

Viticultura de precisión aplicada al viñedo

Jorge F. Pérez-Quezada

La producción de vinos de calidad requiere una adecuada selección de la fruta que será incorporada al proceso de vinificación. En muchos viñedos el ambiente del cultivo varía ostensiblemente de un punto a otro, lo cual implica que la calidad de la fruta no es homogénea. Los factores que producen esta variabilidad van desde elementos relativamente estables como la textura y profundidad de suelo, hasta otros que podemos modificar con mayor facilidad como son la química del suelo (pH y conductividad eléctrica), el nivel de nutrientes, patrones de infestación de malezas, entre otros.

Por esto, todo avance en conocer esta variabilidad y su efecto en la calidad de la fruta es muy importante en viticultura. La viticultura de precisión (VP) busca justamente manejar el viñedo a una escala espacial y temporal apropiada a su natural variabilidad espacial y temporal. Este manejo, también llamado de sitio específico, es logrado a través de la utilización de un conjunto de herramientas y tecnologías. La VP puede cumplir uno o más objetivos, los que pueden ser aumentar la producción, reducir costos, mejorar la calidad y reducir el impacto ambiental. El presente artículo resume los avances de la VP en la etapa de zonificación de los viñedos, la cual es condición necesaria para cumplir los objetivos mencionados, especialmente el de producir vinos de calidad.

Las herramientas que han hecho posible la VP son principalmente los sistemas de posicionamiento global (GPS), la percepción remota y los sistemas de información geográfica (SIG). Existen otras herramientas también utilizadas en VP aunque no tan esenciales como los monitores de rendimiento, aplicadores de dosis variable y otros sensores. Para revisar estas herramientas y su uso partiremos con un ejemplo de zonificación utilizando un índice espectral.

Zonificación de un Viñedo usando NDVI

Los **GPS** nos permiten conocer las coordenadas latitud-longitud en metros de uno o más puntos y así definir límites y áreas de predios, ubicar lugares de muestreo y georeferenciar fotos aéreas. Estos aparatos tienen mayor precisión de acuerdo al número de satélites con los que se puedan comunicar en un momento y lugar dados, y con la posibilidad de corregir las coordenadas según la referencia de una estación fija en la Tierra (tecnología DGPS).

Las fotos aéreas, junto con las imágenes satelitales son las formas de **percepción remota** más típicamente usadas en AP debido a su conveniencia en cuanto a rapidez y escala de trabajo que representan. La ventaja de las fotos en cuanto a resolución espacial (hasta fracción de metro) ha sido equiparada por imágenes satelitales de sensores como QuickBird e IKONOS (4 m). Con esto y la mayor cobertura espacial de las imágenes satelitales, las hace más útiles para estudios regionales o en viñedos de gran extensión o dispersos. Actualmente esta tecnología está bajando de precio y está cada vez más al alcance del agricultor, principalmente a través de empresas de asesoría. Las imágenes satelitales o aéreas son generalmente multiespectrales, vale decir miden la reflectancia de la superficie en más de una longitud de onda. Las regiones espectrales que se miden más comúnmente son las de color azul (445-526 nm) verde (507-595 nm), rojo (632-698 nm), e infrarrojo cercano (757-853). Esto permite calcular índices de vegetación, dentro de los cuales el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) es el más usado, y su fórmula es la siguiente:

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R}$$

donde, IR es la banda de infrarrojo cercano y R la de rojo. Se ha comprobado que el valor de NDVI está relacionado linealmente con el área foliar (Johnson et al., 2003) y con ello también a maduración de fruto, infestación y enfermedades, estatus hídrico, características de fruta y calidad de vino.

En la Figura 1-A se puede observar el resultado del cálculo de NDVI para un viñedo de 6.62 ha en el valle de Napa en California. El rango de valores no cubrió todo el espectro potencial del NDVI (-1 a 1) y fluctuó entre -0.21 y 0.59. Posteriormente se procedió a clasificar los valores de NDVI en tres categorías según la técnica de intervalos iguales (Figura 1-B). Esta clasificación divide el rango de valores encontrado partes iguales según el número de categorías deseado (en este caso tres). Se puede observar que en este caso la categoría 1 es demasiado pequeña en superficie y por lo tanto no tiene mayor importancia desde el punto de vista de manejo. Los autores Carlson & Ripley (1997) propusieron una clasificación fija que distingue los siguientes rangos: 1: -1 a 0.2; 2: 0.2 a 0.5; 3: 0.5 a 1 (Figura 1-C). Esta clasificación distingue un sector de mayor NDVI en el sector sur del campo, lo cual genera tres zonas de superficie significativa. Finalmente la Figura 1-D es una proposición de zonificación digitalizada sobre la clasificación de Carlson & Ripley.

