

***Vitis vinifera* L. cv. Tannat: respuesta a la variabilidad climática**

Fourment Mercedes^{1,2}, Ferrer Milka¹, Quénoel Hérve³

^{1,2}*Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Garzón 780, 12900, Montevideo, Uruguay. Correo electrónico: mfourment@fagro.edu.uy*

²*Centro Interdisciplinario de Respuesta al Cambio y la Variabilidad Climática, Espacio Interdisciplinario. Universidad de la República. Rodó 1834, 11200, Montevideo, Uruguay.*

³*Université Rennes 2, Laboratoire COSTEL UMR6554 LETG-CNRS. Place du recteur Henri Le Moal 35043, Rennes, Francia.*

Recibido: 25/4/13 Aceptado: 1/10/13

Resumen

Las plantas responden a las condiciones climáticas del año, siendo la vid particularmente sensible a la temperatura y al régimen hídrico. La variación en la duración de los estados fisiológicos como la maduración y la composición final de la uva, evidencian una respuesta del cultivo al clima. El objetivo de este estudio fue analizar la evolución de bio-índices y determinar la respuesta de la vid, cv. Tannat, a la variabilidad climática observada en una serie de años en el sur de Uruguay. En un periodo de 16 años (1994 - 2009), se evaluaron las condiciones climáticas mediante bio-índices (Índice Heliotérmico de Hulgin IH, Índice de Frescor de Noches IF, e Índice de Sequía IS), que tienen en cuenta las temperaturas, las precipitaciones y la evapotranspiración potencial durante el ciclo del cultivo. Se determinaron las fechas de comienzo de maduración y de cosecha, el estado hídrico, el peso y la composición final de la uva. Los índices bio-climáticos mostraron una fuerte variación para el período de estudio. IH mostró un aumento de 2,25%, mientras que el IF bajó 0,43 °C. IS presentó la mayor variabilidad con años húmedos y otros de sequía moderada. Se observó un acortamiento del periodo de maduración, con un adelanto de las fechas de envero (maduración) y cosecha ($R^2=0,91$; $P=0,0001$ y $R^2=0,74$; $P=0,0001$ respectivamente), y la modificación en la composición final de la uva, con una tendencia de disminución de la acidez total ($R^2=0,82$; $P=0,0001$).

Palabras clave: vid, índice bio-climático, fenología, composición de la uva

Summary

***Vitis vinifera* L. cv. Tannat: Responses to Climate Variability**

Plants respond to annual climate conditions, the grapevine being particularly sensitive to temperature and water regime. The variation in length of physiological states such as ripening, and the final composition of grapes, show a crop response to the weather. The aim of this study was to analyze the evolution of the bio-indices and determine the cv. Tannat plant responses to climate variability observed in a number of years in southern Uruguay. In a period of sixteen years, we assessed climate conditions through bio-indices (Index of Hulgin Heliothermic IH, Freshness Index of Nights IF, and IS Drought Index), considering temperature, precipitation and potential evapotranspiration during growing season. We analyzed dates of veraison and harvest, water status, berry weight and berry composition at harvest. Bio-climatic indices showed a strong variability for the studied period. IH showed an increase of 2.25%, while IF declined 0.43 °C. IS was the index of highest variability, with wet years and years with moderate drought. We observed the shortening of the ripening period, an advance in veraison and harvest dates ($R^2=0.91$, $P=0.0001$ and $R^2=0.74$, $P=0.0001$ respectively), and a change in the final composition of the berry, with a tendency of reducing grape acidity at harvest ($R^2=0.82$, $P=0.0001$).

Keywords: grapevine, bio-climatic index, phenology, grape composition

Introducción

Las modificaciones del clima como consecuencia del cambio climático se expresan en las variaciones de la temperatura y en el régimen hídrico (Schultz, 2000). Los informes del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) muestran un aumento de la temperatura media global a un ritmo medio anual de 0,74 °C entre 1906 y 2005 (IPCC, 2007). En Uruguay, en base a los datos observados por Giménez y Lanfranco (2009) para el periodo 1931-2000 y por FAO (2011) en los últimos 30 años, se observa un aumento de la temperatura media anual de 0,8 °C en promedio, explicado sobre todo por una tendencia de aumento de la temperatura mínima durante todo el año, mientras que para la temperatura máxima media se observa una disminución, sobre todo en los meses de enero y febrero. Para las precipitaciones se observa una tendencia al aumento de la precipitación anual del 20% (explicado sobre todo por un aumento de lluvias en primavera y verano, sobre la base de datos mensuales), siendo el promedio anual de precipitaciones de 1200 a 1600 milímetros por año (FAO, 2011). Sin embargo, una gran parte de la variabilidad encontrada en los datos no es explicada por la variabilidad a largo plazo, lo que sugiere la importancia de la variabilidad climática a una escala menor de tiempo, como la variabilidad interanual.

La vid es un cultivo perenne que se caracteriza por su gran sensibilidad a los factores del clima. Es reconocido el efecto de las temperaturas sobre la fenología de la vid y la composición de la uva (Jackson y Lombard, 1993; Mira de Orduña, 2010). La vid es considerada, para muchos casos, como indicadora del cambio climático (Jones *et al.*, 2004, 2005; Fourment *et al.*, 2011) y, como ejemplo, Chuine *et al.* (2004) reconstruyen las condiciones climáticas a partir del año 1370 en Francia en función de los registros fenológicos y las fechas de cosecha.

