at Dorila in the north-east of La Pampa and yield maps of these crops were obtained. After cleaning, interpolation, rasterization, and filtration of the data and maps, yields were classified into three ranges: low, medium and high. Additionally an altimetry map was generated which was used to identify low, middle, and high slope positions. The spatial and temporal variability of yield was determined for each crop and finally a map was produced where four regions are identified: low, medium and high yield stable and an unstable region. It was concluded that altimetry and the rainfall pattern affected both spatial and temporal yield variability, but none of the variable explained yield by itself. In normal to dry years low positions produced higher yields than middle and high slope positions. In wetter years, the low areas, however, were less productive.

Key words: yield maps; homogeneous zones; productivity; altimetry; rainfall

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	5
Objetivo.....	6
Hipótesis.....	6
MATERIALES Y MÉTODOS:.....	7
Descripción del sitio de muestreo.....	7
Tratamientos.....	7
Procesamiento de Mapas:.....	8
RESULTADOS:.....	13
Lluvias durante el período de ensayo:.....	13
Rendimiento de los diferentes cultivos y campañas.....	15
Variabilidad Espacial y Temporal.....	17
Correlación Rendimiento - Altimetría:.....	19
Zonas de variabilidad espacial y temporal.....	20
Zonas Homogéneas.....	22
CONCLUSIONES.....	23
BIBLIOGRAFÍA.....	24

INTRODUCCIÓN

La mayoría de los sistemas productivos son variables en los factores que los definen: topografía, suelo, régimen hídrico, materia orgánica, disponibilidad de nutrientes, entre otros; que se traducen en diferencias en el potencial de rendimiento, aún dentro del mismo lote (Johnen et al., 2014). Si bien este hecho es ampliamente conocido, las prácticas de manejo tradicionalmente aplicadas han sido de tipo uniforme.

En las últimas décadas, con la difusión del sistema de posicionamiento global (GPS), los sistemas de información geográfica (GIS), y la tecnología de sensores se han logrado importantes avances de la agricultura de precisión (AP). La misma es definida como la aplicación de tecnologías y principios para manejar la variabilidad espacial y temporal, con el propósito de mejorar el rendimiento de los cultivos y la eficiencia del uso de los insumos (Whelan y McBratney, 2000).

La determinación de la variabilidad espacial y temporal del rendimiento de los cultivos se puede obtener por medio de monitores de rendimiento, que permiten la confección de mapas digitales, permitiendo su visualización. Sin embargo la interpretación de estos mapas es difícil, ya que el patrón espacial de rendimiento es determinado por factores permanentes y temporales (Kravchenko y Bullock, 2000). Los mapas de rendimiento son imágenes geo-referenciadas con una escala de colores que indican el rendimiento de un punto específico. Es esencial disponer de varias temporadas de mapeos de rendimiento, para poder delimitar zonas de manejo homogéneo dentro de un lote (Hörbe et al., 2013). Éstas han sido definidas como subregiones dentro de los lotes que expresan una combinación parecida de factores determinantes del rendimiento y a la cual resulta apropiada una dosis única de insumos (Urricariet et al., 2011).

En estos mapas se puede apreciar la variabilidad de los rendimientos en el espacio, pero no indican cuáles son las probables fuentes o causas de variación del rendimiento, ni el peso de cada una de ellas. Es decir, que los mapas de rendimientos aportan escasa información para recomendar la delimitación de ambientes o zonas de manejo (Khosla et al., 2008; Peralta y Costa, 2013).

En suelos de texturas arenosas, cuando el rendimiento es limitado por la oferta hídrica, la variabilidad topográfica es útil para interpretar los mapas de rendimiento. La posición en el paisaje influye en la redistribución de partículas de suelo, en el contenido de materia orgánica y en la disponibilidad de nutrientes (Solon et al., 2007). Como consecuencia se observa variabilidad a escala de lote en las propiedades físicas y químicas asociadas a la posición topográfica, existiendo una estrecha relación con el contenido de agua útil del suelo (Kravchenko y Bullock, 2000). Dentro de las distintas zonas de manejo, en general, los bajos representan las zonas de alto rendimiento por poseer una mayor retención de agua y de nutrientes (Kumhálová et al., 2011). Esto puede afectar el crecimiento de los cultivos, el desarrollo de los granos, su calidad y el rendimiento final.

OBJETIVO: El presente trabajo tiene como objetivo delimitar zonas homogéneas de productividad a partir de historias de mapas de rendimientos en un lote agrícola situado en el noreste de la Provincia de La Pampa.

HIPÓTESIS: Las zonas de menor altimetría del lote presentarán rendimientos mayores en comparación a las de mayor altimetría. Ante niveles de precipitaciones iguales o superiores a la media anual de la zona, las diferencias de rendimientos entre

subregiones dentro del lote se ven disminuidas, mientras que, ante niveles de precipitaciones inferiores a la media anual de la zona, ésta diferencia se ve acrecentada.

MATERIALES Y MÉTODOS:

DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE MUESTREO

El estudio se llevó cabo en un lote de 50 ha ubicado en un establecimiento en el Noreste de la Provincia de La Pampa, Departamento Maracó entre las localidades de Dorila y Agustoni (35° 45' S; 63° 35' W).

El suelo es caracterizado como *Haplustol Éntico* (USDA Soil Survey, 2009), con textura franco arenosa, un promedio de materia orgánica (1%) y sin limitaciones de profundidad. Dentro del lote se observan diferencias altimétricas, que permiten establecer zonas bajas, medias y altas. Las precipitaciones medias anuales son de 800 mm, con mayor incidencia en primavera y otoño. Las temperaturas presentan una media anual de 16°C. Las primeras y últimas heladas se dan aproximadamente a principios del mes de Mayo y finalizan a mediados del mes de Septiembre. Los vientos predominantes son del sector NNE y SSO, siendo los de mayor intensidad en el período comprendido entre los meses de septiembre a diciembre.

TRATAMIENTOS

La siembra de maíz (*Zea mais*) de las dos campañas se realizó bajo siembra directa, con densidades de 65.000 pl/ha del híbrido Dekalb 682. Para el caso del girasol (*Helianthus annuus*) se utilizó el híbrido ACA-884, con una densidad de 50.000 pl/ha.

Secuencia de cultivos y fechas de siembra:

- 2007-2008 Maíz; 15 de noviembre.
- 2008-2009 Girasol; 02 de noviembre.

