

Caracterización de Ambientes Intralote y Generación de Índices de Productividad Relativa

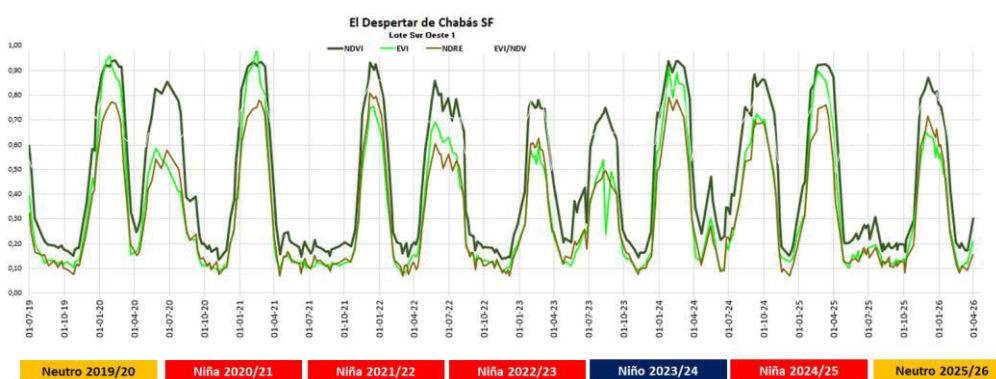


- La caracterización de ambientes dentro de un mismo lote para realizar un manejo sitio-específico es el pilar de la agricultura de precisión.
- Utilizar el histórico de imágenes satelitales posibilita identificar zonas con **comportamientos productivos estables** en el tiempo, optimizando la toma de decisiones como la dosificación variable de insumos: **semillas** (DS) y **fertilizantes** (fertilizaciones NPSZn), decisiones que impactan en los costos de implantación.
- Al integrar datos de mapas de rendimientos de cosecha anteriores se logran conclusiones más robustas, ya que se agregan kg/ha a la cuantificación de biomasa observada por los satélites.

Para construir un **Índice de Productividad Relativa** robusto a partir de series temporales de NDVI o NDRE, se recomiendan las siguientes pautas:

Para la selección de Imágenes Satelitales Históricas

- Contemplar entre 2 y 4 campañas agrícolas. Si la campaña que comienza es Niño, resulta de valor seleccionar el Niño previo, y alguna campaña Neutral con altos valores de Índices verdes



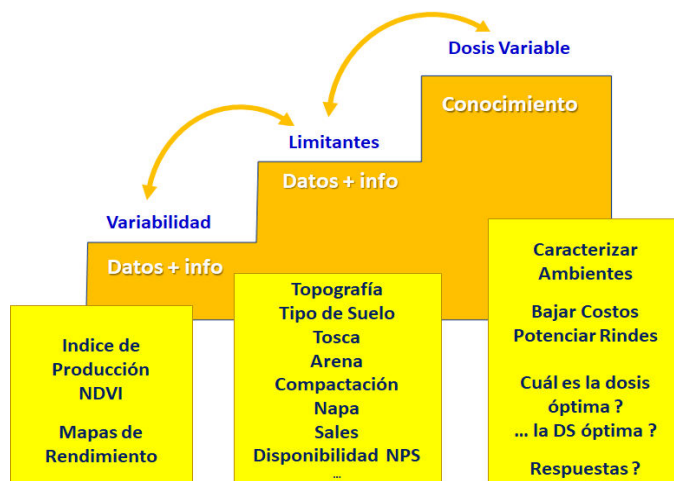
- Las imágenes deben seleccionarse en el período de máxima expresión vegetativa del cultivo alrededor de floración/llenado en maíz y cultivos de invierno, que es cuando se maximiza la brecha de desarrollo entre las zonas de alto y bajo potencial.
- Descartar imágenes con cobertura de nubes, o campañas atípicas por eventos climáticos extremos (como inundaciones, seca importante o granizo) que distorsionen la variabilidad natural del suelo.
- **Qué conviene emplear ¿NDVI o NDRE?**
El NDVI deja de registrar incrementos (se "satura" en valores cercanos a 0.80 - 0.85), volviendo invisible la variabilidad interna en etapas avanzadas. El Red Edge penetra mucho más en el canopeo, reflejando el estado de las hojas del tercio medio e inferiores y permitiendo captar diferencias de vigor incluso en cultivos completamente cerrados.
 - El **NDRE es superior** y más conveniente cuando se analizan imágenes de **cultivos en estadios intermedios a avanzados** (desde pre-floración hasta llenado de grano). Si se busca generar zonas de productividad basadas en el momento del cultivo está expresando su máximo potencial hídrico y nutricional (máximo IAF), el NDRE revelará variaciones de biomasa y nitrógeno que el NDVI camuflaría por saturación. Es ideal para: maíz, trigo, y caña de azúcar en estadios avanzados y detección fina de deficiencias de nitrógeno para fertilización variable tardía.
 - El **NDVI es conveniente** desde la emergencia hasta antes de floración y para incluir campañas previas al año 2015 (antes del lanzamiento de Sentinel-2), donde estamos obligados a usar Landsat, que carece de la banda Red Edge, imposibilitando el uso de NDRE.