En la vid, el aumento de temperatura provoca adelanto del ciclo fenológico (Duchêne y Schneider, 2005; Webb *et al.*, 2008) y afecta al contenido de los componentes principales de la baya, por la modificación de la acumulación de azúcares (Petrie y Sadras, 2008; Neethling *et al.*, 2011), la reducción de la acidez total y el aumento de pH (Jones y Davies, 2000; Bergqvist *et al.*, 2001; Duchêne y Schneider, 2005). Estos cambios influyen sobre la adaptación de las variedades a una determinada zona de producción, a la vez que se modifica la tipicidad de sus vinos (Schultz, 2000). El régimen hídrico juega un rol esencial sobre la maduración de la baya, ya que condiciones de estrés hídrico mo-

derado favorecen la acumulación de azúcares y metabolitos secundarios (Carbonneau, 2004; Shellie, 2006; Castellarin *et al.*, 2007; Cohen *et al.*, 2008; Van Leeuwen *et al.*, 2009).

La variedad de uva Tannat se considera la más adaptada a las situaciones de Uruguay. Es el *cepage* considerado insignia del país, ya que aporta vinos con gran tipicidad y originalidad debido a su gran potencial enológico (González-Neves *et al.*, 2006). La región vitícola más importante del país se centra en solamente dos departamentos (Canelones y Montevideo), representando el 76,3% del viñedo del país (INAVI, 2012). Según Jones *et al.* (2004), las zonas de producción de uva y vino que se encuentran localizadas en su mayor parte en una misma región, presentan mayor vulnerabilidad a la variabilidad climática a corto-mediano plazo, y al cambio climático a largo plazo.

El objetivo de este estudio fue determinar en los últimos 16 años la evolución de los índices bio-climáticos y la respuesta de la variedad Tannat a la variabilidad climática observada en el sur de Uruguay (34° HS).

Materiales y métodos

Ubicación del experimento y material vegetal

La información se obtuvo de tres parcelas de viñedos comerciales de la variedad Tannat injertada sobre SO4, conducidas en espaldera y con poda Guyot, ubicadas en el departamento de Canelones. El clima vitícola de esta región es con sequía moderada, templado cálido, con noches templadas, clasificado como IS_{A1}IH_{A4}IF_{A2} según la «Clasificación Climática Multicriterios» (Tonietto y Carbonneau, 2004; Ferrer, 2007). La información del cultivo provino de proyectos de investigación del grupo de Viticultura de la Facultad de Agronomía, correspondientes al periodo 1994 a 2009, siguiendo protocolos específicos para cada variable.

Datos climáticos y cálculo de índices bio-climáticos

Se tomó la base de datos de la estación meteorológica del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA Las Brujas, Lat 34°40', Long 56°20'), situada en el sur de Uruguay, conforme a las normas de la OMM. La escala temporal fue de 16 años (1994 a 2009), correspondientes a la misma serie de registros del cultivo. Las variables diarias consideradas fueron: temperaturas máximas y mínimas del aire (°C), precipitación (mm) y evapotranspiración potencial de Penman-Monteith (mm).

Para caracterizar el periodo de maduración, se detalla la temperatura máxima media del mes más cálido (enero) y el número de días con temperatura máxima media superior a 30 °C, reportada como el umbral a partir del cual la vid comienza a sufrir estrés térmico (Coombe, 1987; Hunter y Bonnardot, 2011; Ferrer *et al.*, 2011a).

Los índices bio-climáticos calculados fueron el Índice Heliotérmico (Huglin, 1978), el de Frescor de Noches (Tonietto, 1999) y el de Sequía (Riou, 1994) (Cuadro 1). El Índice Heliotérmico (IH) mide la cantidad de calor recibida por la planta durante el período vegetativo, cuando la fotosíntesis es activa. Su cálculo fue realizado adaptando su fórmula para las condiciones de Uruguay. Comprende el período entre el 1 de septiembre y el 28 de febrero, correspondiente al ciclo del cultivo para las condiciones de Uruguay. Para calcular el Índice de Frescor de Noches (IF) se consideró la temperatura mínima media del aire del mes de febrero (mes previo a la cosecha), siendo adaptado para

las condiciones de Uruguay. Este índice es relevante para evaluar las potencialidades cualitativas de las regiones vitícolas teniendo en cuenta la variación en la acumulación de metabolitos secundarios en respuesta a las condiciones climáticas durante la maduración. Para el IH y el IF, se calculó el desvío porcentual con respecto a la media del período 1973-2009, correspondiente a la serie más larga de la estación de referencia. La media del IH fue de 2157 °C (correspondiente a clima *templado cálido*) y la del IF fue de 16,8 °C (correspondiente a *noches templadas*) (Cuadro 1). El Índice de Sequía (IS) es la estimación de la disponibilidad de agua para la planta en un período dado, a partir del cálculo de balance hídrico que tiene en cuenta la capacidad de reserva de agua del suelo (estandarizada en 200 mm) y el kc (coeficiente del cultivo). En nuestro trabajo este índice fue calculado con el valor real de la reserva útil del suelo vitícola predominante en la región (136,7 mm de reserva hídrica inicial útil del suelo explorable por las raíces- W_0), determi-

Cuadro 1. Índices bio-climáticos adaptados a la vid, ecuaciones de cálculo y categorías de clasificación.