- 2009-2010 Maíz; 10 de diciembre.
- 2010-2011 Girasol; 15 de noviembre.

PROCESAMIENTO DE MAPAS:

Del lote en cuestión se recopilaron 4 mapas de rendimiento correspondientes a las campañas 2007 a 2011, obtenidos desde una máquina cosechadora John Deere 9760 STS equipada con un monitor de rendimiento Greenstar®.

Los datos provenientes del monitor fueron compilados por el software AFS. En primera instancia se realizó la limpieza de mapas. Los datos del monitor comúnmente contienen valores que son incorrectos debido a diferentes fuentes de error, algunos de los cuales se describen a continuación:

- Errores de registro por altura de cabezal: cuando se levanta el cabezal se suspende la medición de área, y cuando baja comienza a contar distancia recorrida y área, registrando datos para esos puntos. Si se avanza con el cabezal bajo aun cuando no se está cosechando, se generan puntos sin datos de rendimiento.
- Retardos en el inicio y fin de cosecha: se manifiesta como puntos faltantes en el inicio de una franja de cosecha, y puntos demás en el fin de la franja.
- Rendimientos fuera del rango biológico: rendimientos extremadamente altos o bajos que no están relacionados directamente con sus vecinos inmediatos.

Posteriormente los datos corregidos fueron exportados como base de datos al software libre gvSIG 1.12.0. donde se construyeron capas vectoriales a partir de las bases de datos.

Las capas vectoriales en forma de puntos se convirtieron en mapas de rendimiento a las que se les modificó la visualización usando una gama de colores en

función de tres intervalos naturales, basados en el atributo masa rendimiento.

Éste método de clasificación intenta determinar un agrupamiento óptimo de los datos para definir los valores de las clases, minimizando la variabilidad interna de las clases y maximizando las diferencias entre clases.

Una vez corregidas las capas se procedió a la rasterización e interpolación de cada uno de los mapas. La rasterización tiene como objeto generar una capa ráster a partir de una capa vectorial, o sea reemplazar los puntos por píxeles. Cada píxel o celda adquiere un valor de superficie que es asignado al momento de la rasterización, en nuestro caso es de 5m^2 . La interpolación es una herramienta que permite el cálculo del valor de una variable en una coordenada para la cual dicho valor no es conocido, a partir de los valores conocidos para otra serie de coordenadas. En la creación de una capa ráster, las coordenadas (x,y) son los centros de las celdas con valores conocidos y desconocidos. De esta manera se obtiene un mapa ráster de superficie continua.

La interpolación se llevó a cabo mediante el método Kriging que, como todo método de interpolación, predice valores desconocidos a partir de datos de locaciones conocidas. Este método en particular tiene en cuenta tanto el espaciamiento de los puntos en los cuales se tiene información, como su distribución en el dominio a interpolar. Ajusta una función matemática a una cantidad especificada de puntos o a todos los puntos dentro de un radio específico para determinar el valor de salida para cada ubicación.

Una vez obtenidas las capas ráster para cada campaña, se realizó el filtrado de las mismas a través del método Media por Vecindad, el cual intenta eliminar la microvariabilidad, ya que busca delimitar áreas grandes de comportamiento similar y la variabilidad a pequeña escala carece de valor. Un filtro implica una modificación de las celdas de dicha capa mediante la aplicación de fórmulas o algoritmos, en general

relativas a los valores de las celdas contiguas, de tal modo que se obtiene una nueva versión de dicha capa. El uso de un filtro de por sí no genera ninguna información adicional, sino que modifica la existente, y es por ello que la capa resultante contiene la misma variable que la original.

Concluido el filtrado, y utilizando las capas raster obtenidas, se efectuó la reclasificación de valores del rendimiento. Esto tiene por objetivo unificar valores para que sea más efectiva la posterior superposición y así poder encontrar ambientes en función de los parámetros asignados. El criterio utilizado para la reclasificación consistió en considerar ambientes de bajo, medio y alto rendimiento. Para diferenciar los ambientes se consideró como rendimiento “medio” aquellos comprendidos en la media del lote \pm un 16%; rendimientos mayores corresponden a rendimientos “altos”, y rendimientos menores a rendimientos “bajos”. El nuevo mapa estará compuesto por valores: **1**-rendimientos bajos; **2**-rendimientos medios; **3**-rendimientos altos.

Se agregó el mapa de altimetría del lote, el cuál fue brindado por un servicio de terceros, y se obtuvo por medio de un GPS Trimble geodésico con una precisión por debajo del centímetro. Luego de la interpolación del mismo, se generó una correlación entre éste y las capas de cada campaña, obteniendo de esta manera un resultado que explicase hasta qué punto la diferencia altimétrica del terreno explicaba la variabilidad en el rendimiento.

Variabilidad Temporal

El análisis multitemporal de mapas de rendimiento tiene como objeto encontrar patrones repetibles en el tiempo. Es condición necesaria contar con dos o más mapas. Pero para poder comparar el rendimiento de diferentes años y especies fue necesario normalizar la variable rendimiento por su media o promedio, convirtiéndose en valor 100, y relacionando cada dato de rendimiento respecto a ese valor 100 o valor medio. Para esto debió modificarse la tabla de atributos de los cuatro mapas con extensión **.shp**, construyendo una variable Índice que representa la normalización de la variable masa de rendimiento por la media. Para el cálculo de tal índice se utilizó la siguiente fórmula:

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{n} \sum (y_{i,k} - \bar{y}_{i,n})^2$$

Dónde:

σ_i^2 = valor de la varianza temporal por localización i ;

$y_{i,k}$ = rendimiento en la localización i monitoreado en el año k ;

$\bar{y}_{i,n}$ = rendimiento promedio para cada año.

Los valores de Índice obtenidos nos permiten tener una idea de los datos de rendimiento para cada mapa en función de la media o promedio en términos porcentuales. Posteriormente se generaron las capas ráster, utilizando la variable Índice, que permiten la posterior superposición.

