

THESE / UNIVERSITÉ DE RENNES 2
sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne

pour obtenir le titre de
DOCTEURE DE L'UNIVERSITÉ EUROPÉENNE DE BRETAGNE

Mention : Géographie
Ecole doctorale des Sciences Humaines et Sociales

présentée par
Mercedes FOURMENT

Préparée à l'UMR6554
LETG-RENNES (Université de Rennes 2) et la Faculté d'Agronomie (Universidad de la República) à Montevideo – Uruguay

Adaptation de la vigne (*Vitis vinifera* L.) à la variabilité de la température à méso-échelle en Uruguay

Thèse soutenue le 20 juillet 2016 devant le jury composé de :

Santiago DOLGIOTTI
Professeur des Universités - Université de la République, Montevideo / *président*

Sylvain BIGOT
Professeur des Universités - Université de Grenoble 1/ *rapporteur*

Vicente SOTES
Professeur des Universités - Université Polytechnique de Madrid / *rapporteur*

Valérie BONNARDOT
Maitre de Conférences - Université Rennes 2 Haute Bretagne / *rapporteur*

Milka FERRER
Professeure des Universités – Université de la République, Montevideo / Co-directrice de thèse

Hervé QUENOL
Directeur de Recherche CNRS – UMR 6554 LETG-RENNES / Directeur de thèse

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

SOUS LE SCEAU DE L'UNIVERSITÉ EUROPEENNE DE BRETAGNE

UNIVERSITÉ RENNES 2 – UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

Ecole Doctorale Sciences Humaines et Sociales Unité de Recherche 6554 LETG-RENNES-COSTEL et la Faculté d'Agronomie (Universidad de la República) à Montevideo – Uruguay.

Adaptation de la vigne (*Vitis vinifera* L.) à la variabilité de la température à méso-échelle en Uruguay

Adaptación de la vid (*Vitis vinifera* L.) a la variabilidad de la temperatura a meso-escala en Uruguay

Thèse de Doctorat

Discipline : Géographie

Présentée par Mercedes FOURMENT

Directeurs de thèse : Hervé QUÉNOL et Milka FERRER

Soutenue le 20 juillet 2016

Jury :

M. Santiago DOLGIOTTI, Professeur des Universités, Universidad de la República, Uruguay (Président)
M. Vicente SOTÉS, Professeur des Universités, Universidad Plotécnica de Madrid, España (Rapporteur)
M. Sylvain BIGOT, Professeur des Universités - Université de Grenoble 1, France (Rapporteur)
Mme. Valérie BONNARDOT, Maitre de Conférences, Université Rennes 2, France (Examinateur)
Mme. Milka FERRER Professeure des Universités, Universidad de la República, Uruguay (Co-directrice de thèse)
M. Hervé QUÉNOL, Directeur de Recherche CNRS, UMR 6554 LETG-RENNES, France (Directeur de thèse)

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

REMERCIEMENTS

Ce doctorat a été réalisé en co-tutelle entre la *Facultad de Agronomía* (*Universidad de la República*, Uruguay) et l'Université Rennes 2, et donc j'ai eu la chance d'être parmi une équipe multiculturelle et interdisciplinaire. Pendant ces cinq ans (oui, cinq ans), j'ai été accompagné par plusieurs personnes qui de plus ou moins loin, font partie de ce fruit qui a finalement mûri et je tiens à les remercier.

Tous mes remerciements vont à mes directeurs de thèse Hervé Quénol et Milka Ferrer, pour leur soutien et leur patience durant toutes ces années. Merci Hervé pour m'avoir permis de travailler sur le projet Terviclim, pour m'avoir toujours ouvert les portes de ton Laboratoire à Rennes et m'avoir encouragé pendant tout mon travail. Je remercie Milka pour m'avoir "embarquée" dans cette aventure et merci pour ton enthousiasme et ta disponibilité.