Índice	Ecuación de cálculo	Categorías de clasificación °C
Helio-térmico de Huglin (IH)	$IH = \sum(T_{med} - 10 + T_{max} - 10) / 2k$	Muy muy frío $IH_0 < 1200$ Muy frío $IH_1 = 1200-1500$ Frío $IH_2 = 1500-1800$ Templado $IH_3 = 1800-2100$ Templado Cálido $IH_4 = 2100-2400$ Cálido $IH_5 = 2400-2700$ Muy cálido $IH_6 = 2700-3000$ Muy muy cálido $IH_7 > 3000$
Frescor de noches (IF)	$IF = T_{min}$ promedio Febrero	Noches muy frescas $I F_4 \leq 11.9$ Noches frescas $I F_3 \geq 12 \leq 13.9$ Noches templadas $I F_2 \geq 14 \leq 17.9$ Noches calurosas $I F_1 \geq 18$
Índice de Sequía (IS)	$IS = W_0 + P - T_v - E_s$	Sequía muy fuerte $IS_3 \leq -201$ Sequía fuerte $IS_2 \leq -101 > -200$ Sequía moderada $IS_1 \leq 50 > -100$ Sub-húmedo $IS_0 \leq 151 > 51$ Húmedo $IS_{00} > 150$

T_{med} = temperatura media; T_{max} = temperatura media máxima; K = coeficiente de largo del día; W_0 = reserva hídrica inicial útil del suelo explorable por las raíces; P = pluviometría; T_v = transpiración potencial de la vid; E_s = evaporación directa a partir del suelo.

nado por Molfino y Califra (2004). El cálculo de IS se efectuó para el período comprendido entre el 1° de setiembre y el 28 de febrero de cada año de acuerdo al ciclo del cultivo.

Planta: fenología, potencial hídrico y composición final de la uva

Se determinaron la fecha de envero (día juliano en el cual el 50% de las uvas del conjunto de los racimos de las parcelas se encontraban coloreadas) y la fecha de cosecha (día juliano de la primera cosecha). La fecha de cosecha fue definida por el conjunto de componentes de la baya: pH, acidez total y azúcares totales, determinados en muestreos secuenciales de 250 bayas según la metodología de Carbonneau *et al.* (1991). Cuando se alcanzaron las condiciones de madurez tecnológica, bajos los mismos criterios todos los años, en una muestra de 250 bayas se midieron por duplicado: peso de baya (g), azúcares totales por refractometría (g/l) (Refractómetro Atago N1, Japón), acidez total por titulación (mg H₂SO₄/L) y pH por potenciometría (pHímetro Hanna HI8521, Italia), según protocolos de la OIV (1990).

Se midió el estado de hidratación de la planta, determinado por la medida del potencial hídrico foliar de base (bar) a través del método de la cámara de presión (Scholander *et al.*, 1965). La medida fue realizada en 10 hojas adultas sanas y enteras, tomadas antes del amanecer (entre 4 h y 6 h, hora local), en el momento de cosecha.

Análisis estadístico

Se calcularon las regresiones lineales para las variables climáticas y fisiológicas de la vid (variables dependientes) y el tiempo en años (variable independiente). Se realizaron análisis de varianza para cada regresión, seguidos de separaciones de medias por el test de Tukey ($\alpha = 5\%$). Se obtuvieron los coeficientes de determinación (R²) para relacionar la variación explicada por el modelo de regresión con la variación total. Se utilizó el programa INFOS-TAT® versión profesional (Córdoba, Argentina, 2009).

Resultados

Variabilidad climática – Evolución de bio-índices

La temperatura máxima media del mes más cálido (enero) muestra un promedio de 28,4 ± 1,1 °C, mientras que en promedio, existen 33 días con temperatura superior a 30 °C (Cuadro 2).

Cuadro 2. Temperatura máxima del mes de enero (°C) y Número de días con Temperaturas mayores a 30°C según año, para el periodo 1994-2009

Año	Temperatura máxima de enero (°C)	Nº días con temperaturas mayores a 30 °C
1994	27,8	33
1995	27,8	33
1996	29,1	41
1997	29,8	48
1998	26,3	10
1999	26,5	26
2000	29,8	35
2001	29,2	39
2002	27,3	28
2003	28,3	32
2004	27,7	22
2005	28,8	34
2006	28,3	30
2007	29,2	46
2008	29,0	33
2009	29,0	40

El Índice Heliotérmico (IH) aumentó en promedio 2,25% durante el período 1994-2009 (media a partir de los desvíos estándar con respecto al promedio histórico 1973-2009) (Figura 1). Once de los 16 años del período de estudio mostraron un IH superior a la media histórica completa (1973-2009).

La variabilidad temporal de IF para el período 1994-2009 mostró en promedio una disminución de 0,43 °C en relación a la estación meteorológica de referencia (promedio a partir de los desvíos estándar con respecto al promedio histórico 1973-2009). Esta disminución indica la existencia de un período anterior a la cosecha levemente más frío que el promedio de los últimos 36 años, aunque en promedio IF mantiene el tipo de clima de *noches templadas* (Figura 2). En total, 12 de 16 años presentaron un IF por debajo de la media histórica (1973-2009).

La evolución del Índice de Sequía (IS) en la estación meteorológica analizada mostró una fuerte variación, con años de *sequía moderada* (1996, 2000, 2002, 2004, 2008 y 2009), años sub-húmedos (1995, 1997, 1998, 1999, 2003, 2006 y 2007) y *años húmedos* (2001 y 2005) (Figura 3).

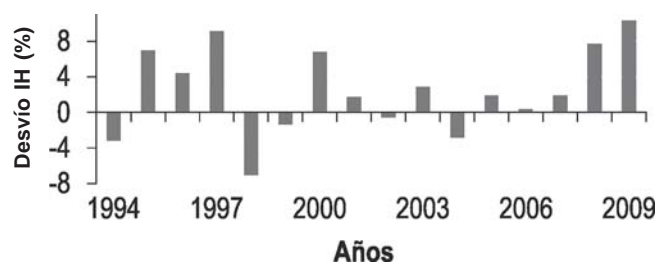


Figura 1. Desvíos estándar del Índice Heliotérmico con respecto a la media (IH 2089,6) para el período 1994-2009.