El sentido de esta zonificación debe ser corroborado en terreno a través de muestreo dirigido en cada una de las zonas. Esto es importante ya que se entiende la etapa de clasificación a través de índices espectrales como una herramienta de orientación para conocer la variabilidad interna del campo. Cualquier decisión de manejo variable dependerá de la relación de estas zonas con variables importantes del punto de vista de manejo y calidad de vino, lo cual se detalla más abajo.

La herramienta que permite manejar la información manteniendo el componente espacial son conocidos como sistemas de información geográfica (**SIG**). La relación directa entre el NDVI y el vigor del viñedo hace esperable que exista también una relación directa entre este índice y el rendimiento y, consecuentemente, inversa con la calidad de la fruta. Sin embargo, Ortega y Esser (2003) mostraron un ejemplo donde en un suelo plano, profundo y textura media, este índice no fue significativo en explicar el rendimiento y calidad. Vale decir deben existir diferencias más extremas de suelo para que el NDVI pueda predecir bien estos parámetros.

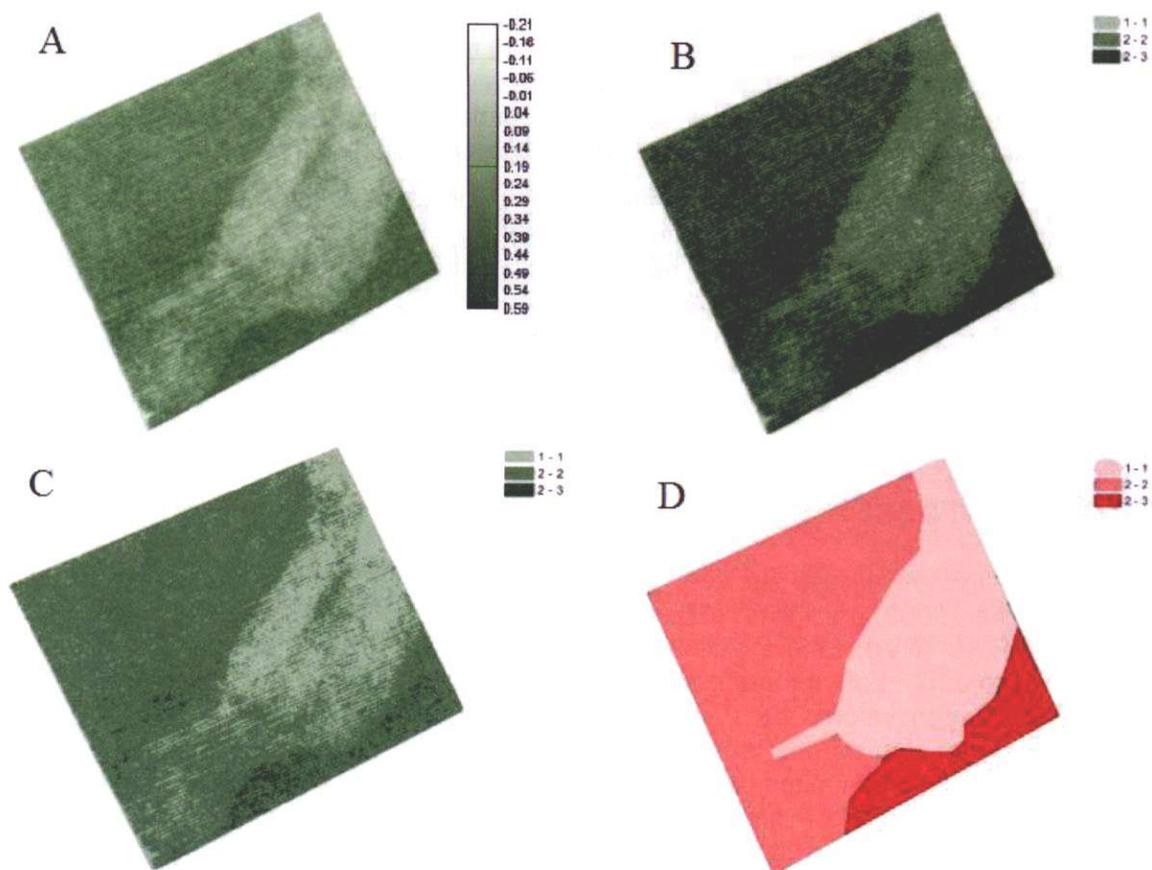


Fig. 1. Ejemplo de cálculo de NDVI en un viñedo en el valle de Napa (A), el cual es clasificado en tres categorías de intervalos iguales (B), intervalos de Carlson & Ripley (C) y una propuesta de zonificación correspondiente a alto-medio-bajo NDVI (D), siguiendo el resultado de la clasificación que muestra C. La superficie del viñedo es 6.62 ha.