Je tiens à remercier le comité de thèse de mon doctorat, avec lequel j'ai eu l'honneur d'être accompagné : Gustavo González-Néves, Gérard Barbeau et Valérie Bonnardot. Merci Gustavo pour m'avoir permis de travailler dans la cave de la Facultad et pour m'avoir apporté toujours une discussion précieuse sur mon travail. Un merci spécial à Gérard de t'être toujours impliqué dans ma thèse, de m'avoir fait partagé ta passion pour la viticulture et de m'avoir accueilli à Angers avec un sourire. Fue grandioso compartir esos momentos contigo. Je tiens à remercier Valérie. Je suis chanceuse d'avoir pu partager ces années avec toi. Merci encore pour ton soutien, tes conseils, la confiance et ton savoir sur la brise que tu as toujours accepté de partager.

Je remercie également les membres du jury Santiago Dogliotti, Vicente Sotés, Sylvain Bigot et Valérie Bonnardot pour leurs commentaires, les corrections et les suggestions si précieuces.

Ce doctorat à été réalisé avec le soutien des bourses CAP-Udelar (*Comité Académico de Posgrados de la Universidad de la República*) pendant deux ans et l'ANII (*Agencia Nacional de Ivestigación e Innovación*, Uruguay) durant un an. La CSIC-Udelar (*Comisión Sectorial de Investigación Científica de la Universidad de la República*) a financié chaque stage en France, ainsi que les soutiens de Campus-France de l'Ambassade de France en Uruguay, l'Université Rennes 2 et Rennes Métropole. Merci beaucoup à Fréderique Améglio et Maei Castillon de l'Ambassade de France en Uruguay ; Roselyne Billy, Suzanne Piel, Joëlle Bisson et Valérie Priol à l'Université Rennes 2.

Je tiens à remercier vivement les viticulteurs qui ont fait réussir ce projet avec leur inestimable aide et engagement. Merci à Luis Púa et Gustavo Blumetto *d'Establecimiento Juanicó*, Fernando Scalabrini et Eduardo Boido de *Bodega Bouza,* Pablo Rodríguez de *Bodega La Estancia*, Carlos Pizzorno de *Bodega*

Pizzorno et Eduardo Pisano de *Bodega Pisano*. Merci aux ingénieurs agronomes qui ont participé aux enquêtes, en donnant une grande partie de leur temps : Eduardo Félix, Reinaldo Delucca, Jorge Fernández, Enrique Mirazzo. Je remercie spécialement Néstor Merino qui m'a soutenu depuis le debut de la thèse et a enrichi mon travail avec son expérience.

Je remercie à l'équipe de Vituculture de la *Facultad de Agronomía*, essentiel support pour ma thèse. À mes amis de vendanges : Julia, Rusley et Guzmán, ainsi que mes collègues du laboratoire et terrain : Gustavo, Gustavo, Yesica, Bárbara, Mario, Esteban, Pablo, Nicolás. Un merci aussi à Gianfranca et à Gerardo.

Je tiens à remercier l'équipe du *CRCVC-EI-Udelar* (*Centro de Respuesta al Cambio y Variabilidad Climática del Espacio Interdisciplinario*) : Valentín, Laura, Gabriela, Rafael, Carolina, Fernanda, Martín, Mauricio, Laura C, Gonzalo. Cet espace m'a permis de discuter de mes résultats dans le cadre un projet FAO et des séminaires du Centre, ce qui a contribué à l'analyse interdisciplinaire.
De l'*Universidad de la República* en Uruguay, je remercie spécialement Madeleine Renom (*Facultad de Ciencias*) qui a toujours été intéressée par mon travail et m'a aidée pour des questions ponctuelles en climatologie. De la *Facultad de Agronomía,* un grand merci à Oscar *Coco* Bentancur et Andrés Beretta. Merci pour votre aide en statistique et en édaphologie.

En France, un grand merci à tous mes amis du Laboratoire LETG-COSTEL à Rennes (Hervé, Samuel, Clémence, Jean, Alban, Valérie, Olivier, Pauline, Xavier, Lucelma, Solène, Igor, Véronique, Perrine, Cyril) qui m'ont encouragé lors de chaque stage à Rennes et surtout, avec lesquels j'ai partagé de si bons moments. À l'Unité Mixte Terroir INRA à Angers (Gérard, Etienne, Séverine, Anne, Marie-Hélène) pour m'avoir reçue avec les bras ouverts et me faire sentir comme chez-moi. Merci beaucoup à Etienne Neethling, un grand ami que j'ai gagné dès nos débuts comme doctorants.
Je n'oublie pas non plus la Chaire Unesco « *Cultures et traditions de la vigne et du vin* » et spécialement Joselyne Perard et Olivier Jacquet. Je vous remercie pour m'avoir permis d'intégrer le projet Terviclim dans le cadre de mon Master en l'Université de Bourgogne.