Variabilidad Espacial

Para el análisis de variabilidad espacial, en los mapas de rendimientos de cada campaña se realizó también la normalización de la variable rendimiento por su media,

pero en este caso se convirtió a la media en valor 0 y se relacionó cada valor de rendimiento a dicho valor 0. De esta manera, los rendimientos que se encuentran por debajo de la media o promedio toman valores negativos, y los que se encuentran por encima de la media toman valores positivos. Para llevar a cabo esto se utilizó la siguiente fórmula:

$$\dot{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left[\frac{y_{i,k} - \dot{y}_k}{\dot{y}_k} \times 100 \right]$$

Dónde:

n = número de años estudiados;

$k=1$: es la integración de todos los años de 2007-2008 a 2010-2011;

\square_i = es la diferencia porcentual de rendimiento de la localización i ;

\square_k = es el rendimiento promedio obtenido en cada año k ;

$y_{i,k}$ = es el rendimiento monitoreado en cada localización i en el año k .

Como puede verse en la fórmula, la variación está expresada en términos porcentuales. También se debió construir la capa raster con la variable Índice para que posteriormente se lleve a cabo la superposición de mapas.

Determinación de Zonas Homogéneas

Ya obtenidos los mapas raster de variabilidad espacial como así también los de variabilidad temporal para cada campaña en análisis, el siguiente paso fue la superposición de mapas de variabilidad. Dicho proceso es la aplicación de operaciones matemáticas, lo cual genera un nuevo mapa con nuevos valores de celda o píxel. En

nuestro caso utilizamos la suma en primera instancia, donde fueron sumados por un lado los mapas de variabilidad espacial, y por otro los de variabilidad temporal. A los mapas resultantes de las respectivas sumas, se los multiplicó entre sí para obtener un mapa final al que hemos denominado mapa de zonas homogéneas. Allí se podrán observar cuatro clases: zonas estables por bajo, medio y alto rendimiento, y zonas inestables.

RESULTADOS:

LLUVIAS DURANTE EL PERÍODO DE ENSAYO:

En la Tabla 1 se presentan las precipitaciones ocurridas durante los años en análisis. En 2008, 2009 y 2010, los milímetros acumulados fueron menores a las precipitaciones medias anuales para la zona (800mm), mientras que en 2007 y 2011 fueron similares al promedio histórico. No sólo es importante tener en cuenta las precipitaciones totales anuales, sino también la distribución de las mismas en el período de barbecho y ciclo de los cultivos. La Figura 1 muestra las precipitaciones acumuladas en cada campaña y su distribución en las diferentes etapas, verificándose que en las distintas campañas y aún en años con similares precipitaciones la distribución de las mismas fue diferente, lo cual influyó tanto en el desarrollo como en el rendimiento final de los cultivos.

	2007	2008	2009	2010	2011
Enero	65	112	19	83	177
Febrero	144	100	68	62	47
Marzo	237	39	106	90	68
Abril	44	16	6	70	108
Mayo	8	0	42	9	0
Junio	29	27	0	0	6
Julio	0	10	5	14	8
Agosto	0	12	0	26	35
Septiembre	147	30	82	122	18
Octubre	40	162	5	95	107
Noviembre	75	61	126	64	214
Diciembre	17	75	164	51	41
Total	806	644	623	686	829

Tabla 1: Precipitaciones mensuales para el período 2007 - 2011.