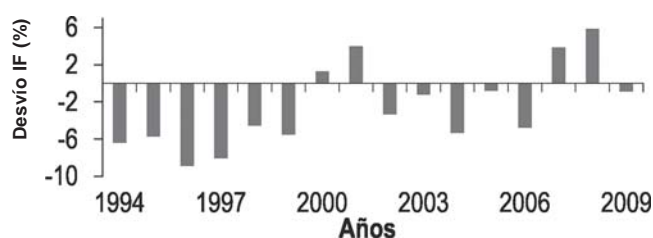


Figura 2. Desvíos estándar del Índice de Frescor de noches con respecto a la media (IF 16,8°C) para el período 1994-2009

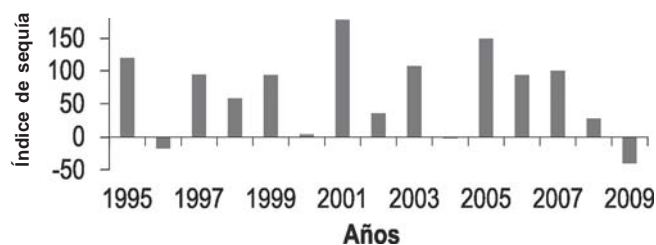


Figura 3. Evolución del Índice de Sequía para el período 1994-2009.

Planta

La fecha fenológica del 50% de envero y la fecha de cosecha para el período de estudio mostraron una tendencia significativa al adelanto ($R^2=0,91$; $P=0,0001$ para la fe-

cha de envero y $R^2=0,74$; $P=0,0001$ para la fecha de cosecha) (Figura 4). El adelanto de la cosecha (0,7 días) fue mayor que el de envero (0,55 días), de manera que ambas situaciones de avance provocaron un acortamiento en el período de maduración.

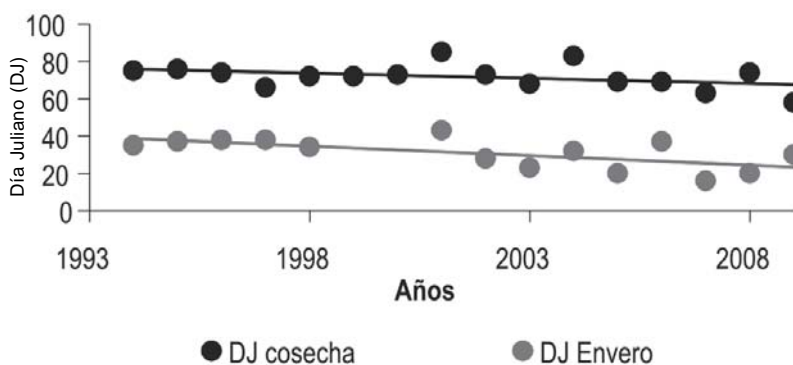


Figura 4. Fechas de envero y de cosecha expresadas en días julianos para el período 1994 a 2009.

El peso de la baya en cosecha mostró una media de 1,56 g en el período de 2001-2009 (Figura 5). En el momento de cosecha, las situaciones de estrés hídrico de las plantas, medido a través del potencial hídrico, mostraron grandes variaciones: años con situaciones sin estrés, con potenciales superiores a -1,5 bar (2001, 2003, 2005 y 2006), de estrés hídrico moderado, con potenciales hídricos de -1,5 a -3 bar (2002, 2007, 2008 y 2009), y un año en particular de estrés fuerte, con un potencial inferior a -3 bar (2004).

En cuanto a la composición de la uva, el contenido de azúcares de la uva en cosecha no siguió una tendencia lineal ($R^2=0,32$; $P=0,218$) para el período 1994-2009 (Figura 6). El máximo contenido en azúcares fue registrado en 2002, bajando considerablemente en los últimos cinco años de la serie. La evolución del valor final de acidez total en la uva tuvo tendencia a disminuir ($R^2=0,82$; $P=0,0001$) (Figura 7). El contenido en acidez más bajo (diferenciado por Tukey al 5%) fue observado en los años 1997, 2002, 2003 y 2009 (4,08 g H_2SO_4/L).

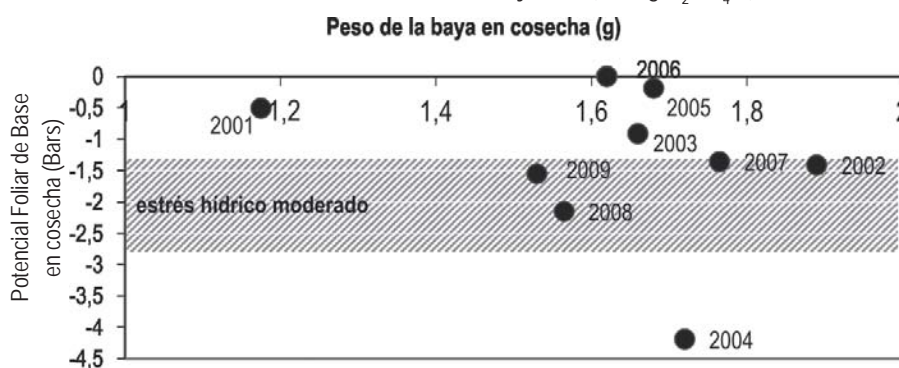


Figura 5. Peso de la baya en cosecha (g) y Potencial Foliar de Base (Bars) en cosecha para el período 2001-2009.