Je remercie mes amis "de la vie" et de la faculté. Votre soutien a été plus que nécessaire. Merci à ma grande famille, celle d'où je viens (papá, mamá, Ana, Adri, Fede, Sofi et Tuta), celle que j'ai choisi (Javi, Mary, Mario, Tota, Marce, Nati, Lula, Mario et Paty) et celle que nous formons avec Javi et Francisca. Javi, gracias por acompañarme siempre en este sinuoso camino. Sólo nosotros sabemos todo lo que han significado estos años. Muchas gracias por no dejarme nunca bajar los brazos y tu amor incondicional. Gracias Francisca por enseñarme a valorar las cosas importantes de la vida.

Santé / Salud / Chin-chin

Dédié à Mario Pablo Mondelli
pour être source d'inspiration et d'encouragement

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1
CHAPITRE 1. CADRE DE L'ÉTUDE 5
1.1. La viticulture en Uruguay 5
1.2. Changement climatique en Uruguay et impacts sur la vigne 6
CHAPITRE 2. CIRCULATION ATMOSPHERIQUE LOCALE ET IMPACTS THERMIQUES DANS UN VIGNOBLE COTIER : OBSERVATIONS DANS LE SUD DE L'URUGUAY 9
2.1. SITE EXPERIMENTAL, DONNEES ET METHODES 10
2.3. RÉSULTATS ET DISCUSSION 11
2.3.1. Caractérisation du vent pendant la période végétative de la vigne 11
2.3.2. Circulation atmosphérique locale : étude de cas quotidiens 12
2.3.3. Impacts thermiques dans le vignoble 14
2.3.4. Essai de classification des parcelles en fonction de l'impact thermique de la brise dans le vignoble 15
2.4. CONCLUSION 16
CHAPITRE 3. EST-CE QUE LE COMPORTEMENT PHÉNOLOGIQUE DU TANNAT (*VITIS VINIFERA* L.) EST AFFECTÉ PAR LA VARIABILITÉ DE LA TEMPÉRATURE DANS LA RÉGION CÔTIÈRE DU SUD D'URUGUAY? 17
3.1. MATERIELS ET MÉTHODES 18
3.2. RESULTATS ET DISCUSSION 18
3.2.1. Variabilité temporelle et spatiale de la température dans la région (méso-échelle) 18
3.2.2. Variabilité spatiale de la phénologie de Tannat 20
3.2.3. Relations entre la phénologie du Tannat et l'accumulation thermique 20
3.3. CONCLUSIONS 21
CHAPITRE 4. COMPOSITION DU RAISIN DE TANNAT EN RÉPONSE À LA VARIABILITÉ SPATIALE DE LA TEMPÉRATURE DANS UNE RÉGION VITICOLE CÔTIÈRE 23
4.1. MATÉRIELS ET MÉTHODES 24
4.2. RÉSULTATS ET DISCUSSION 24
4.2.1. Variabilité saisonnière du climat 25
4.2.2. Variabilité spatiale de la température 25
4.2.3. Composition du raisin de Tannat en vendange 26
4.2.4. Réponse de la composition du raisin de Tannat à la température 26
4.4. CONCLUSIONS 28
CHAPITRE 5. PERCEPTIONS ET RÉPONSES À LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE DANS UNE RÉGION VITICOLE D'URUGUAY 31
5.1. MATERIELS ET MÉTHODES 32
5.2. RESULTATS ET DISCUSSION 32
5.2.1. Evolution des pratiques viticoles et le rôle du climat en tant que déterminant du changement 32
5.2.2. Classification des millésimes et ses déterminants 33

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

5.2.3. Perception de la variabilité locale du climat, Vulnérabilité et Adaptation 34
5.3. CONCLUSIONS 36
CONCLUSION GÉNÉRALE 39
BIBLIOGRAPHIE 45
ANNEXES 55
Valorisation scientifique de la thèse 55

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

INTRODUCTION GÉNÉRALE

De nombreux travaux abordent l'adaptation des agro-écosystèmes à l'environnement et plus particulièrement à la variabilité climatique notamment dans le contexte du changement climatique. La vigne, plante indicatrice du changement climatique selon Chuine *et al.* (2004), a été un sujet d'étude dans plusieurs régions dans le monde.

