

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS CLIMÁTICOS APLICADO A LA CLASIFICACIÓN DE ZONAS VITÍCOLAS EN URUGUAY

Rodolfo Pienika^a, José Cataldo^a

^a*Grupo de Eolodinámica, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República Oriental del Uruguay, J. H. y Reissig 565, 11200 Montevideo, Uruguay, rpienika@fing.edu.uy, <http://www.fing.edu.uy/imfia>*

Palabras Clave: zonificación vitícola, clima vitícola, brisa marina, análisis estadístico.

Resumen. En el presente artículo se muestran resultados de un análisis estadístico multivariado considerando datos de velocidad de viento, temperatura, y composición de las uvas, obtenidos en estaciones meteorológicas y predios de plantación de una determinada zona de Uruguay. El propósito del análisis es visualizar el efecto del fenómeno climático conocido como brisa marina sobre el clima en las zonas de plantación de uvas para producción de vinos. En efecto, en un estudio anterior en el que se delimitaron seis zonas vitícolas con características climáticas diferentes se detectó una zona en particular muy próxima a la costa SUR de Uruguay en la que la temperatura nocturna (uno de los parámetros climáticos más importantes respecto a la maduración de las uvas) presenta valores superiores a los del resto del territorio. En dicha zona se concentra la mayor plantación de uvas para producción de vinos de Uruguay.

1 INTRODUCCION

Las diversas especies de uva destinadas a la producción de vinos presentan comportamientos distintos en función de las características del clima de la zona en la cual se tienen plantaciones. Se han desarrollado clasificaciones climáticas de los territorios en los cuales se podrían producir uvas en base a valores de temperatura diurna y nocturna, así como niveles de humedad del suelo. Estas clasificaciones se realizan en función de índices que tienen en cuenta el nivel de la temperatura diurna, tanto por su valor medio como máximo, el nivel de temperatura nocturna, caracterizado a partir de la temperatura de las noches del mes previo a la cosecha, y las precipitaciones y evapotranspiración del suelo. En base a estos parámetros se definen el Índice Heliotérmico (IH), el Índice de Frescor Nocturno (IF) y el Índice de Sequía (IS) según las Ecs. 1, 2 y 3 respectivamente.

$$IH = \frac{1}{2} \sum [(T_{med} - 10) + (T_{max} - 10)] \quad (1)$$

$$IF = \text{Temperatura mín. entre el 15 de febrero y el 15 de marzo} \quad (2)$$

$$IS = W = W_0 + P - TV - ES \quad (3)$$

Donde T_{med} y T_{max} son las temperaturas medias y máximas de todos los días en el período en el que se calcula la suma, que se extiende entre el 1 de setiembre y el 28 de febrero; W es la estimación de reserva hídrica del suelo al momento de la cosecha; W_0 es la reserva hídrica inicial útil del suelo explorable por las raíces (suele tomarse 200mm); P es la precipitación acumulada; TV es la transpiración potencial del viñedo; y ES es la evapotranspiración directa a partir del suelo. Luego, se les adjudica un indicador entre 1 y 5, según el valor de cada índice.

Al aplicar la metodología de clasificación climática se observó que en Uruguay se distinguen seis regiones, caracterizada cada una por una terna de valores asociado cada uno a un índice (como puede verse en la Figura 1 adaptada de Ferrer et al., 2007). Entre estas regiones se distinguen dos, una ubicada al SUROESTE y otra al NORTE, en la cual los indicadores de nivel de frescor nocturno resultan mayores que en las demás.



Figura 1: Clasificación climática multicriterio – Índices adaptados y delimitación de las regiones climáticas vitícolas. Distribución de viñedos. (Adaptada de Ferrer et al., 2007)

Entre las posibles causas de la aparición de regiones con esas características climáticas se identifica la existencia de regímenes de viento diferentes. Asimismo, se distingue, que las mencionadas zonas presentan diferentes niveles de radiación solar diurna. La mayor diferencia entre los climas de vientos en las distintas zonas, puede ser atribuida a la presencia de la brisa marina en las zonas próximas a la costa marítima. Se han encontrado varias referencias bibliográficas sobre el efecto de la brisa marina en las viñas, pero las mismas corresponden a situaciones de topografía compleja, como la región SUROESTE de la costa de Sudáfrica (Bonnardot et al., 2005; Carey et al., 2008).

La brisa marina (ver Figura 2) es un evento que tiene una duración de entre varios minutos a algunas horas y está presente dos veces al día en sentido contrario. Abbs y Physick (1992) llevan a cabo una revisión detallada de las referencias bibliográficas sobre este fenómeno. Durante el día el suelo se calienta a una temperatura mayor que la alcanzada por la masa de agua contigua y por lo tanto el aire cercano al suelo se eleva, succionando aire frío del mar, lo que provoca una circulación de aire desde el mar hacia el continente (este es el fenómeno conocido como brisa marina). En la noche el suelo se enfría a una temperatura menor que la alcanzada por la masa de agua y por lo tanto el aire sobre el mar (más cálido) se eleva y succiona aire más frío proveniente del suelo, provocando una circulación de aire desde el continente hacia el mar (a éste fenómeno se le llama brisa terrestre). Esta circulación de aire puede extenderse varios kilómetros hacia el seno del continente. Este patrón, así como otros patrones del clima de viento, puede caracterizarse mediante un análisis de componentes principales.

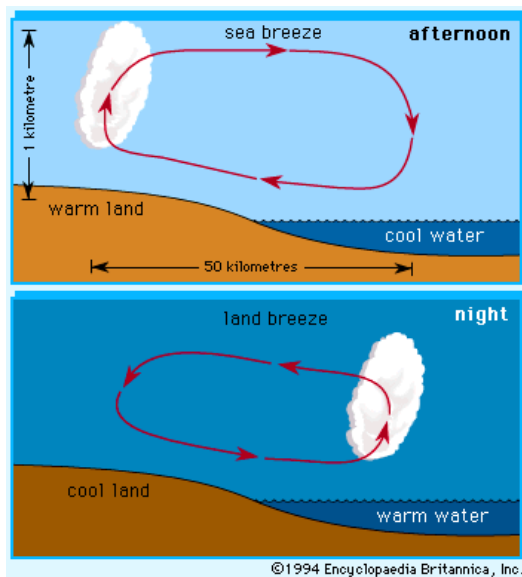


Figura 2: Descripción física del fenómeno brisa marina.

Para identificar los patrones del clima de vientos, se realiza un análisis en componentes principales con series de velocidad de viento obtenidas de estaciones meteorológicas de la red de UTE (Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas) ubicadas próximas a la costa SUR de Uruguay. Se muestra en la [Figura 3](#) la ubicación de dichas estaciones.

Luego, a los efectos de evaluar la acción de la brisa marina sobre la temperatura nocturna y por ende sobre el valor de IF, se lleva a cabo un modelo de regresión entre valores de temperatura y valores de velocidad de viento. Se utilizan sólo los datos correspondientes a los meses de febrero y marzo, y dentro de estos sólo los datos de las horas nocturnas.