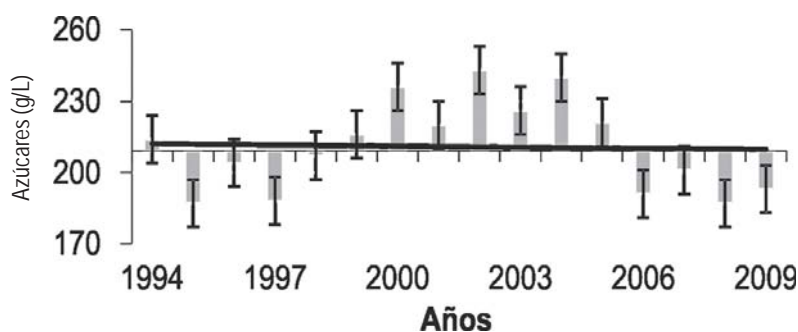


Figura 6. Evolución de los contenidos en azúcares (g/l) en cosecha para el período 1994-2009.

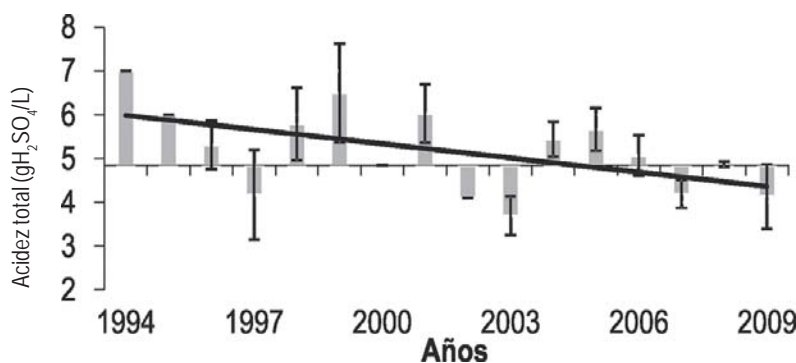


Figura 7. Evolución de los contenidos en acidez total (g H_2SO_4/l) en cosecha para el período 1994-2009.

Discusión

Variabilidad climática – Evolución de bio-índices

El IH fue el índice calculado a partir de temperatura que presenta la mayor variabilidad temporal, de manera que se modifica el tipo climático de clima *templado cálido* a clima *cálido*, mientras que el IF se mantuvo en su clasificación de *noches templadas*. Las clases de IH de climas más cálidos presentan mayor síntesis de azúcares totales debido al incremento de la actividad fotosintética (Jackson y Lombard, 1993). Existen tres casos de años (1997, 2000 y 2009) en los cuales el mayor valor de IH coincide con una temperatura de enero extrema (29,5 °C en promedio) y un elevado número de días con temperatura superior a 30 °C (41 días en promedio).

Al norte de Uruguay (IH medio de 2651, tipo climático *cálido*) la composición de la baya en cosecha es diferente a la del sur (Ferrer *et al.*, 2011b). En general, la uva proveniente del norte presenta mayor concentración de azúcares, menor acidez y mayor potencial en antocianos. Cuando las condiciones en el norte del país son muy extremas, con temperaturas durante la maduración superiores a 35 °C, la maduración se ve bloqueada (Coombe, 1987) y la composición de la uva es alterada, tanto en términos de composición primaria (azúcares, acidez, pH) como secundaria (síntesis y acumulación de polifenoles) (Bergqvist *et al.*, 2001; Petrie y Sadras, 2008; Cohen *et al.*, 2008; Hunter y Bonnardot, 2011).

En la medida que las condiciones se orientan a un clima más cálido, es posible que las condiciones del sur del país se acerquen, en un futuro próximo, a aquellas que se presentan actualmente en el norte y por lo tanto, las modificaciones en la composición de la uva se asemejen a las que actualmente se obtienen en el norte para la misma variedad. La evolución observada de la temperatura no fue tan importante como las variaciones interanuales que se dan en escalas de tiempo mayores. El IH aumentó 2,25% en todo el período estudiado mientras que entre 1996 y 1997 varió un 14%. El desafío actual es conservar la tipicidad de la variedad Tannat dentro de esta variabilidad, además de que esos años más extremos son los que pueden servir como referencia a situaciones futuras.

Los resultados de IF no mostraron variaciones significativas de la temperatura mínima en el mes previo a la cosecha para la serie de años estudiada. La posible pérdida del potencial cualitativo en cosecha cuando existe un aumento de la temperatura nocturna (Duchêne y Schneider, 2005;

Jones y Davies, 2000) indicada en los resultados de otros trabajos no puede ser comprobada en nuestro estudio, debido a que este componente del clima no se vio modificado dentro de los rangos del índice. En otras palabras, una limitación que presenta el IF son los rangos tan amplios de temperatura para diferenciar clases, tal como lo discuten Bonnardot *et al.* (2012), en donde importantes aumentos de la temperatura mínima no siempre se corresponden con una variación del tipo climático.

El IS fue el índice bioclimático que ha mostrado más variabilidad en todo el período estudiado, lo que podría indicar que se trata de la variable que penaliza más la composición final de la uva, ya que no siempre hubo situaciones de estrés hídrico moderado que hubiesen favorecido la acumulación de azúcares y compuestos fenólicos (Carbonneau, 2004). Se puede observar que el 60% de los años de la serie son clasificados como húmedos y sub-húmedos, por lo que pueden ser consideradas cosechas de composición desfavorable para la vinificación debido al efecto de dilución de compuestos y a la incidencia de podredumbre provocada por la lluvia, como ocurrió en 2006, 2007 y 2008.