Dans les pays viticoles traditionnels comme la France, les viticulteurs et professionnels de la filière s'inquiètent des impacts actuels et futurs du changement climatique (Quénol, 2014). Dans les pays non traditionnels comme l'Uruguay, la sensibilité sur les impacts du changement climatique est encore peu abordée. La caractérisation des terroirs viticoles est essentielle pour connaître la diversité des vignobles, déterminée par des climats, des sols et des pratiques culturales différentes.

A l'échelle du méso-climat des régions viticoles, plusieurs études ont été menées pour comprendre la variabilité spatiale de la température (Blanco-Ward *et al.*, 2007; Bonnefoy *et al.*, 2013; Hall et Jones, 2010; Jones *et al.*, 2010; Matese *et al.*, 2014; Quénol *et al.*, 2007), en tant que facteur déterminant des différents processus physiologiques de la vigne et comme composant principal du terroir.

Pour déterminer la vulnérabilité des systèmes de production viticole, la connaissance de leur exposition physique (le climat et les événements extrêmes), de leur sensibilité (l'impact de l'exposition sur la plante) et de leur capacité d'adaptation des viticulteurs, est nécessaire. Ainsi, les mesures d'adaptation comme réponses au changement climatique, résultent de la conjonction de ces trois composantes, analysées dans une perspective locale.

Dans cette démarche, les principales questions auxquelles la thèse vise à répondre sont :

- Quelle est la variabilité spatiale et temporelle de la température dans la région d'étude et quels sont les facteurs locaux qui la caractérisent ?
- Est-ce que la variabilité spatiale de la température a un impact sur la vigne ? La phénologie se modifie-t-elle en fonction de la température ? Peut-elle générer un impact sur la composition finale du raisin ?
- Les acteurs du secteur (producteurs et consultants) connaissent-ils la variabilité locale du climat ? Quel est le rôle du climat dans la prise de décisions ? A partir des connaissances du climat local, peut-on mettre en place des mesures d'adaptation au changement climatique ?

L'objectif de cette thèse est de définir la variabilité du climat dans la région viticole côtière du sud de l'Uruguay, d'évaluer les impacts possibles sur la vigne, et d'apporter des réponses pour l'adaptation de la vigne au changement climatique.

Pour répondre à cet objectif général, nous aborderons successivement les points suivants :

- Analyser la distribution spatiale et temporelle de la température à méso-échelle et l'occurrence des événements extrêmes dans la région d'étude ;
- Évaluer les possibles impacts de la variabilité spatiale et temporelle de la température sur le cépage *Tannat*, sur le suivi phénologique et les possibles différences sur la composition du raisin au moment de la vendange ;
- Évaluer la vulnérabilité et la capacité adaptative du système viticole à travers la perception des acteurs de la filière par rapport au climat,
- Identifier des mesures d'adaptation à la variabilité locale du climat, en proposant des stratégies au court, moyen et long terme.

La thèse s'articule autour de six chapitres :

- Le **chapitre 1** présente une synthèse bibliographique introduisant le cadre scientifique de l'étude. Il situe l'Uruguay et sa viticulture et les impacts du changement climatique dans la région.
- Le **chapitre 2** analyse la variabilité spatiale et temporelle de la température à méso-échelle, dans la région viticole côtière du sud de l'Uruguay (Départements de Canelones et Montevideo). L'étude a été faite avec un réseau de capteurs de température installé dans dix vignobles commerciaux, à différentes distances du Río de la Plata et dans des situations topographiques diverses, afin de déterminer l'influence de ces facteurs sur la distribution thermique dans la région.
- Les **chapitre 3** et **chapitre 4** analysent les possibles impacts de la température sur la vigne. Ils présentent le rapport entre la variabilité spatiale de la température et la croissance du cépage *Tannat*, notamment avec l'évolution phénologique (Chapitre 3) et la composition du raisin en vendange (Chapitre 4).
- Le **chapitre 5** aborde l'étude de la perception et de l'adaptation aux changements climatiques. À partir des enquêtes réalisées auprès des viticulteurs et des consultants, une analyse a été réalisée sur l'évolution des pratiques viticoles et le rôle du climat dans la prise de décisions. De cette étude découle les résultats concernant la vulnérabilité des systèmes de production et les possibles mesures d'adaptation au court, moyen et long terme.
- Le **chapitre 6** est consacré aux conclusions finales et aux perspectives de la thèse.