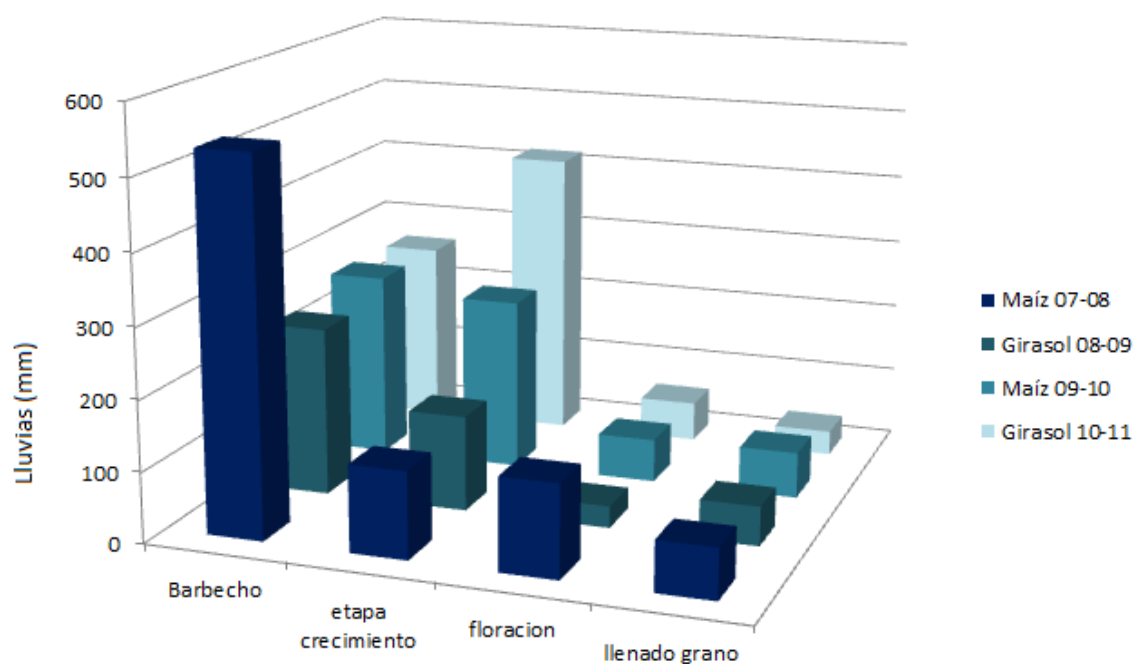
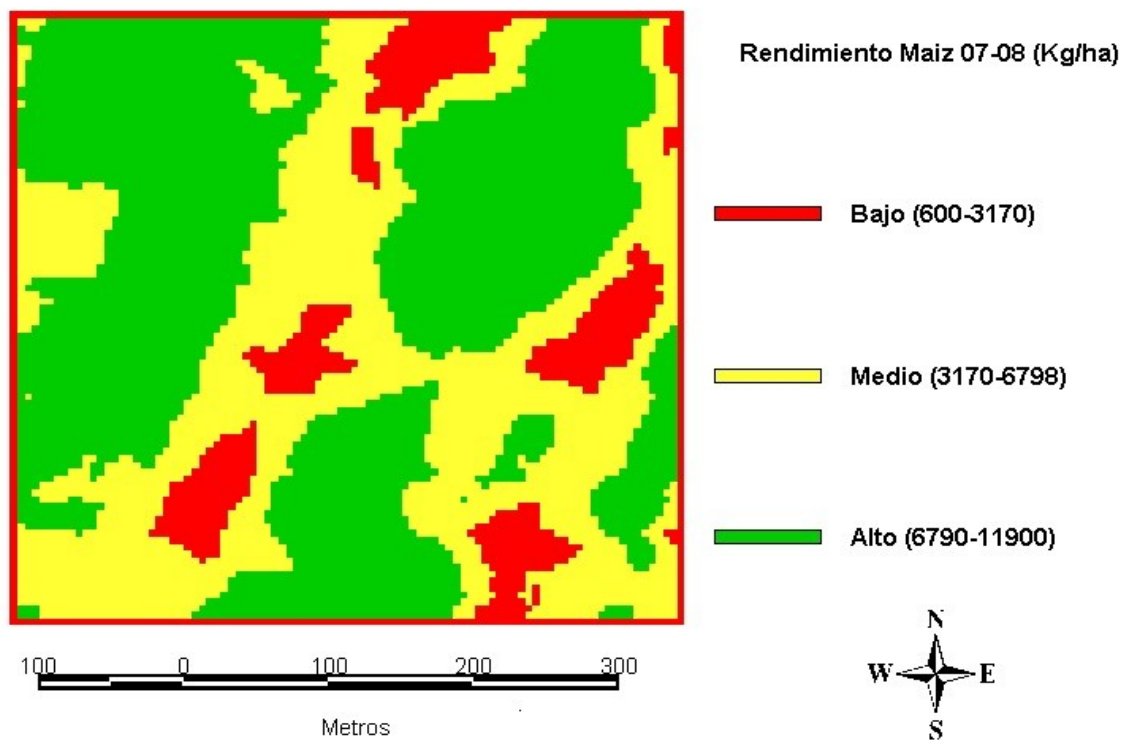
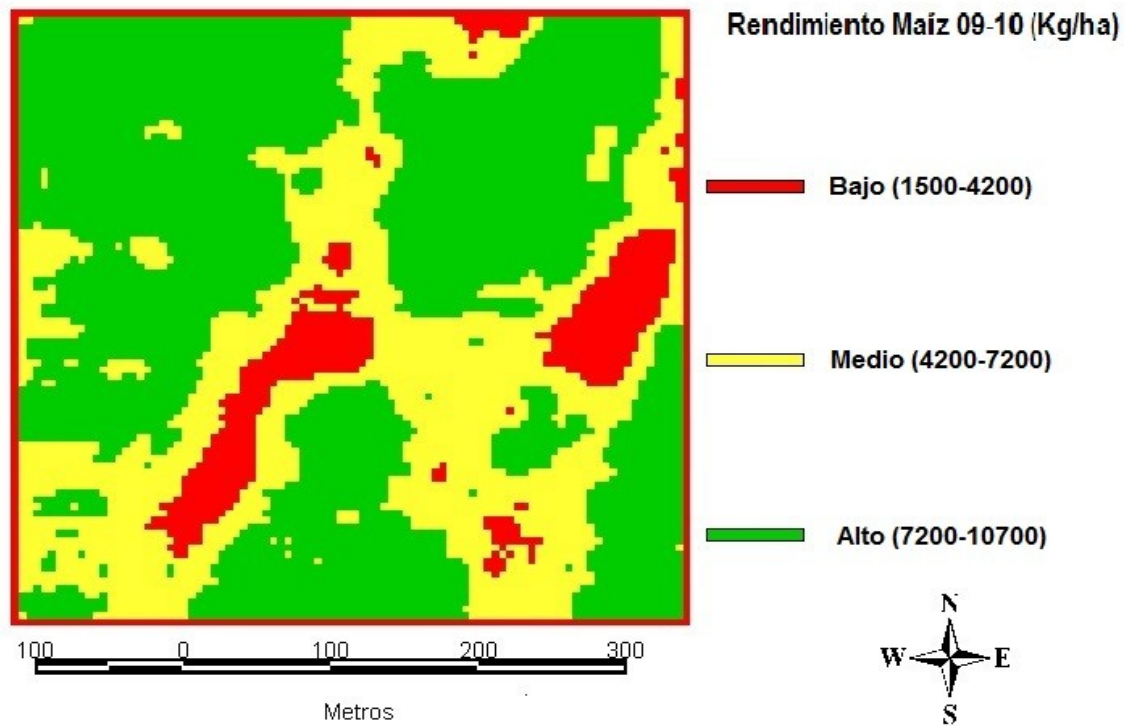
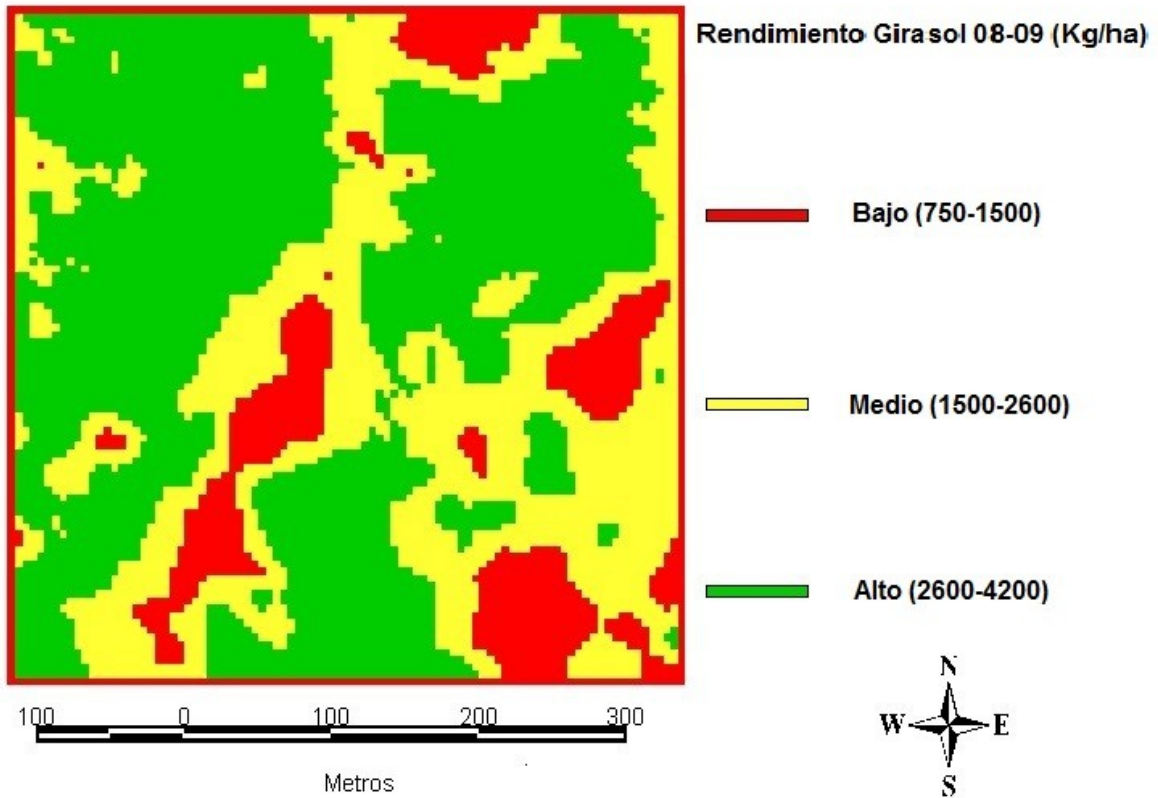