Planta

Para la serie de años estudiada, se observa que las fechas fenológicas de Tannat fueron modificándose en la región vitícola particular del sur de Uruguay. Tanto el adelanto de envero y cosecha, como el acortamiento del período de maduración, son respuestas del cultivo, citadas por otros autores, a condiciones más cálidas (Jackson y Lombard, 1993; Seguin y García de Cortázar, 2004; Duchêne y Schneider, 2005). Un período de maduración más corto tiene la ventaja de disminuir la exposición de la uva a las precipitaciones y, en consecuencia, a la incidencia de podredumbre cuando las condiciones durante la maduración son las favorables para el desarrollo de hongos del tipo *Botrytis cinerea* (Gepp *et al.*, 2012). En contrapartida, la composición de la baya puede presentar alteraciones o problemas ligados a la síntesis de los diferentes componentes en condiciones más cálidas. Para esos casos, Jackson y Lombard (1993) citan efectos negativos en el color, disminución de la acidez, aumento de los azúcares y alteraciones en el aroma. Finalmente, todas estas alteraciones en la composición final de la uva interpelan a los cambios de la tipicidad que puede sufrir la variedad Tannat, como se observa en otras partes del mundo (Schultz, 2000; Neethling *et al.*, 2011).

El peso de la baya en cosecha fue en promedio de 1,56 g, menor que el valor de 1,83 g reportado para esta variedad por González-Neves (2005) dentro del mismo período de años. Para la serie de años estudiada, sólo cuatro años (2002, 2007, 2008 y 2009) presentaron un estrés hídrico moderado en cosecha. Dicho estrés no provocó un efecto de concentración por pérdida de agua de la baya, tal como citan Ojeda *et al.* (2008), debido a que no hubo menor tamaño de baya en esas situaciones de estrés cercanas a la vendimia. Esto se puede explicar por el hecho de que el estrés hídrico moderado se debe presentar durante varias fases del ciclo, y no solamente en la etapa final de maduración (Van Leeuwen *et al.*, 2009). Condiciones de déficit hídrico en el período floración-cuajado también provocan una disminución de la multiplicación y la expansión celular de la baya con disminución del tamaño de la misma (Ojeda *et al.*, 2001; Van Leeuwen *et al.*, 2009), por lo que es pertinente hacer un seguimiento del estatus hídrico durante varias fases del ciclo de la vid.

La concentración final de sólidos solubles para la serie estudiada no mostró una tendencia clara, tal como citan Jones y Davies (2000). Sin embargo, existen trabajos que muestran un aumento general y continuo de esta concentración por una mayor fotosíntesis en respuesta a la temperatura (Jones y Davies, 2000; Seguin y García de Cortázar, 2004; Duchêne y Schneider, 2005). Los bajos tenores en azúcares de los últimos cuatro años se pueden explicar por dos efectos (Jackson y Lombard, 1993): por un lado, un efecto de dilución debido a condiciones no limitantes de agua para la planta en los años 2006 y 2007 (IS de 94 y 101 respectivamente) y por otro lado, el bloqueo de la fotosíntesis en los años 2008 y 2009 debido a situaciones de estrés hídrico al comienzo y durante la maduración de la uva. En los años 2006, 2007 y 2008, se debe mencionar la incidencia que hubo de podredumbre, como *Botrytis cinerea* (datos no mostrados). El porcentaje de incidencia fue de 85, 67 y 69%, respectivamente. El estado sanitario influyó claramente en la composición final de la uva, sobre todo en la acumulación de azúcares en 2006, 2007 y 2008; y en la acidez total, en los años 2006 y 2008. Proffit y Genevet (2004) citan una disminución de los sólidos solubles y un aumento de la acidez en cosecha, tal como se registró en esos años de estudio. Los valores más elevados en el contenido de azúcares en la uva de Tannat en cosecha corresponden a los años 2000, 2002 y 2004, siendo años de características medias en cuanto a los índices IH e IF. Cuando se analizan años extremos en cuanto a temperatura, como fueron los años 1995 (IH = 2235; 33 días con

temperatura superior a 30 °C), 1997 (IH = 2280; 48 días con temperatura superior a 30 °C) y 2009 (IH = 2305; 40 días con temperatura superior a 30 °C), todos ellos se corresponden con los valores más bajos en azúcares. Esto se explica por el efecto indirecto de las temperaturas extremas sobre la fotosíntesis, causando una detención en la acumulación de azúcares (Coombe, 1987). Los valores del tenor en azúcares marcan la variabilidad interanual en la medida que reflejan las condiciones más o menos favorables a la fotosíntesis.

Por otra parte, la acidez total tuvo tendencia a disminuir, concordando con otros resultados que muestran que la concentración acídica disminuye como consecuencia de las altas temperaturas (Jackson y Lombard, 1993; Jones y Davies, 2000; Duchêne y Schneider, 2005). Este efecto se observa claramente en aquellos años con menor tenor en acidez, que corresponden, con excepción de 2002, al grupo de años más calurosos de la serie. Los valores de acidez más bajos (diferenciados por Tukey <0,05) fueron los años 1997, 2002, 2003 y 2009, con IH promedio de 2245 (sin considerar 2002), representando un clima del tipo *templado-cálido*, una temperatura máxima promedio en enero de 28,4 °C y 37 días con temperatura superior a 30 °C. La tendencia a la disminución en la acidez final de la uva está también relacionada indirectamente con un período de maduración más corto, debido a las condiciones de mayores temperaturas.