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

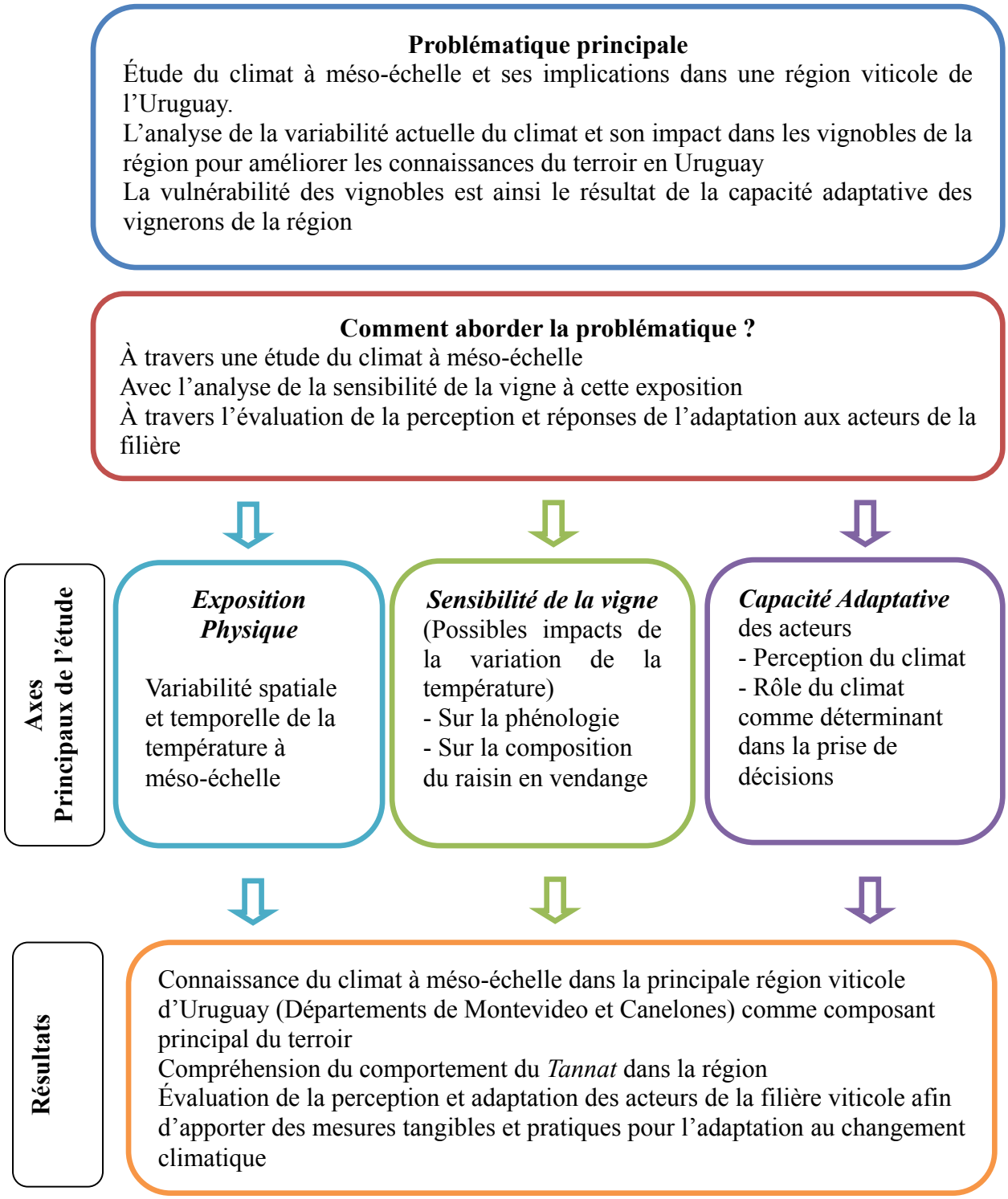


Figure 1. Schéma récapitulatif de l'étude.