Otros Elementos Importantes para Realizar la Zonificación

Sin duda que aparte de las primeras aproximaciones a la zonificación que se puedan lograr con percepción remota, la tecnología que entrega mayor información y de forma rápida son los **monitores de rendimiento**. Estos monitores permiten registrar los valores de rendimiento por unidad de superficie en cada sector del predio. Si bien es cierto que son una tecnología cara, en muchos casos estos monitores para vitivinicultura surgieron de la combinación de cosechadoras mecánicas existentes con la tecnología de GPS y un sistema de memoria digital.

Por otro lado, aunque no constituye una tecnología en si misma, la combinación de un GPS con **otros sensores** hace posible la espacialización de variables de suelo, planta y fruta en un predio. Esto consiste en usar por ejemplo el análisis de fertilidad de suelo o de pecíolo, llevando un registro de las coordenadas del punto donde las muestras fueron tomadas. Esta información que se encuentra originalmente en formato de puntos, puede ser interpolada usando las técnicas de geoestadística (kriging, nearest neighbors, etc.) que poseen los SIG. En cada campo se pueden realizar entre 10-20 muestreos para documentar la variabilidad espacial de variables de suelo, planta y fruta. En el caso del suelo, se pueden hacer muestreos de variables como la profundidad de suelo, la textura y variables químicas como el pH, contenido de macro y microelementos disponibles, junto con muestreos periódicos de

humedad de suelo. Las variables de la planta a medir suelen ser una mezcla de estimaciones visuales sobre el estado general de las plantas (vigor, deficiencias nutricionales, intensidad de ataque de plagas y enfermedades, etc.), junto con mediciones experimentales de estado hídrico y análisis de peciolo. En cuanto a la baya, ésta se puede muestrear para determinar acidez, contenido de azúcar y color, entre otros.

La etapa de análisis es la más importante en VP y consiste en determinar cuáles variables son las que más se relacionan con el rendimiento y la calidad de la baya. Para ello se utilizan técnicas multivariadas como regresiones múltiples y análisis de cluster, las cuales deben ser combinadas con técnicas geoestadísticas. Es en este punto donde se debe determinar si es que es rentable hacer un manejo diferencial de los insumos y labores dentro de un predio. Esto porque si bien el objetivo de la VP es estudiar la variabilidad dentro de huerto, ésta puede ser tan baja que no justifique la inversión que significa hacer una zonificación de manejo.

Zonificación para Producir Vinos de Calidad

Utilizando imágenes aéreas de alta resolución (0.5-1.0 m) tomadas en pinta (veraison), Dobrowski et al (2003) predijeron el peso de poda por metro lineal mediante el uso del Ratio Vegetation Index (RVI). Este índice se calcula dividiendo el canal infrarrojo cercano (NIR) por el canal rojo (R). Los autores encontraron una relación lineal y positiva entre el RVI y el peso de poda, con valores de r^2 de 0.68 y 0.88 en dos temporadas consecutivas. Si el crecimiento vegetativo de una temporada es insuficiente para alcanzar la madurez del fruto (la literatura cita valores límites de peso de poda de 0.5 kg m^{-1}), entonces se podría hacer un raleo de fruta dentro de la misma temporada. Por el contrario, si el crecimiento es excesivo (pesos de poda sobre 1 kg m^{-1}), se puede pensar en corregir el área foliar para reducir la densidad de la canopia y aumentar la penetración de luz. Para mejorar la aplicabilidad de estos modelos predictivos se debe estudiar la relación con imágenes tomadas antes de la pinta. Otro resultado importante de estos autores fue verificar el hecho que no existieron diferencias significativas entre los parámetros de los modelos para los distintos años, lo cual implica que el modelo de una estación puede ser usado en la siguiente temporada.