Figura 1: Precipitaciones en las diferentes etapas de los cultivos de las cuatro campañas.

RENDIMIENTO DE LOS DIFERENTES CULTIVOS Y CAMPAÑAS

En la Figura 2 se muestran los mapas de rendimiento de las diferentes campañas analizadas. El rendimiento promedio para el maíz de la campaña 2007-2008 fue de 5000 kg ha⁻¹, con mínimos de 600 kg ha⁻¹ y máximos que alcanzaron los 11900 kg ha⁻¹. Para el girasol 2008-2009 el rendimiento medio fue de 2100 kg ha⁻¹, con mínimos y máximos de 750 kg ha⁻¹ y 4200 kg ha⁻¹ respectivamente. Para Maíz 2009-2010 el promedio fue de 5700 kg ha⁻¹, los mínimos de 1500 kg ha⁻¹ y los máximos fueron de 10700 kg ha⁻¹. Por último, para la campaña de girasol 2010-2011 los rendimientos mínimos fueron de 800 kg ha⁻¹, máximos llegaron a los 4800 kg ha⁻¹, y el rendimiento promedio fue de 2700 kg ha⁻¹.





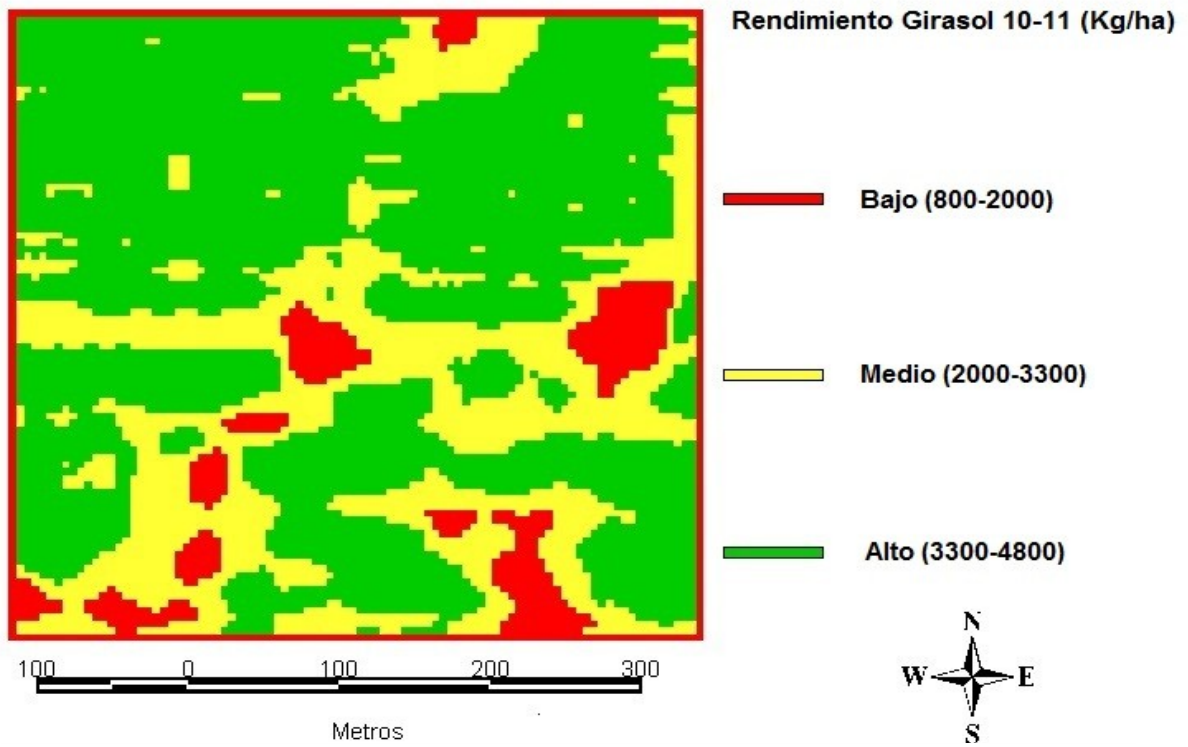


Figura 2: Mapas de rendimiento de las diferentes campañas.

VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL

Para reflejar la variabilidad y distribución del rendimiento entre años, se graficó la frecuencia de pixeles para cada valor de rendimiento (Figura 3).