CHAPITRE 1. CADRE DE L'ÉTUDE

L'Uruguay est un pays d'Amérique du Sud, situé entre les 30e et 35e degrés de Latitude Sud. Il possède une grande façade maritime donnant sur l'estuaire du Río de la Plata et l'Océan Atlantique. C'est un pays agricole dont 80 % de la surface totale (176.220 km²) sont utilisés pour la production. La viticulture occupe 6.682 ha (INAVI, 2016), soit 3,8% de la superficie totale, répartis dans diverses régions et par conséquent, soumises à différentes conditions édapho-climatiques.

L'Uruguay présente un climat chaud tempéré (*Cfa* selon la classification de Köppen), avec 4 saisons bien définies. La température minimale moyenne est de 5,6 ºC en juillet et la température maximale moyenne est de 29,1 ºC en janvier (période 1972-2015, INIA, 2016. Fig. 2). La pluviométrie annuelle est de 1163 mm et le régime pluviométrique est régulier car les précipitations sont réparties sur toute l'année (station INIA Las Brujas, INIA, 2016). Au cours du cycle végétatif (Septembre – Mars), le cumul des précipitations atteint 715 mm soit une moyenne de 102 mm par mois. Au cours des mois d'été (décembre, janvier et février), on peut enregistrer dans certaines situations des déficits hydriques (figure 2).

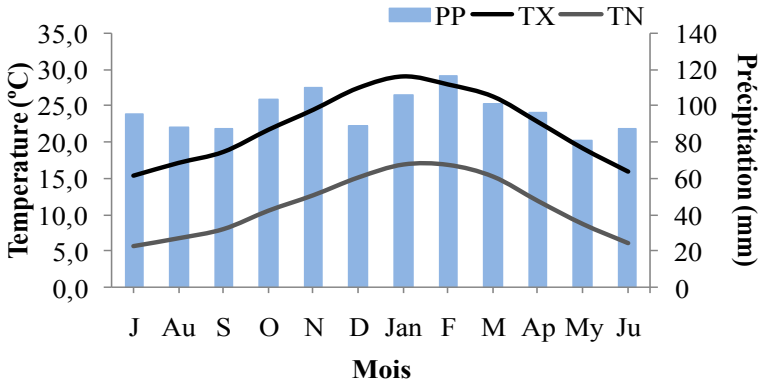


Figure 2. Température maximale moyenne (TX en ºC), température minimale moyenne (TN en ºC) et précipitations (PP en mm) de la station INIA Las Brujas pour 1972-2015 (INIA, 2016).

1.1. La viticulture en Uruguay

Même si les vignobles de l'Uruguay se répartissent dans tout le pays, la prédominance d'implantation se trouve dans le sud et nord-ouest du pays. La région viticole la plus importante du pays (Départements de Canelones et Montevideo) totalise 76,3 % de la superficie des vignobles (INAVI, 2016). Dans le paysage, les plaines de sols profonds prédominent et le climat est fortement influencé par le Río de la Plata.

D'après INAVI (2016), l'Uruguay possède une superficie viticole de 8127 ha et produit 77.198 hL/an de vin. Le rendement moyen est de 14186 kg/ha (2006-2015). La production de raisins annuelle est de 108 millions kg (moyenne 2006-2015).

La production de vin est représentée par 48 % pour les rouges, 40,5 % pour les rosés et 11 % pour les vins blancs. La totalité du vignoble appartient à 193 caves et 86% de ces caves possèdent moins de 5 ha de vignobles.

Le cépage *Tannat* représente 1/4 de l'encépagement total (Figura 3). Il permet d'élaborer des vins rouges (de table et fins) tandis que l'*Ugni blanc* est le cépage le plus implanté pour élaborer des vins blancs (INAVI, 2016).
Le *Tannat* est reconnu comme le plus adapté aux conditions édapho-climatiques du pays (Ferrer, 2007). C'est le cépage considéré emblématique d'Uruguay car il apporte de la typicité et de l'originalité due à son potentiel œnologique (González-Neves *et al.*, 2006).