Todo el análisis fue llevado a cabo usando el programa *R* de estadística computacional, el cual es de código abierto y cuyo origen se basa en el lenguaje *S*, desarrollado por John Chambers y colegas en Laboratorios Bell ([Everitt y Hothorn, 2010](#)).

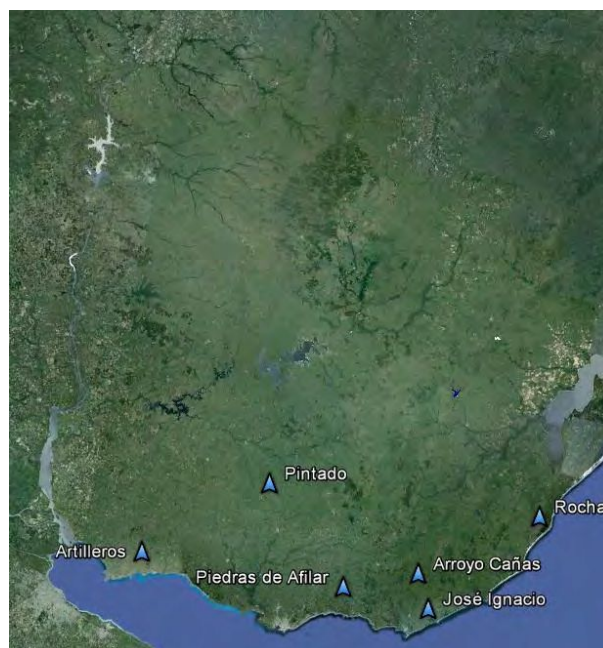


Figura 3: Ubicación de estaciones de medición

2 ANÁLISIS EN COMPONENTES PRINCIPALES

Para el presente análisis se convierte cada serie de velocidad-dirección a cierta altura en una serie que contenga las componentes Oeste-Este y Sur-Norte de la velocidad horizontal. Estas series son las que forman la matriz de observación, que tiene 20 filas (4 por cada estación, 2 por cada posición del anemómetro) y la cantidad de columnas es la cantidad de datos simultáneos de las estaciones, y cada columna es un vector de observación correspondiente a un instante de tiempo. Antes del análisis se centran los datos, restándole a cada uno el valor medio correspondiente a la fila donde está ubicado dicho dato.

Se construye la matriz de correlación multiplicando la matriz de observación por su transpuesta, y se calculan los valores y vectores propios de la matriz resultante. Cada vector propio representa 10 vectores (dos para cada estación) que identifica un patrón principal del clima de viento. En este análisis los vectores o patrones propios representan vectores de velocidad de viento. El valor propio asociado a cada vector propio representa la relevancia del patrón correspondiente en la correlación, y por lo tanto, brinda una idea de cuán relevante resulta este vector en la determinación de la velocidad de viento en cualquiera de las estaciones consideradas.

En cualquier instante de tiempo τ , se podría reconstruir el vector de observaciones en ese instante a partir de los vectores propios hallados y de coeficientes apropiados, según la Ec. 4.

$$X(\tau) = a_1(\tau) \cdot V_{P1} + a_2(\tau) \cdot V_{P2} + \dots + a_{12}(\tau) \cdot V_{P12} \quad (4)$$

Los primeros dos vectores propios (o patrones principales) serán los que tendrán asociados los mayores valores propios, por lo que un vector de observación en cualquier instante se podría aproximar con bastante precisión con los primeros dos términos de la ecuación anterior. Por otro lado, los dos primeros patrones principales corresponden a eventos de macro-escala que afectan a una gran parte del territorio en forma simultánea que suelen tener duraciones de algunos días o semanas. A los efectos de probar tal cosa si se analiza la evolución temporal de los coeficientes a_1 y a_2 se encontraría que presentan períodos de algunos días. Este último resultado se puede visualizar si se construye el espectro de potencia en función de la frecuencia, para los coeficientes a_j .

En la Figura 4, se muestran las direcciones de los primeros 4 patrones principales en cada estación de medición (que representan vectores de velocidad de viento), para datos de los meses febrero y marzo del período analizado (2009-2012).

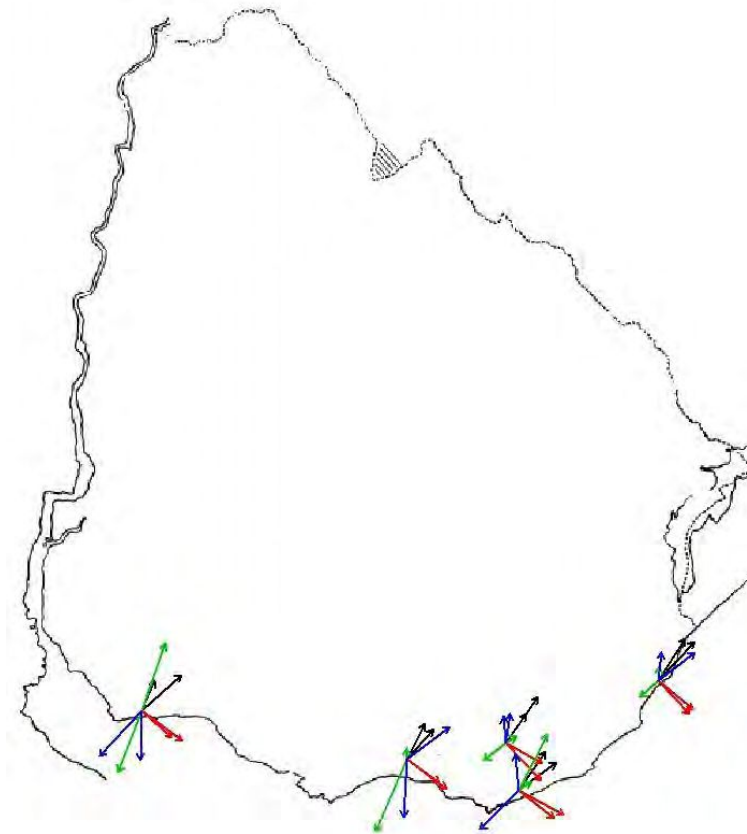


Figura 4: Cuatro primeros patrones principales en las 5 estaciones de medición, para datos de febrero y marzo.

Los primeros dos patrones principales explican el 45.3% y 33.6% de la varianza.

Si bien una de las características que debiera presentar el vector correspondiente al patrón climático brisa marina es el de presentar una dirección perpendicular a la costa, esto suele ser difícil de visualizar, dado el ruido introducido por los demás patrones climáticos. Para poder dilucidar cuál patrón es la brisa marina, se analiza la evolución temporal de los coeficientes α_j . Aquel coeficiente que presente picos de potencia a frecuencias correspondientes a 12^{-1} horas⁻¹ y/o 24^{-1} horas⁻¹ se identifica como la brisa marina.

En la [Figura 5](#) se presentan los espectros de los coeficientes α_j correspondientes a los cuatro primeros patrones principales.