El aumento del pH encontrado en otros trabajos (Duchêne y Schneider, 2005; Jones y Davies, 2000) no pudo ser demostrado en nuestro estudio (datos no mostrados). Esto se puede explicar por el hecho de que el pH es uno de los principales parámetros de decisión de cosecha ($\text{pH} = 3,3 \pm 0,1$ en promedio para el período estudiado), y por lo tanto, medianamente constante cada año. En todo caso, el pH mostró, para el período estudiado, una tendencia a aumentar que no fue significativa ($R^2 = 0,546$).

Conclusión

Los índices bio-climáticos adaptados al cultivo de la vid muestran diferentes evoluciones para la serie de 1994 a 2009. El IH es el índice térmico que presenta mayor variabilidad, mostrando una evolución que modifica la clase climática, hacia una más cálida. El IF se mantiene en su clasificación de noches templadas. El IS es el índice que presenta mayor variabilidad interanual, lo que muestra las diferentes condiciones hídricas según los años, mediante clasificaciones que van desde años húmedos a años con sequía moderada.

El trabajo permite determinar la respuesta de la variedad Tannat a las condiciones climáticas en una serie de 16 años. En las condiciones del sur de Uruguay, la variedad Tannat presenta un adelantamiento de las fechas fenológicas. Sobre la composición de la uva en cosecha se observa una tendencia significativa de disminución de la acidez total. Estas respuestas del cultivo acompañan a las variaciones del clima, sobre todo en condiciones más cálidas y con grandes variaciones del estado hídrico, determinadas por IH e IS respectivamente.

El nuevo desafío radica en la gestión de los viñedos, mediante la modificación del micro-clima para mejorar las condiciones de maduración de la uva y la gestión de la vinificación, en función de un previsible cambio de tipicidad de la uva.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ing. Agr. Dr. Gustavo González-Neves por su participación en el trabajo. También se agradece a las empresas vitivinícolas que nos permiten trabajar, desde hace más de 18 años en sus viñedos: Establecimiento Juanicó (Gustavo Blumetto, Luis Púa y Néstor Merino), Bodega Pisano (Eduardo Pisano) y Bodega Pizzorno (Carlos Pizzorno). Los autores agradecen también a las instituciones que financiaron el trabajo: Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC, Universidad de la República) mediante el proyecto CSIC-VUSP M21 y Centre National de Recherche Scientifique (CNRS, Francia) mediante el proyecto ANR-JC 07194103 TERVICLIM.

Bibliografía

- Bergqvist J, Dokoozlian N, Ebisuda N. 2001. Sunlight exposure and temperature effects on berry growth and composition of Cabernet Sauvignon and Grenache in the Central San Joaquin Valley of California. *American Journal of Enology and Viticulture*, 52: 1-7.
- Bonnardot V, Carey V, Madelin M, Cautenet S, Coetzee Z, Quénoel H. 2012. Spatial variability of night temperatures at a fine scale over the Stellenbosch wine district, South Africa. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 46(1): 1-13.
- Carbonneau A. 2004. Climat du vignoble et raisonnement de l'irrigation et de la conduite. En: Actas Colloque Mondiaiviti. Bordeaux: IFV. pp. 109-126.
- Carbonneau A, Moueix A, Leclair N, Renoux J. 1991. Proposition d'une méthode de prélèvement de raisin à partir de l'analyse de l'hétérogénéité de maturation sur un cep. *Bulletin OIV*, 727: 679-690.
- Castellarin SD, Pfeiffer A, Sivilotti P, Degan M, Peterlunger E, Di Gasparo G. 2007. Transcriptional regulation of anthocyanin biosynthesis in ripening fruits of grapevine under seasonal water deficit. *Plant, Cell and Environment*, 30: 1381-1399.
- Chuine I, Yiou P, Viovy N, Seguin B, Daux V, Ladurie ELR. 2004. Historical phenology: Grape ripening as a past climate indicator. *Nature*, 432(7015): 289-290.
- Cohen SD, Tarara JM, Kennedy JA. 2008. Assessing the impact of temperature on grape phenolic metabolism. *Analytica Chimica Acta*, 621: 57-67.
- Coombe BG. 1987. Influence of temperature on composition and quality of grapes. *Acta Horticulturae*, 206: 23-36.
- Duchêne E, Schneider C. 2005. Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agronomy of Sustainable Development*, 25: 93-99.
- FAO. 2011. Fase 1: Adaptación a la variabilidad climática. Informe final: Proyecto TCP/URU/3302. Montevideo: SARAS. 125p.
- Ferrer M. 2007. Étude du climat des régions viticoles de l'Uruguay, des variations climatiques et de l'interaction apportée par le microclimat et l'écophysologie des systèmes de conduite Espalier et Lyre sur Merlot [Tesis de Doctorado]. Montpellier: Université de Montpellier II. 362p.
- Ferrer M, González-Neves G, Echeverría G, Camussi G, Avondet A, Fourment M, Favre G, Salvarrey J. 2011a. Efecto del estrés climático sobre la respuesta de la planta y la composición de la uva Tannat (*Vitis vinifera* L.) en viñedos del Uruguay. *Enología*, 7: 1-12.
- Ferrer M, González-Neves G, Echeverría G, Camussi G, Avondet R, Salvarrey J, Favre G, Fourment M. 2011b. Comportamiento agronómico y potencial enológico de la uva Tannat en tres regiones climáticas uruguayas. *Agrociencia*, 15(1): 37-49.
- Fourment M, Ferrer M, Quénoel H. 2011. La vid (*Vitis vinifera* L. cv. Tannat) como indicadora del cambio climático: el caso de Uruguay. En: III Congreso Internacional de Cambio climático y Desarrollo Sustentable; Agosto 2011; La Plata, Argentina. La Plata: Universidad Nacional de La Plata. pp. 417-429.
- Gepp V, Vero S, Cassanello ME, Romero G, Silvera E, González P, Rebellato J, Ferreira Y, Bentancur O. 2012. Resistencia a fungicidas en Botrytis cinerea en el Uruguay. *Agrociencia*, 16(1): 97-107.
- Giménez A, Lanfranco B. 2009. Vulnerabilidad al cambio climático de los sistemas de producción agrícola en América Latina y el Caribe: desarrollo de respuestas y estrategias: Propuesta de plan de acción para Uruguay. Montevideo: INIA. 109p.
- González-Neves G. 2005. Étude de la composition polyphénolique des raisins et de vins des cépages Merlot, Cabernet Sauvignon et Tannat provenant de vignes conduites en lyre et en espalier dans le sud de l'Uruguay [Tesis de Doctorado]. Montpellier: Université de Montpellier II. 279p.
- González-Neves G, Gil G, Barreiro L, Ferrer M, Franco J. 2006. Composición fenólica de las uvas de las principales variedades tintas de *Vitis vinifera* cultivadas en Uruguay. *Agrociencia*, 10(2): 1-14.
- Huglin P. 1978. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *Comptes Rendues de l'Académie d'Agriculture*, 1117-1126.
- Hunter JJ, Bonnardot V. 2011. Suitability of some climatic parameters for grapevine cultivation in South Africa, with focus on key physiological processes. *South African Journal for Enology and Viticulture*, 32: 137-154.
- INAVI. 2012. Estadísticas de los viñedos [En línea]. Consultado 15 abril 2013. Disponible en: <http://www.inavi.com.uy/categoria/38-estadisticas-de-via-edos.html>.
- Jackson DL, Lombard PB. 1993. Environmental management practices affecting grape composition and wine quality – a review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 44: 409 - 430.
- Jones GV, White MA, Cooper OR, Storchmann K. 2005. Climate change and global wine quality. *Climatic Change*, 73: 319-343.
- Jones GV, White MA, Cooper OR, Storchmann KH. 2004. Climate and wine: Quality issues in a warmer world [En línea]. En: Proceedings of the Vineyard