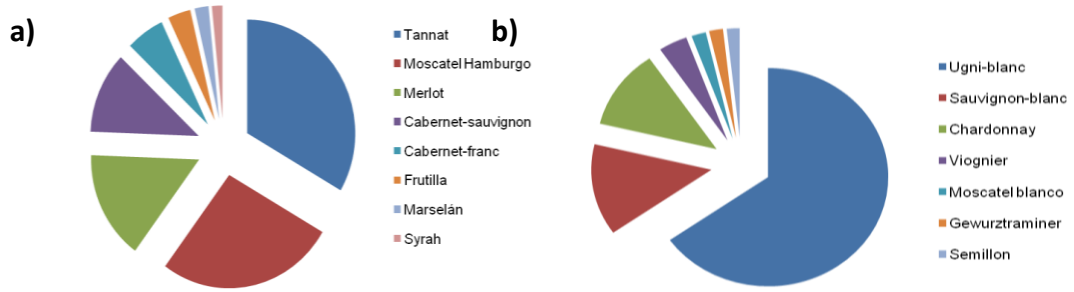


Figure 3. Encépagement du vignoble uruguayen : rouges (a) et blancs (b) (pourcentage selon la superficie) (INAVI, 2016).

1.2. Changement climatique en Uruguay et impacts sur la vigne

Les rapports du GIECC (2007, 2014) soulignent une augmentation de la température moyenne globale de 0,74 ºC entre 1906 et 2005. En Uruguay, sur la base de données observées par Rusticucci et Renom (2008) durant la période 1935-2002, on note une augmentation de 0,8 ºC pour la température maximale annuelle et de 0,6 ºC pour la température minimale annuelle. Dans le sud du pays, Fourment *et al.* (2013) ont montré une augmentation des sommes thermiques par le calcul de différents indices bioclimatiques : Indice d'Huglin - IH (+4,3 % lors des 15 dernières années) et Indice de Fraîcheur de Nuits - IF (+0,72 ºC pour la même période).
Pour les précipitations, Magrin *et al.* (2014) ont observé une tendance à l'augmentation de 5 mm par an et une augmentation de la fréquence des pluies fortes. Selon la FAO (2011), une grande partie de la variabilité trouvée dans la tendance d'augmentation des pluies n'est pas expliquée par la variabilité au long terme, et évoquant l'importance de la variabilité climatique à une échelle temporelle plus courte, comme la variabilité interannuelle.
Cette évolution climatique a un impact sur la vigne et le vin. La vigne est une plante pérenne qui se caractérise par sa sensibilité au climat. L'effet des températures sur la phénologie de la vigne et la composition finale du raisin (Jackson et Lombard, 1993; Mira de Orduña, 2010) est connu. Une augmentation de la température provoque un avancement du cycle phénologique (Duchêne et Schneider, 2005 ; Webb *et al.*, 2008) et affecte la composition de métabolites primaires, due à l'augmentation d'accumulation de sucres (Petrie et Sadras, 2008; Neethling *et al.*, 2011), la réduction de l'acidité totale et l'augmentation du pH (Jones et Davies, 2000; Bergqvist *et al.*, 2001; Duchêne et Schneider, 2005). Le régime hydrique joue un rôle essentiel sur la maturation de la baie, notamment en condition de régime hydrique modéré où celui-ci favorise l'accumulation

de sucres et métabolites secondaires (Carbonneau, 2004 ; Shellie, 2006 ; Cohen *et al.*, 2008 ; Van Leeuwen *et al*., 2009).
Fourment *et al.* (2013) ont montré que cette évolution climatique a aussi un impact sur la viticulture uruguayenne, notamment avec l'évaluation du raccourcissement du cycle de la plante, sur toute la période de maturation, et l'altération de la production de métabolites primaires du raisin de *Tannat*, avec une tendance à la diminution de l'acidité en vendange. Cependant, ces altérations provenant de trois vignobles commerciaux du sud d'Uruguay, peuvent être affectés par d'autres facteurs, en plus de la variabilité annuelle du climat, notamment l'évolution des pratiques viticoles, le type de sol, etc.
Pour les vignobles du sud d'Uruguay, la variabilité du climat n'est pas suffisamment connue. Au niveau du macroclimat, Ferrer (2007) a caractérisé le climat de la région comme *tempéré chaud*, avec *nuits tempérées et sécheresse modérée*, soit le groupe climatique $ISA_1IHA_4IFA_2$ selon la Classification Climatique Multi-critère adaptée à la vigne (Tonietto et Carbonneau, 2004, Ferrer 2007) (Figure 4).