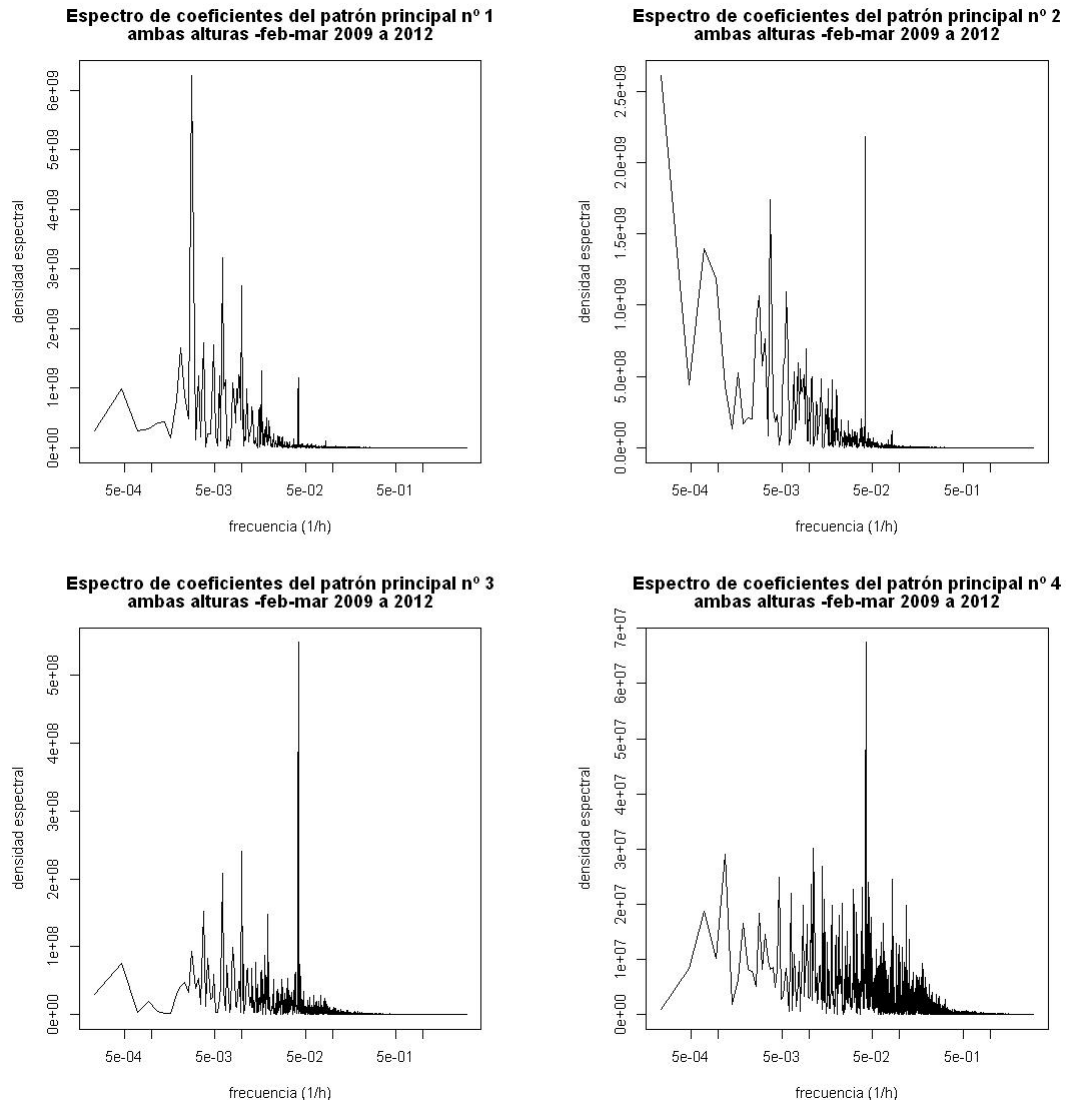


Figura 5: Espectro de coeficientes de patrones principales para datos de febrero y marzo.

Un pico en el entorno de $3 \times 10^{-3} \text{ horas}^{-1}$ ($14^{-1} \text{ días}^{-1}$) se puede apreciar en las primeras dos gráficas. En los cuatro espectros, se puede ver claramente un pico en $24^{-1} \text{ horas}^{-1}$, aunque el mismo presenta mayor potencia relativa en el espectro del tercer patrón. Este patrón sería el asociado a la brisa marina. A partir de los coeficientes del cuarto patrón, la energía se concentra en frecuencias mayores que corresponden a períodos de algunas horas o pocos días, pero la magnitud de la energía es mucho menor que para los primeros patrones.

Por último se presenta el mismo análisis anterior, considerando únicamente datos de las noches de febrero y marzo del mismo período anterior. En éste se utilizaron los datos obtenidos en la menor altura de cada estación, pues se observó que el agregado de la medición a mayor altura no resultaba significativo para el análisis que se realiza. En la [Figura 6](#) se presentan las direcciones del tercer patrón principal en las estaciones de medición. Se recuerda que el significado de dichas direcciones es el de las direcciones del vector velocidad de viento que más está asociado al patrón principal correspondiente. No se aprecia diferencias

significativas en los vectores principales obtenidos del presente análisis respecto a los obtenidos utilizando mayor cantidad de datos.

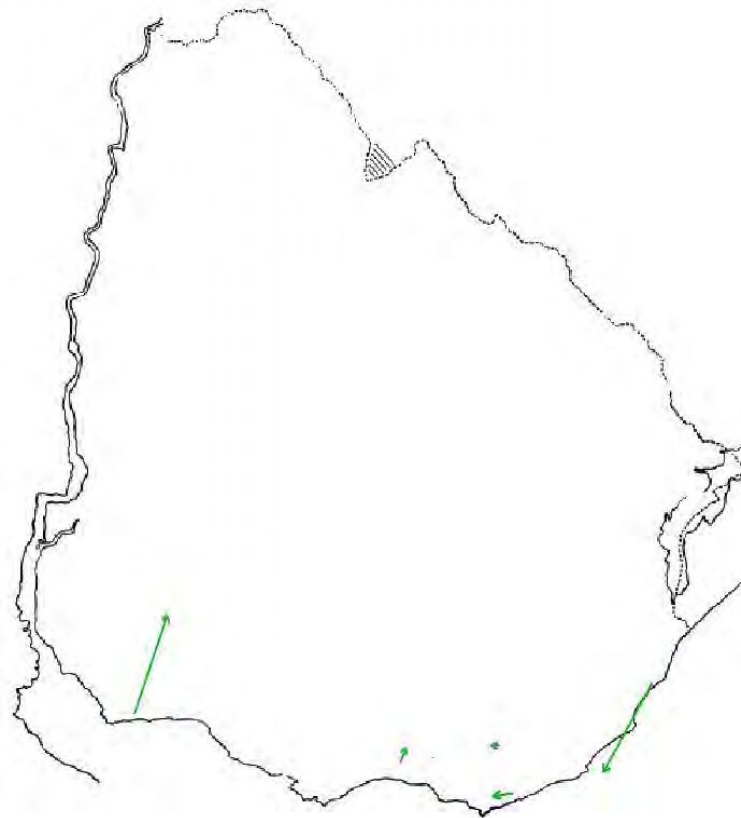


Figura 6: Tercer patrón principal en las 5 estaciones de medición, para datos nocturnos de febrero y marzo.