- Data Quantification Society's 10th O/Econometrics Meeting; mayo 2004; Dijon, France. Consultado 7 octubre 2013. Disponible en: http://www.sou.edu/envirostudies/gjones_docs/VDQS%20Climate%20Change.pdf.
- Jones GV, Davies RE.** 2000. Grapevine phenology, grape composition, and wine production and quality for Bordeaux, France. *American Journal of Enology and Viticulture*, 51: 249-261.
- Mira de Orduña R.** 2010. Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Research International*, 43: 1844 - 855.
- Molfino JH, Califra A.** 2004. Evaluación del drenaje natural de las tierras del Uruguay (Primera aproximación) [En línea]. Consultado 7 octubre 2013. Disponible en: http://www.cebra.com.uy/renare/wp-content/files_mf/1376398259Drenajenaturaljulio04.pdf.
- Neethling E, Barbeau G, Quénol H, Bonnefoy C.** 2011. Évolution du climat et de la composition de des raisins des principaux cépages cultivés dans le Val de Loire. *Climatologie*, 8: 79-92.
- O.I.V. 1990. Recueil des méthodes internationales d'analyse des vins et des moûts. Paris : Office International de la Vigne et du Vin. 368p.
- Ojeda H, Deloire A, Whang Z, Carbonneau A.** 2008. Determinación y control del estado hídrico de la vid. *Revista Enología*, 6: 1-16.
- Ojeda H, Deloire A, Carbonneau A.** 2001. Influence of water deficits on grape berry growth. *Vitis*, 40: 141-145.
- Petrie PR, Sadras VO.** 2008. Advancement of grapevine maturity in Australia between 1993 and 2006: putative causes, magnitude of trends and viticultural consequences. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 14: 33 - 45.
- Proffit E, Genevet B.** 2004. Botrytis : comment éviter les mauvaises surprises. *Wine Internet Technical Journal*, 8: 14-16.
- Riou C.** 1994. Le déterminisme climatique de la maturation du raisin : application au zonage de la teneur en sucre dans la communauté européenne. Luxemburgo : Office des Publications Officielles des Communautés Européennes. 319p.
- Scholander P, Hammel H, Branstreet E, Hammingsen E.** 1965. Sap pressure in vascular plant. *Sciences*, 148: 339 -346.
- Schultz HR.** 2000. Climate change and viticulture: European perspective climatology, carbon dioxide and UV-B effects. *Australian Journal of Grape And Wine Research*, 1: 8 -12.
- Seguin B, García de Cortázar I.** 2004. Climate warming: consequences for viticulture and the notion of terroirs. *Acta Horticulturae*, 689: 61-70.
- Shellie KC.** 2006. Vine and berry response of Merlot (*Vitis vinifera* L.) to differential water stress. *American Journal of Enology and Viticulture*, 57: 514-518.
- Tonietto J.** 1999. Les macroclimats viticoles mondiaux et l'influence du mésoclimat sur la typicité de la Syrah et du Muscat de Hambourg dans le sud de la France [Tesis de Doctorado]. Montpellier : ENSA. 233p.
- Tonietto J, Carbonneau A.** 2004. A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124: 81-97.
- Van Leeuwen C, Bois B, Cellie N, Tregouat O, Roby JP.** 2009. Les modifications de l'expression du terroir induits par le changements climatique necessitent une adaptation du materiell vegetal et des techniques viticoles. *Revue Française d'oenologie*, 235: 10 -14.
- Webb LB, Whetton PH, Barlow EWR.** 2008. Modelled impact of future climate change on the phenology of winegrapes in Australia. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 13: 165 -175.