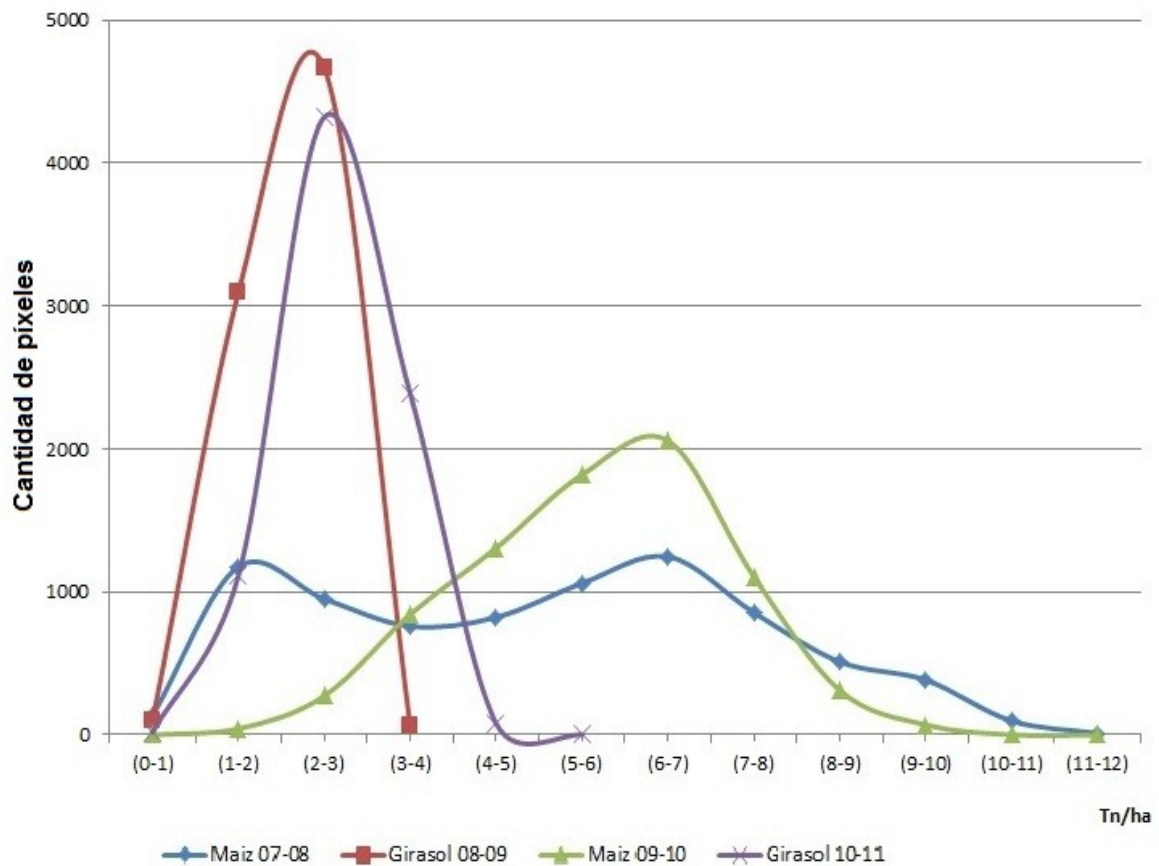


Figura 3: Frecuencias de rendimientos de las cuatro campañas analizadas.

Analizando y comparando las campañas de maíz, se observó que en el período 2007-2008 fueron frecuentes bajos, medios como así también altos rendimientos. No ocurrió lo mismo en el período 2009-2010, siendo los rendimientos más frecuentes aquellos cercanos a la media, y los extremos fueron menos frecuentes. Sin embargo, el rendimiento promedio del lote fue muy similar en ambas campañas.

Por otro lado, comparando las campañas de girasol, se observó que ambas presentaron una distribución que se aproxima a la normal, aunque en el período 2010-2011 se visualizó un corrimiento de la curva hacia la derecha interpretándose como una mayor frecuencia de rendimientos altos, siendo superior la media del lote para dicho período.

CORRELACIÓN RENDIMIENTO - ALTIMETRÍA:

En la Figura 4 se presenta el mapa interpolado de la altimetría del lote en estudio, donde los valores altimétricos fueron desde 121,5 a 124,5 msn. Se diferenciaron claramente zonas de menor y mayor altimetría.

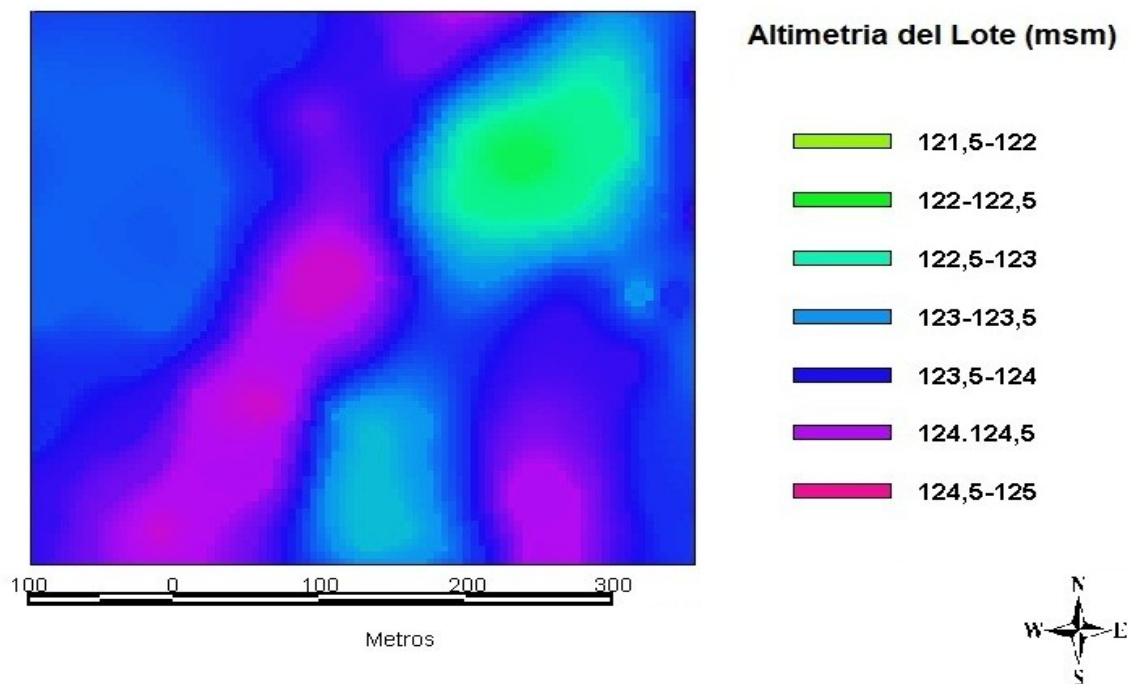


Figura 4: Altimetría del lote.

La relación entre la altimetría del lote y el rendimiento de los cultivos no explicó la variabilidad de éste (Tabla 2), salvo en la campaña de maíz 2007-08. En dicho año las precipitaciones fueron normales a superiores respecto a la media de la zona, pero se produjeron principalmente en el período de barbecho, y en menor medida durante el crecimiento del cultivo. Esto hace inferir que la acumulación de agua en el perfil del suelo haya sido mayor en los bajos y menor en las lomas, comprobándose relación entre rendimiento y altimetría. Por lo tanto se evidenció que la altimetría no pudo explicar en gran medida las diferencias en el rendimiento dentro del lote en las distintas campañas.