Es de destacar la diferencia relativa en los módulos de los vectores de Artilleros y Rocha con el resto de las estaciones.

3 INDICE DE FRESCOR NOCTURNO

Se calculó para varios sitios del país, valores del índice IF utilizando distintas fuentes de datos. Por un lado, se realizó el cálculo con datos diarios de temperatura obtenidos en cuatro estaciones del INIA-Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Las Brujas, La Estanzuela, Treinta y Tres, y Salto) para el período 1973-2012. Por otro lado, se utilizaron datos de temperatura cada 10 minutos de las mismas estaciones de la red de UTE que se muestran en la [Figura 3](#), para el período 2010-2012. En cada sitio y para cada fuente de datos se calculó el índice IF a partir de los promedios de todos los años. Además se cuenta con los valores hallados por [Ferrer et al., 2007](#) que se muestran en la [Figura 1](#). Al momento de comparar los tres resultados, se debe tener en cuenta que fueron obtenidos en distintos períodos de tiempo y en distintas estaciones. En la [Figura 7](#) se muestra en la ubicación geográfica de cada estación, el resultado del cálculo mencionado para las estaciones de UTE y de INIA.

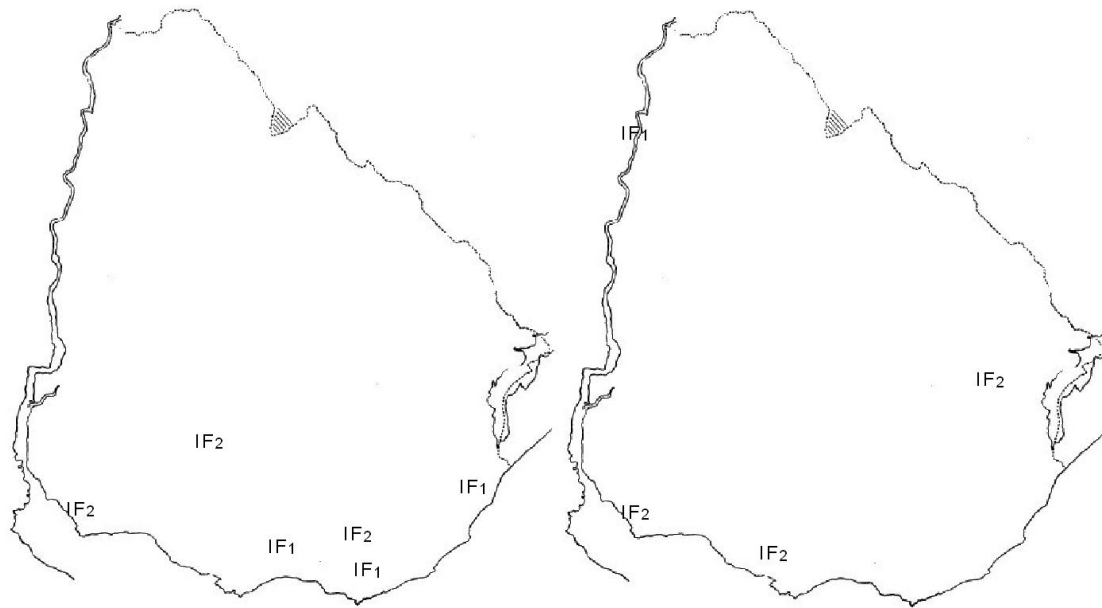


Figura 7: Valores del IF para las estaciones de medición de UTE (izq.) e INIA (der).

Los sitios con IF de 1 y 2 corresponden a valores medios de temperaturas mínimas (entre el 15 de febrero y el 15 de marzo), mayores a 18°C y entre 14°C y 18°C, respectivamente. Vale la pena destacar la variabilidad interanual de éste índice que se puede apreciar en la [Figura 8](#) y [Figura 9](#), donde se muestra la evolución del valor de temperatura usado para el cálculo del índice para las estaciones de UTE y de INIA respectivamente.

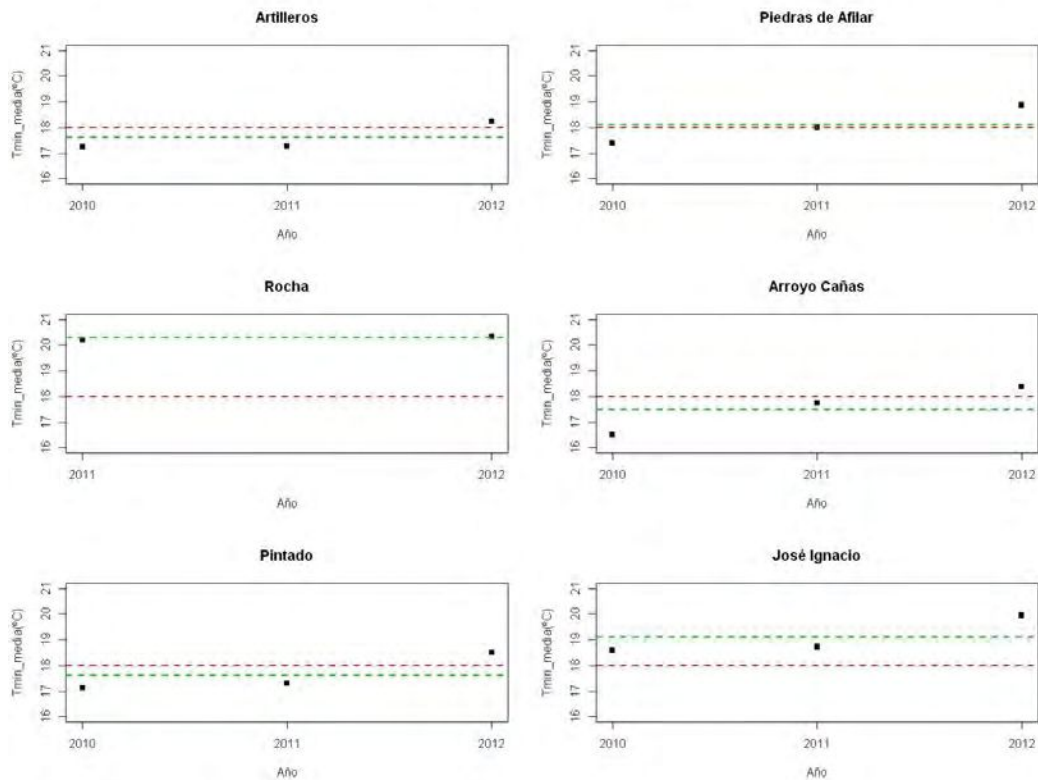


Figura 8: Evolución anual del IF para estaciones de UTE. La línea roja indica el valor de 18°C, mientras que la verde indica el promedio de las temperaturas medias mínimas en el periodo.