En una etapa más avanzada incluso es posible hacer micro-vinificaciones para ver la relación de las variables muestreadas con el producto final. Cortell et al. (2005) analizaron las relaciones entre las variaciones de características de suelo, crecimiento de la viña, componentes de rendimiento y la composición de la fruta y fenoles en el vino. Para ello distinguieron tres zonas de basados en parámetros de vigor de viña como son el área de la sección transversal del tronco, largo de brote promedio y clorofila en la hoja, los cuales fueron muestreadas en forma de grilla y georeferenciadas con GPS. Se encontraron relaciones significativas entre la reducción en vigor y el aumento de proantocianidinas de la piel (mg/baya), proporción de (-)-epigallocatequina, masa molecular promedio de proantocianidinas y el contenido de polímeros pigmentados en frutos. En las zonas de menor vigor hubo un gran aumento en la proporción de taninos extraídos al vino, mientras que poco cambio fue observado en la extracción de proantocianidinas de la semilla.

El mapeo de variables en viñas puede tomar mucho tiempo. Hall et al. (2003) señalan que muestrear seis variables básicas de calidad de fruta y rendimiento en 60 puntos en un bloque de 1-ha puede tomar más de 30 horas de trabajo. Es por eso que el uso de la percepción remota en la estimación de estas variables es un gran avance. Un ejemplo de esta aplicación es el trabajo de Lamb et al. (2004), quienes estudiaron la relación entre el contenido de fenoles y color de uva en cosecha de Cabernet Sauvignon con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Los autores encontraron que la mayor relación (negativa) era captada por las imágenes obtenidas cerca de pinta. Esta relación negativa se encontraba asociada a la profundidad de suelo, ya que mayores profundidades generan mayor crecimiento vegetativo, por ende mayor NDVI, y eso repercute en mayor sombreadamiento y bajas temperaturas y en especial menor radiación a nivel de racimo, lo que

genera menores contenidos de fenoles y menor color, ya que las enzimas responsables de la síntesis de compuestos fenólicos son muy sensibles a la radiación lumínica. Aun cuando los coeficientes de determinación de estas relaciones no fueron muy altos (R^2 entre 0.19 y 0.35), esta relación es promisoría en cuanto al poder predictivo del NDVI para una zonificación por calidad. La mejor relación entre las variables de calidad y el NDVI se produjeron cuando la resolución de las imágenes se redujo (se aumentó el tamaño de píxel) hasta llegar a coincidir con el ancho de la hilera, vale decir cuando corresponde a una combinación de planta y espacio entre hilera. Los píxeles al ser mezclados entregan información de tamaño y densidad de planta.

Los últimos adelantos en la aplicación de percepción remota en VP apuntan al hecho que la mayoría de los índices espectrales que existen actualmente no son sensibles a cambios rápidos en el status fotosintético de la planta. Existen excepciones como el physiological reflectance index (PRI) (Gamon et al., 1992) y el fluorescence ratio index (FRI) (Dobrowski et al., 2005) que buscan capturar cambios en la planta inducidos por estrés ambiental. Dobrowski et al. (2005) monitorearon los cambios en la fluorescencia de clorofila a nivel de canopia por efecto de estrés térmico e hídrico usando FRI. Estos índices utilizan bandas ubicadas en el máximo de emisión de fluorescencia de clorofila (CF) (690 y 740 nm), normalizados por bandas no afectadas por CF (R690/R600 y R740/R800). Ambos índices se correlacionaron cualitativamente con mediciones de Fs (steady-state photosynthesis) al nivel de hoja incluyendo la depresión y recuperación diaria ($R^2=0.75$ y 0.8 respectivamente), mucho mejor que lo logrado por PRI ($R^2=0.32$) y NDVI ($R^2=0.04$). La correlación de estos índices FRI con la asimilación fue de $r^2=0.36$ y 0.42 , respectivamente. Si bien este estudio fue realizado en condiciones controladas de invernadero y utilizando una canopia de 1 m^2 , es promisorio en el sentido de que abre la posibilidad de evaluar el estatus fotosintético sin necesidad de usar pulsos de inducción láser o saturación de luz. Junto con estos avances se encuentra el desarrollo de un método para analizar imágenes de alta resolución y estimar variables físicas de plantas individuales en términos de la forma y tamaño de la canopia (Hall et al., 2003).

Manejo Diferencial

Dentro de las medidas de manejo diferenciales que se pueden hacer dentro de un marco de VP están la regulación del área foliar y el momento de cosecha. Los manejos de canopia para regular área foliar incluyen poda, raleo de brotes, raleo de hojas, cultivos de cobertura, manejo del riego y aplicación de fertilizantes al suelo o al follaje. El manejo de la cantidad y periodicidad de riego se conoce como riego de precisión y busca conocer y controlar la variabilidad espacial y temporal del estatus hídrico de un viñedo. Ortega-Farias et al. (2003) señalan que el efecto del estrés hídrico en un viñedo tendrá resultados positivos, negativos o nulos dependiendo del grado de variabilidad que encontremos en el suelo, clima y vigor dentro de la zona de interés.