Tabla 2: Coeficiente de correlación (R^2) de la relación entre el rendimiento de los cultivos y la altimetría del lote.

	Rendimiento Maíz 2007-08	Rendimiento Girasol 2008-09	Rendimiento Maíz 2009-10	Rendimiento Girasol 2010-11
Altimetría				
R²	-0,75	-0,15	-0,06	-0,12

ZONAS DE VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL.

Considerando los cuatro años, la variabilidad espacial (Fig. 5) tomó valores en un rango de entre -200 y 200. Los valores altos correspondieron a sitios de menor altimetría, mientras que los valores más bajos a sitios de mayor altimetría. Esto indicó que las zonas con valores bajos, de color rojo en el mapa, fueron aquellos sitios del lote cuyo rendimiento se encontró por debajo de la media del lote. Contrariamente, las zonas con valores altos, reflejadas en color verde, presentaron rendimientos por encima del rendimiento promedio del lote. Los sitios con valores cercanos a cero, representados en color amarillo, fueron poco variables con respecto al rendimiento medio.

La variabilidad temporal adquirió valores de entre 0 y 20, lo que indicó que la alta variabilidad temporal se produjo en los sitios más elevados y en los más bajos del lote, mientras que la baja variabilidad temporal se encontró en los ambientes de elevación intermedia (Figura 5..

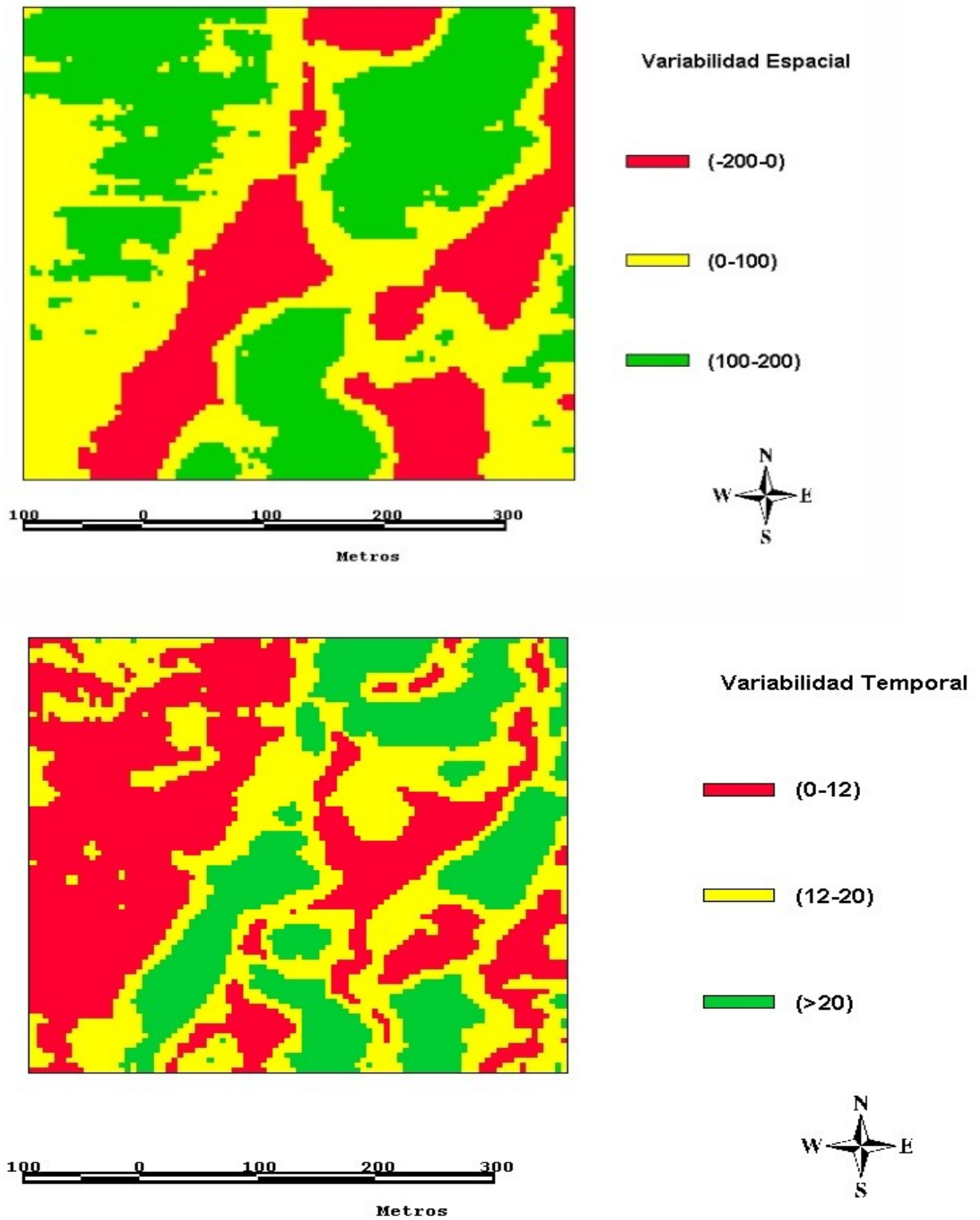


Figura 5: Mapas de variabilidad espacial y temporal.

ZONAS HOMOGÉNEAS.