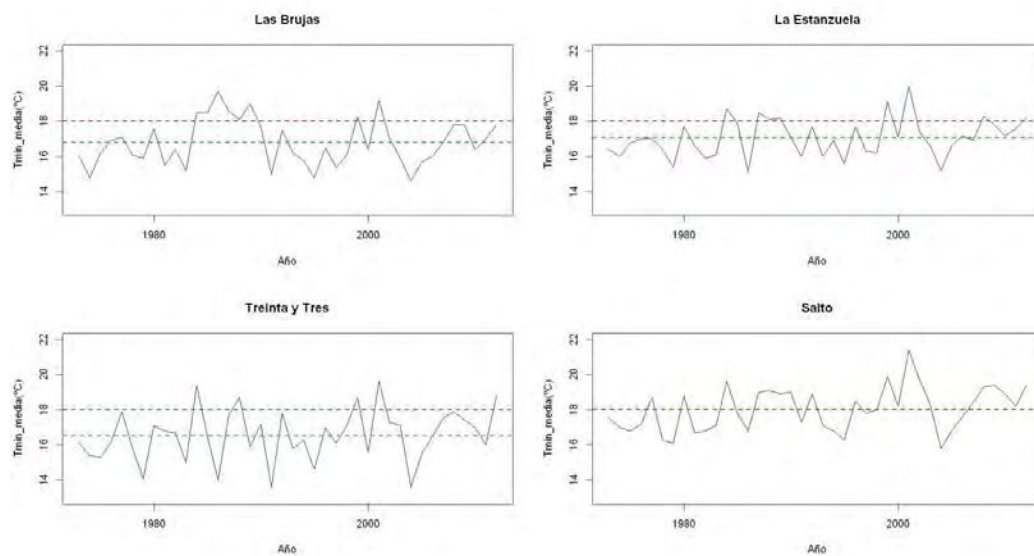


Figura 9: Evolución anual del IF para estaciones de INIA. La línea roja indica el valor de 18°C, mientras que la verde indica el promedio de las temperaturas medias mínimas en el período.

Cabe destacar también la reducida diferencia, en términos absolutos, entre los valores de temperatura que distingue cada región.

4 ANÁLISIS DE REGRESIÓN

4.1 Correlación entre brisa terrestre e índice IF

Para el cálculo del índice de Frescor Nocturno se toma la menor temperatura entre el 15 de febrero y el 15 de marzo, y por lo tanto interesa obtener la relación entre las temperaturas y la brisa marina en este período. Se plantea un modelo de regresión lineal múltiple en el que la variable de salida es la temperatura en cada estación de medición y las variables de entrada son las componentes del vector velocidad de viento en el mismo sitio. Todas las variables incluidas en el modelo comprenden datos entre el 15 de febrero y el 15 de marzo.

Como el índice IF está relacionado con las temperaturas mínimas que se dan por las noches, se utilizan sólo datos de horas entre las 23:00 y las 4:00. Asimismo, la brisa terrestre en las horas nocturnas actúa como un flujo de viento desde la tierra hacia el mar, por lo que se filtrarán los datos de modo de que permanezcan en el análisis eventos con dichas direcciones. Adicionalmente se propone quitar los datos de velocidad menor a 0.5 m/s, ya que los mismos corresponden a situaciones de calma.

Se apreció en la mayoría de los casos una tendencia lineal para temperaturas mayores a 18°C, por lo que se muestran las curvas de correlación considerando sólo datos correspondientes a temperaturas mayores a 18°C. En las [Figura 10](#) a [Figura 15](#), se presentan gráficas con la temperatura en ordenadas y la componente de velocidad perpendicular a la costa en abscisas, para la población antes definida, para seis estaciones meteorológicas de la red de UTE. Se incluyó en este análisis la estación Pintado que no se encuentra cerca de la costa, para observar las diferencias esperadas.

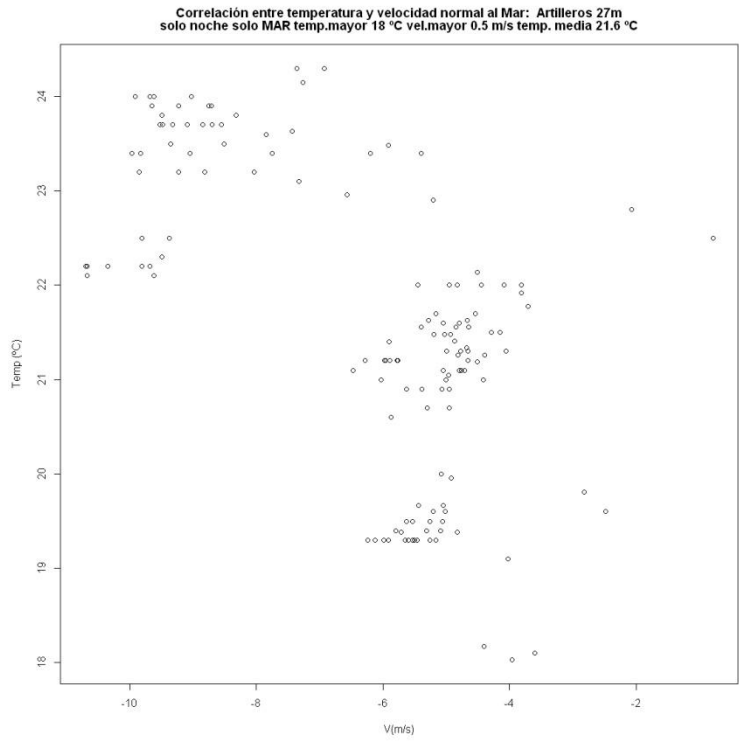


Figura 10: Curvas de correlación entre temperatura y velocidad perpendicular a la costa, para Artilleros a 27m.

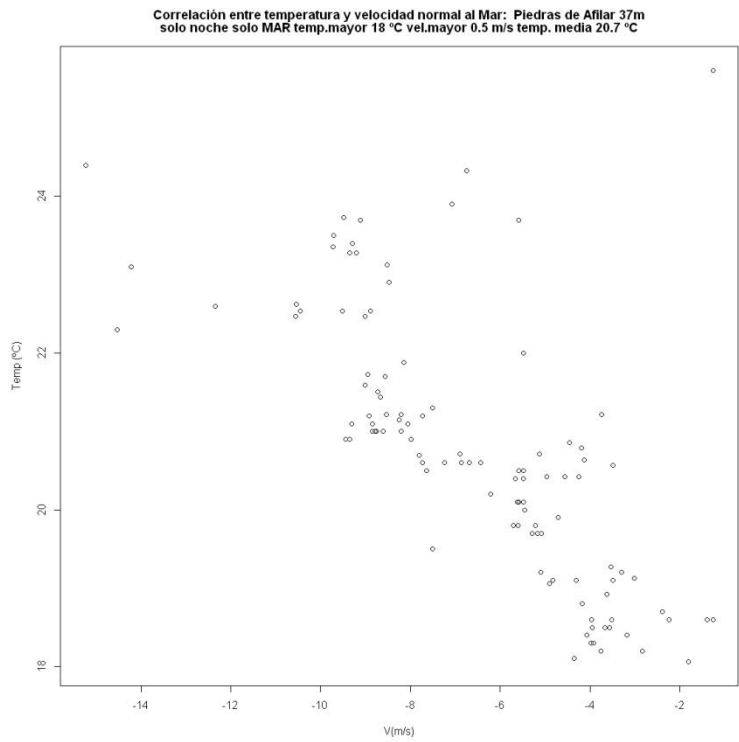


Figura 11: Curvas de correlación entre temperatura y velocidad perpendicular a la costa, para Piedras de Afilar a 37m.