En el caso de los fertilizantes y otros productos químicos que son insumos de la producción vitícola, se pueden utilizar **aplicadores de dosis variable**. Esto con el fin de corregir las situaciones que limiten un desarrollo óptimo y homogéneo del huerto. Para este fin se debe generar un mapa de aplicación en el SIG, el cual es incorporado al sistema de aplicación para que con ayuda de un GPS varíe la cantidad a aplicar según dónde se encuentre en el terreno.

La cosecha diferencial permite rescatar del campo aquella fracción de mayor calidad que puede ser destinada a la producción de vinos premium. Ortega y Esser (2003) encontraron que entre un 20 y un 30% de la producción de un viñedo corresponde a este tipo de uva. Para el caso específico de su estudio, la cosecha diferencial producía entre 188 y 363 US\$ ha^{-1} , lo cual superaba los costos de obtener la información para establecer la cosecha diferencial, es decir se recomienda hacer en este manejo en forma normal en viñedos que contemplan la producción de vinos premium.

El hecho que la VP puede muestrear variables en “micro-escalas” (mayores a 1:10.000), está cambiando la escala de trabajo para definir Terroir. Las variables que son parte importante del concepto de Terroir son suelo, clima, materia vegetal (variedad, clon, portainjerto) y manejo agronómico. Este concepto ha permitido el desarrollo de importantes regiones vitivinícolas en Chile y el Mundo y ahora se podría pensar en definiciones a escalas sub-prediales.

Conclusiones

En resumen, la VP es esencialmente manejo de información. Este manejo permite conocer más en detalle la variabilidad de los distintos factores de rendimiento para poder hacer las correcciones durante la estación de crecimiento, o bien al final de cada ciclo productivo proponer medidas correctivas de las limitantes encontradas en cada situación. La aplicación de técnicas de VP pretende básicamente mejorar la gestión predial de los productores de uva para vino, a través de la homogenización del rendimiento y la calidad dentro del predio. La mayoría de estas tecnologías están disponibles en los países productores de vino de América Latina y están comenzando a ser usadas ampliamente para mejorar el nivel de producción y la calidad.

Literatura Citada

- Carlson, T. and D. Ripley. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment* 62:241-252.
- Cortell, J. M., M. Halbleib, A. V. Gallagher, T. L. Righetti and J. A. Kennedy. 2005. Influence of vine vigor on grape (*Vitis vinifera* L. cv. Pinot noir) and wine proanthocyanidins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53:5798-5808.
- Dobrowski, S. Z., S. L. Ustin and J. A. Wolpert. 2003. Grapevine dormant pruning weight prediction using remotely sensed data. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 9:177-182.
- Dobrowski, S. Z., J.C. Pushnik, P.J. Zarco-Tejada and S. L. Ustin. 2005. Simple reflectance indices track heat and water stress-induced changes in steady-state chlorophyll fluorescence at the canopy scale. *Remote Sensing of Environment* 97:403-414.
- Gamon, J. A., J. Penuelas and C. B. Field. 1992. A Narrow-Waveband Spectral Index That Tracks Diurnal Changes in Photosynthetic Efficiency. *Remote Sensing of Environment* 41:35-44.
- Hall, A., J. Louis and D. Lamb. 2003. Characterising and mapping vineyard canopy using high-spatial-resolution aerial multispectral images. *Computers & Geosciences* 29:813-822.
- Johnson, L. F., D. E. Roczen, S. K. Youkhana, R. R. Nemani and D. F. Bosch. 2003. Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery. *Computers and Electronics in Agriculture* 38:33-44.
- Lamb, D. W., M. M. Weedon and R. G. V. Bramley. 2004. Using remote sensing to predict grape phenolics and colour at harvest in a Cabernet Sauvignon vineyard: Timing observations against vine phenology and optimising image resolution. *Australian Journal of Grape and Wine Research* 10:46-54.
- Ortega, R. and C. Esser. 2003. Precision viticulture in Chile: experiences and potential impacts, p. 9-33, *In* R. Ortega and C. Esser, eds. *International Symposium on Precision Viticulture*. IX Latin American Congress on Viticulture and Enology. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Ortega-Farias, S., T. Righeti, F. Sasso, C. Acevedo, F. Matus and Y. Moreno. 2003. Site-specific management of irrigation water in wine grapevines, p. 55-71, *In* R. Ortega and C. Esser, eds. International Symposium on Precision Viticulture. IX Latin American Congress on Viticulture and Enology. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.