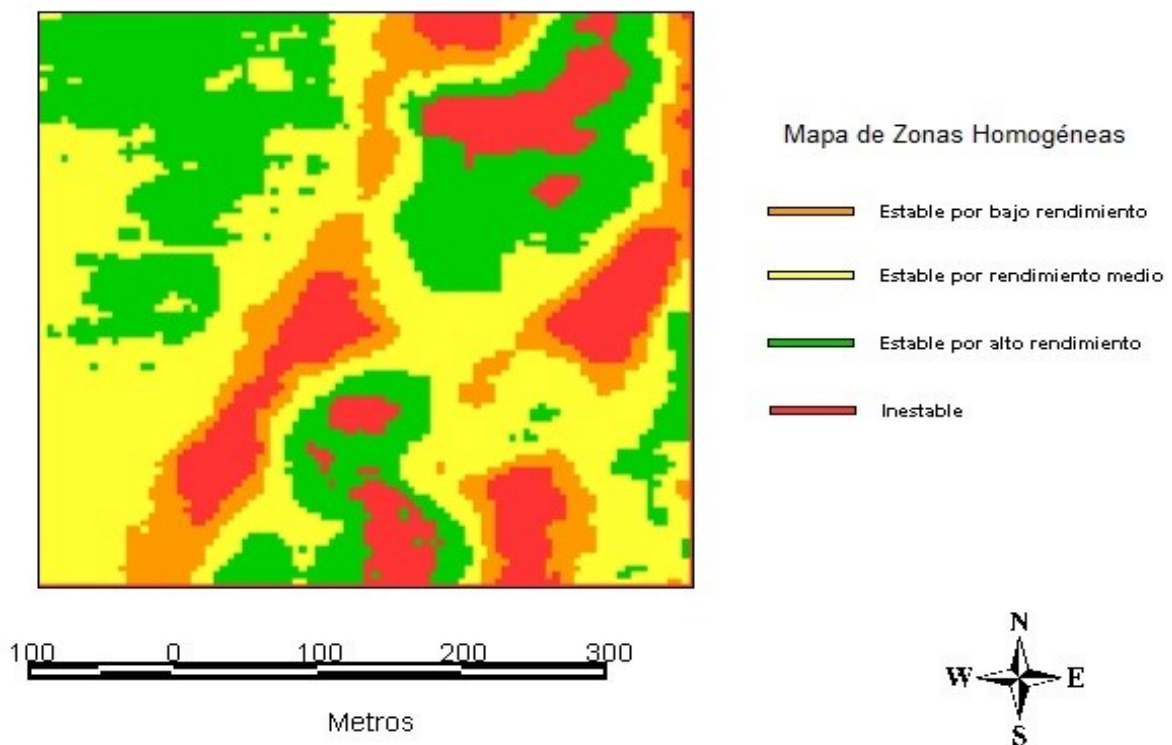


Figura 6: Mapa de zonas homogéneas.

En el mapa de zonas homogéneas (Figura 6), se diferenciaron cuatro zonas: estables por bajos, medios y altos rendimientos, y rendimientos inestables. Las zonas inestables fueron aquellas que tuvieron un patrón de comportamiento que no se relacionó con las precipitaciones del año ni con la altimetría. Esta zona coincidió con las altimetrías extremas, es decir lomas (124,5-125 msm) y bajos (121,5-122 msm). En el caso de las altimetrías bajas, los rendimientos fueron inestables espacial y temporalmente debido a que en años húmedos estos sitios se anegaron produciendo una reducción del rendimiento. En las zonas de altimetría elevada, los rendimientos resultaron inestables debido a que en un año con bajas precipitaciones (2008-09) fueron dependientes de los niveles de precipitaciones. Las zonas estables por altos rendimientos quedaron ubicadas en las zonas de altimetría intermedia-baja (122-123 msm). Estas zonas quedaron definidas por su alto rendimiento en los distintos años. Las

zonas estables por rendimiento medio quedaron ubicadas en las altimetrías intermedias del lote (123-123,5 msm), más alejadas de los bajos y lomas. Las zonas estables por bajos rendimientos fueron las intermedias-altas (123,5-124,5 msm).

CONCLUSIONES

El análisis espacial y temporal de mapas de rendimientos permitió definir zonas homogéneas de productividad en el lote. Se establecieron tres zonas estables (alto, medio y bajo rendimiento) y una zona inestable. La altimetría del terreno como así también las precipitaciones y su distribución afectaron tanto la variabilidad temporal como espacial del rendimiento de los cultivos, en nuestro caso maíz y girasol. Sin embargo, ninguna de estas variables explicó el rendimiento de manera acertada por sí misma. En años normales a secos, los bajos presentaron mayor productividad que las medias lomas y lomas, sin embargo en años con precipitaciones superiores a la media estos ambientes fueron de menor productividad. Por este motivo, tanto las lomas como los bajos fueron zonas inestables, mientras que las altimetrías intermedias fueron zonas más estables. En los rangos intermedios de altimetría, los rendimientos fueron de mayor a menor a medida que aumentó la cota relativa.

BIBLIOGRAFÍA

- Hörbe, T.A.N., Amado, T.J.C., Ferreira, A.O., Alba, P.J., 2013. Optimization of corn plant population according to management zones in Southern Brazil. *Precision Agriculture* 14, 450–465. doi:10.1007/s11119-013-9308-7
- Johnen, T., Boettcher, U., Kage, H., 2014. An analysis of factors determining spatial variable grain yield of winter wheat. *European Journal of Agronomy* 52, 297–306. doi:10.1016/j.eja.2013.08.005
- Khosla, R., Inman, D., Westfall, D.G., Reich, R.M., Frasier, M., Mzuku, M., Koch, B., Hornung, a., 2008. A synthesis of multi-disciplinary research in precision agriculture: site-specific management zones in the semi-arid western Great Plains of the USA. *Precision Agriculture* 9, 85–100. doi:10.1007/s11119-008-9057-1
- Kravchenko, A.N., Bullock, D.G., 2000. Correlation of Corn and Soybean Grain Yield with Topography and Soil Properties. *Agronomy Journal* 92, 75–83. doi:10.1007/s100870050010
- Kumhálová, J., Kumhála, F., Kroulík, M., Matějková, Š., 2011. The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. *Precision Agriculture* 12, 813–830. doi:10.1007/s11119-011-9221-x
- Peralta, N.R., Costa, J.L., 2013. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. *Computers and Electronics in Agriculture* 99, 218–226. doi:10.1016/j.compag.2013.09.014
- Solon, J., Degorski, M., Roozielinska, E., 2007. Vegetation response to a topographical-soil gradient☆. *Catena* 71, 309–320. doi:10.1016/j.catena.2007.01.006
- Urricariet, S., Niborski, M., Kvolek, C.M., 2011. Atributos del suelo y paisaje asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz en la pampa arenosa. *Ciencia Del Suelo* 29, 49–59.
- USDA Soil Survey, 2009. Examination and Description of Soils, in: *Soil Survey Manual* 2. USDA NRCS, pp. 1–110.
- Whelan, B.M., McBratney, A.B., 2000. The “Null Hypothesis” of Precision Agriculture Management. *Precision Agriculture* 2, 265–279.