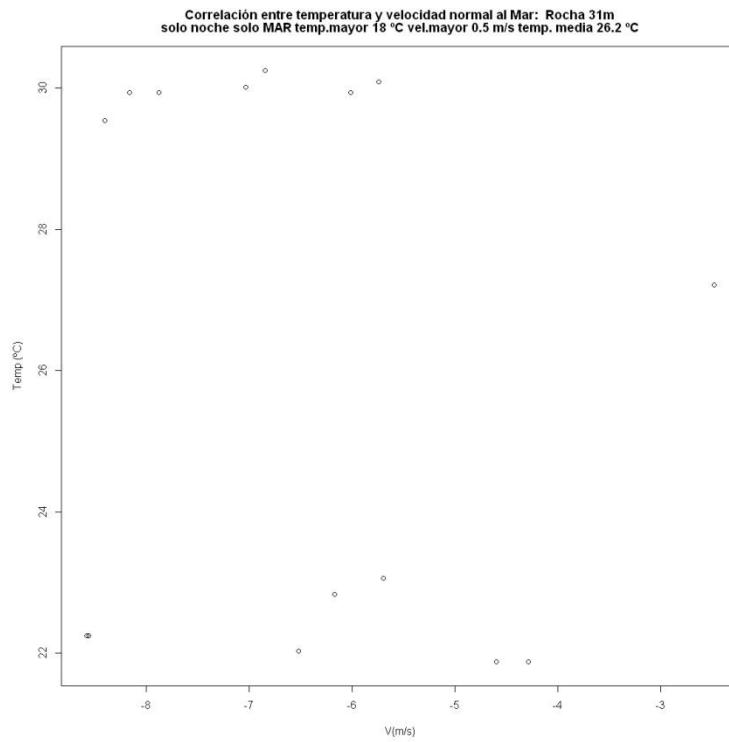


Figura 12: Curvas de correlación entre temperatura y velocidad perpendicular a la costa, para Rocha a 31m.

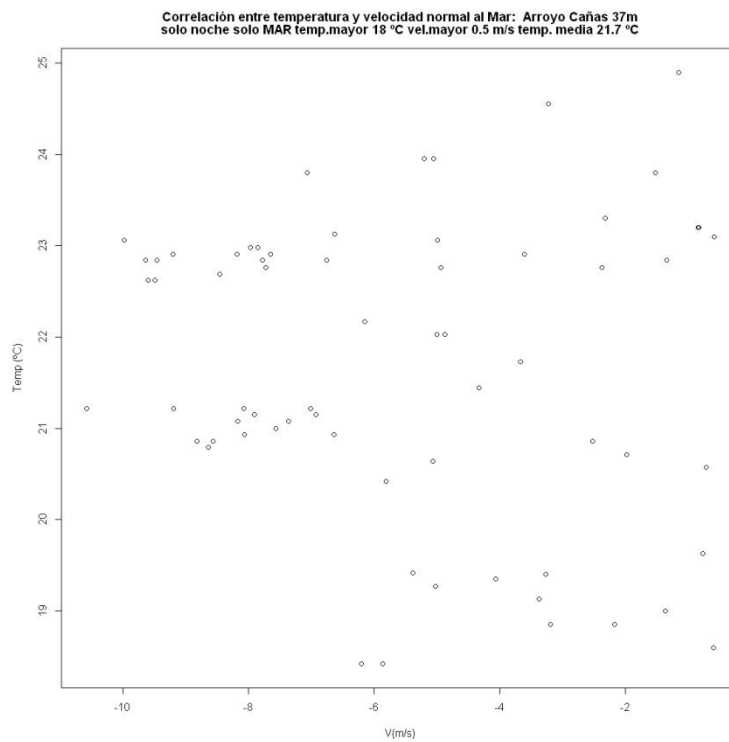


Figura 13: Curvas de correlación entre temperatura y velocidad perpendicular a la costa, para Arroyo Cañas a 37m.

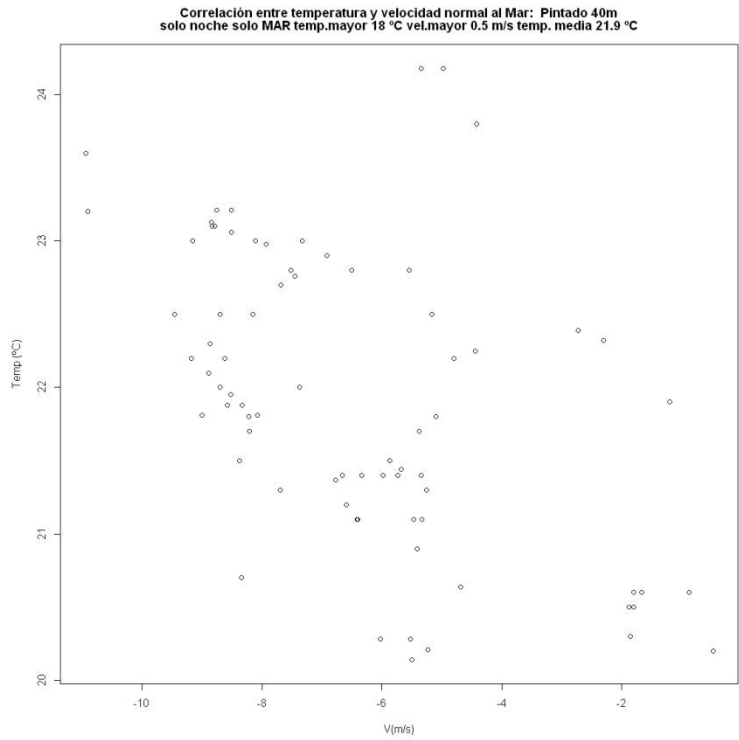


Figura 14: Curvas de correlación entre temperatura y velocidad perpendicular a la costa, para Pintado a 40m.

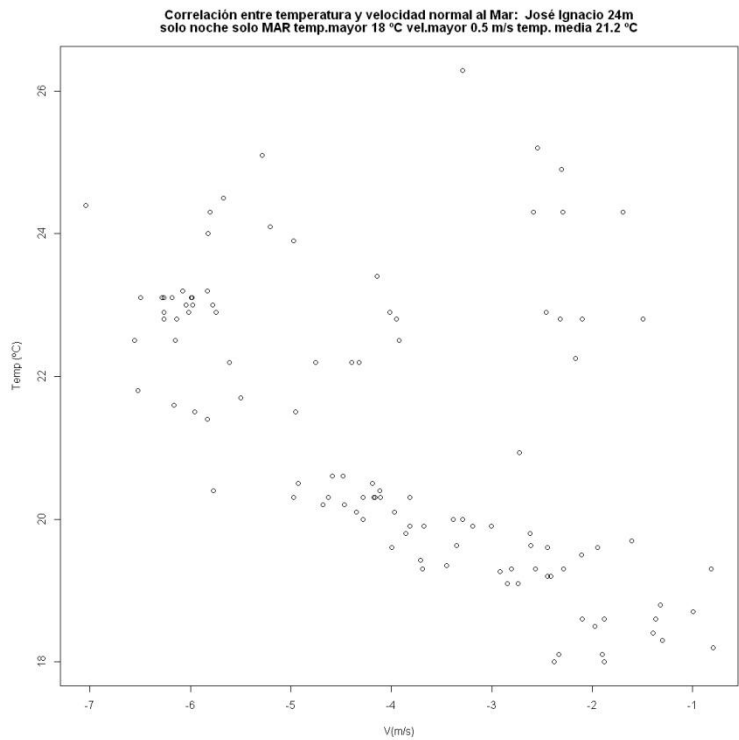


Figura 15: Curvas de correlación entre temperatura y velocidad perpendicular a la costa, para José Ignacio a 24m.