Normalización de los Datos

- Dado que los valores absolutos de los índices varían según el cultivo, el año, la fecha de la imagen y las condiciones climáticas, no se pueden promediar directamente. Se aplica una normalización matemática para cada píxel dentro del lote: Donde: el valor de cada píxel se divide por el valor promedio del índice en la totalidad del lote para esa misma fecha.

Generar un mapa de productividad para determinar la Zonificación o Ambientes intralote

- Se promedian los mapas normalizados de las diferentes campañas para obtener un **Mapa de Productividad Relativa Histórica**.
- Se calcula la variabilidad temporal. La alta variación entre años puede denotar ambientes muy dependientes del agua por ej ambientes "loma" en años lluviosos vs. Años secos).
- **Diseño de ambientes intralotes:** Mediante algoritmos estadísticos (como K-means y otros) el lote se divide generalmente en 3 o 4 zonas: por ej: **Alto potencial, Medio potencial y Bajo potencial**



Aplicaciones agronómicas del IPR

- **Fertilización a tasa variable**
El IPR permite definir dosis diferenciadas de fertilización basadas en el potencial del sitio.
La lógica económica es clara: invertir más insumos en las zonas con mayor capacidad de respuesta (IPR alto) y reducirlos en zonas donde el factor limitante no es el nutriente sino el ambiente edáfico.
- **Densidad de siembra variable**
En maíz, la densidad de siembra es uno de los parámetros de mayor retorno económico en la gestión por ambiente. Las zonas de IPR alto admiten mayores densidades (80.000–95.000 semillas/ha) con respuesta positiva en rendimiento, mientras que las zonas de IPR bajo pueden responder negativamente a densidades superiores a 65.000–70.000 semillas/ha por competencia intraespecífica en ambientes con recursos limitados.
- **Muestreo de suelos dirigido**
La ambientación por IPR reduce el número de muestras de suelo necesarias para caracterizar la fertilidad del lote. En lugar de muestreos en cuadrícula regular, se toman muestras compuestas representativas de cada zona de manejo, optimizando el costo analítico y la representatividad de los resultados.
- **Planificación de la rotación**
Las zonas de IPR muy bajo (< 0.30) son candidatas a evaluación para cambio de uso —verdeos, pasturas, o exclusión del sistema de siembra directa continua. El IPR provee una evidencia objetiva y cuantificable para estas decisiones.
- **Monitoreo de la estabilidad ambiental y napas**
Calculando el IPR de forma separada para cada campaña y comparando la correlación espacial entre campañas sucesivas, se puede evaluar si los ambientes del lote son estables o si hay cambios en la distribución espacial del potencial productivo. Una alta correlación entre campañas ($r > 0.70$) valida el IPR como descriptor permanente; una correlación baja sugiere que factores variables, por ej: influencia de **napas**, modulan significativamente la distribución espacial del rendimiento.