Para cada estación se plantea un modelo de regresión lineal, obteniéndose los valores de R^2 (cuadrado del coeficiente de correlación) que se muestran en la [Tabla 1](#).

Estación	R ²
Artilleros 27m	0.383
Piedras de Afilar 37m	0.495
Rocha 31m	0.033
Arroyo Cañas 37m	0.15
Pintado 40m	0.253
José Ignacio 24m	0.303

Tabla 1: Valores de R² para los modelos de regresión lineal

Por otro lado se observó que el residuo estandarizado de los modelos de regresión planteados, presenta para todos los casos un comportamiento aleatorio cuando se grafica contra las variables de entrada de los modelos (componentes del vector velocidad), lo que justifica el modelo propuesto (regresión lineal).

En Arroyo Cañas y en Rocha, se aprecia una falta de correlación entre la velocidad y la temperatura, mientras que en Artilleros y en Piedras de Afilar es donde se obtuvo la mayor correlación entre ambos parámetros.

4.2 Correlación entre índice IF y composición de las uvas

Se obtuvieron datos de composición de la uva en distintos predios de producción, para distintos años. Se asoció un valor de IF correspondiente a la estación meteorológica (de INIA o de UTE) más cercana a la ubicación del predio. En todos los casos, se trata de la variedad Tannat con sistema de conducción espaldera, y los datos fueron proporcionados por el enólogo de las empresas vitícolas.

La mayoría de los predios pueden considerarse cercanos a la ubicación de la estación de Las Brujas del INIA, como se puede apreciar en la [Figura 16](#).

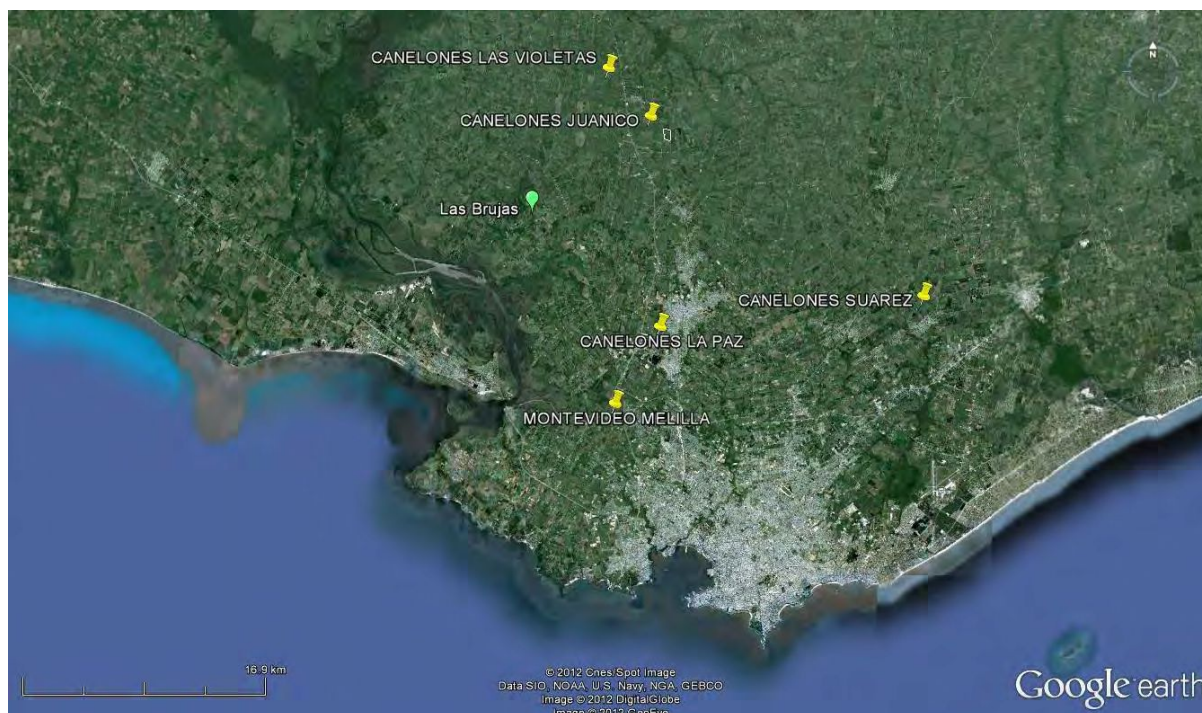


Figura 16: Ubicación de predios cercanos a Las Brujas

Los parámetros ApH1 y ApH3.2 (extracción parcial por maceración de las uvas trituradas

en solución de pH=1 y pH=3.2, indicadores del contenido de antocianinas que influyen en el grado de coloración de las uvas) sería el que presenta mayor correlación con las temperaturas nocturnas y por ende con el índice IF (Echeverría, comunicación personal; [González-Neves et al., 2010](#); [Hunter y Bonnardot, 2011](#)). En la [Figura 17](#) se presentan datos de proporción de ApH3.2 junto a valores del índice IF para predios cercanos a Las Brujas y en la [Figura 18](#) se presenta lo mismo para José Ignacio.

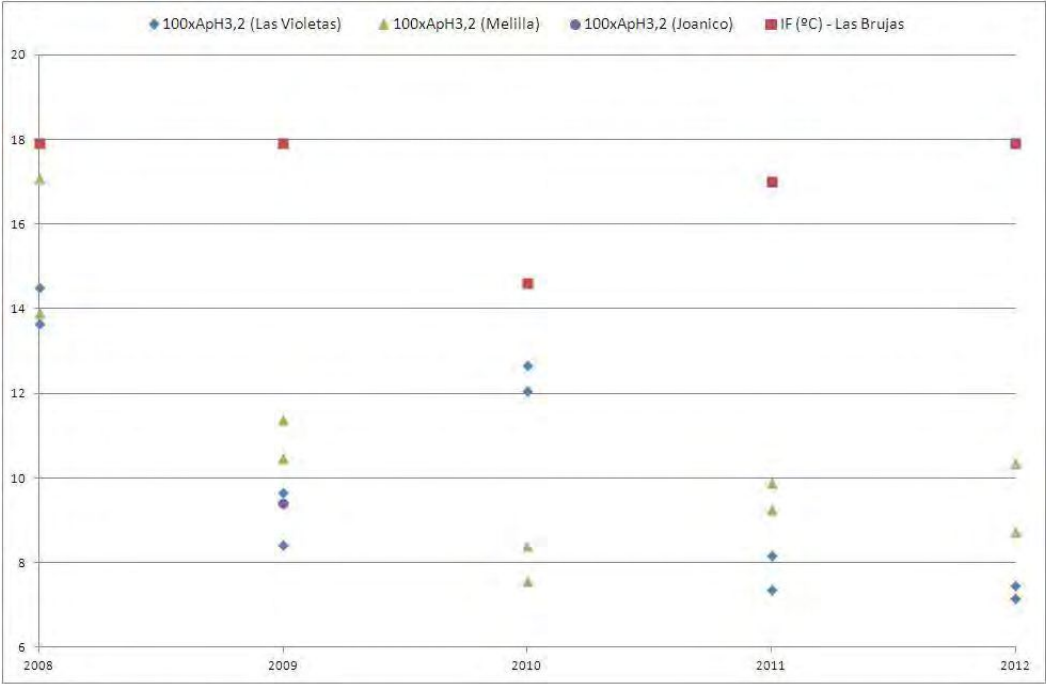


Figura 17: Evolución de ApH3.2 contra IF en zona de Las Brujas.

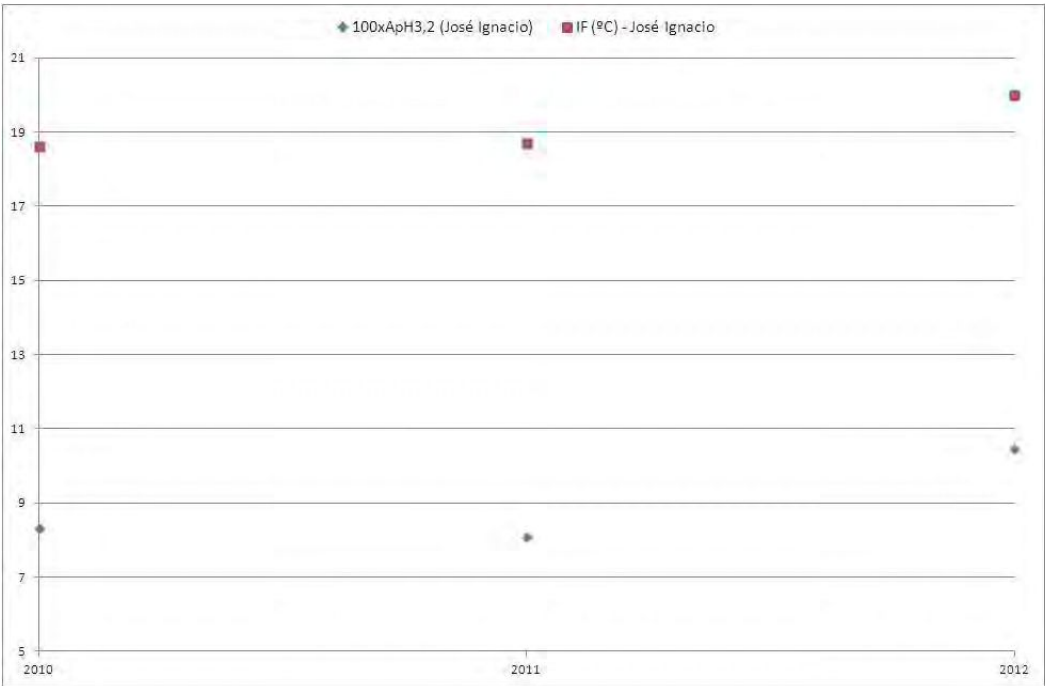


Figura 18: Evolución de ApH3.2 contra IF en José Ignacio.

Los datos de los predios de Melilla acompañan la tendencia mostrada por el índice IF en Las Brujas, al igual que lo que sucede con los datos de José Ignacio, mientras que sucede prácticamente lo opuesto para los datos de Las Violetas.

La poca cantidad de datos, junto con la incertidumbre asociada al hecho de que los datos de composición son obtenidos de forma independiente por cada empresa, hacen necesaria la realización de campañas de medición específicas.

5 CONCLUSIONES

Se detectó la presencia del fenómeno climático conocido como brisa marina, en las distintas estaciones de medición consideradas.

Se analizaron los valores del índice de frescor nocturno (IF) y su evolución interanual para distintas zonas del país. Se observa poca diferencia en los valores medios de temperaturas mínimas entre años, que sin embargo afectan el valor del índice IF por estar muy próximas al valor que divide las primeras dos franjas.

Se propuso un modelo de regresión lineal entre la temperatura de eventos de velocidad de viento perpendiculares y hacia la costa, y las componentes de velocidad perpendicular y paralela a la costa en cada sitio. Se consideraron sólo datos de las noches entre el 15 de febrero y el 15 de marzo de cada año. Se aprecia una marcada tendencia creciente en la temperatura cuando aumenta la componente del viento perpendicular a la costa y en dirección tierra-mar. En otras palabras, cuando ocurre la brisa terrestre con fuerte intensidad, se da un aumento en la temperatura. Esta tendencia presenta una relación más lineal (mayor valor de R^2) para los sitios más próximos a la costa OESTE del país (Artilleros y Piedras de Afilar).

Se comparó la evolución del índice IF con la evolución de datos de composición de las uvas determinantes para la maduración, encontrándose en la mayoría de los casos un acompañamiento en la tendencia.

6 REFERENCIAS

- Abbs, D., Physick, W., Sea-breeze observations and modelling: a review. *Aust. Met. Mag.* 41:7–19, 1992.
- Bonnardot, V., Planchon, O. y Cautenet, S., Sea breeze development under an offshore synoptic wind in the South-Western Cape and implications for the Stellenbosch wine-producing area. *Theor. Appl. Climatol.*, 81:203–218, 2005.
- Carey, V., Saayman, D., Archer, E., Barbeau, G. y Wallace, M., Viticultural terroirs in Stellenbosch, South Africa. I. The identification of natural terroir units. *J. Int. Sci. Vigne Vin*, vol.42 n° 4:169–183, 2008.
- Everitt, B., y Hothorn, T., *A Handbook of Statistical Analyses Using R*. Taylor and Francis Group, pp 361, 2010.
- Ferrer, M., Pedocchi, R., Michelazzo, M., González Neves y G., Carbonneau, A., Delimitación y descripción de regiones vitícolas del Uruguay en base al método de clasificación climática multicriterio utilizando índices bioclimáticos adaptados a las condiciones del cultivo. *Agrociencia Uruguay*, 11(1):47–56, 2007.
- González-Neves, G., Ferrer, M., Gil, G., Charamelo, D., Balado, J., Barreiro, L., Bochicchio, R., Gatto, G., Tessore, A., Estudio plurianual del potencial polifenólico de uvas Tannat en el sur de Uruguay. *Agrociencia Uruguay* 14(2):10–21, 2010.
- Hunter, J., Bonnardot, V., Suitability of Some Climatic Parameters for Grapevine Cultivation in South Africa, with Focus on Key Physiological Processes. *S. Afr. J. Enol. Vitic.* 32(1)137–154, 2011.