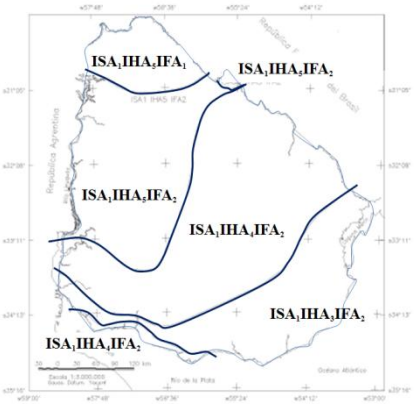


Figure 4. Classification Climatique Multi-Critère en Uruguay (Ferrer, 2007).

A l'échelle du méso-climat, il n'existe pas des travaux qui déterminent la variabilité climatique des régions viticoles. Même si Ferrer *et al.* (2012) comparent la typicité du raisin dans différentes régions viticoles, le climat, comme composant essentiel du terroir, doit être évalué à méso-échelle pour déterminer l'influence des facteurs locaux (topographie, exposition, distance de la mer) sur la vigne et donc avoir un effet sur la typicité des raisins.
Au sud de l'Uruguay, l'extension de l'estuaire du Río de la Plata favorise une source superficielle de contraste thermique qui ressemble à celle de l'océan (Sraibman 2009). La différence thermique entre le Río et le continent favorise la formation d'un système de brise dans la région. L'analyse de ce système de brises, notamment la distance de pénétration dans les terres, est essentielle pour connaitre son influence sur les vignobles de la partie sud de l'Uruguay.

CHAPITRE 2. CIRCULATION ATMOSPHERIQUE LOCALE ET IMPACTS THERMIQUES DANS UN VIGNOBLE COTIER : OBSERVATIONS DANS LE SUD DE L'URUGUAY

Dans la région viticole la plus importante de l'Uruguay (Montevideo et Canelones) (Fig. 5), une forte variabilité spatiale de la température a été observée en raison de la configuration du relief et/ou de la proximité à la mer (Fourment *et al.*, 2013), comme cela se retrouve dans d'autres régions viticoles à travers le monde (Quénol *et al.*, 2007 ; Bonnardot *et al*., 2012 ; Bonnefoy *et al.*, 2013). Les connaissances concernant les réponses de la vigne à son environnement au sens large, y compris le climat, sont nombreuses (inter alia Deloire *et al.*, 2005 ; Quénol, 2014). Ainsi, les conditions thermiques durant la période végétative de la vigne et de la maturation du raisin sont déterminantes car elles affectent les métabolismes primaires (Kliewer, 1977 ; Jackson et Lombard, 1993 ; Sadras *et al.*, 2012) et secondaires (Mori *et al.*, 2007 ; Tarara *et al.*, 2008 ; Nicholas *et al.*, 2012) qui sont responsables de la composition finale du raisin et donc du vin. Outre la température, le vent figure aussi parmi les facteurs atmosphériques contrôlant la croissance et la physiologie de la vigne. Une vitesse du vent supérieure à 4-5 $m.s^{-1}$ peut ralentir et endommager la croissance de la plante (Campbell-Clause, 1998), causer directement la fermeture des stomates et donc, réduire l'activité photosynthétique (Freeman *et al.*, 1982 ; Kliewer et Gates, 1987 ; Gladstones, 1992).

Par ailleurs, par rapport aux conditions de température et de vent, une circulation atmosphérique locale de brise de mer dans les régions viticoles côtières peut être un facteur majeur de variation de ces deux facteurs atmosphériques, comme cela a été montré par exemple dans le district viticole de Stellenbosch en Afrique du Sud (Bonnardot *et al.,* 2002). En effet, l'analyse de l'évolution journalière des données de vent de surface, de température et d'humidité atmosphériques dans ce vignoble de l'hémisphère sud a permis de montrer que l'occurrence de telles circulations locales pouvait y modifier les conditions climatiques, surtout en février, mois le plus chaud et surtout période de maturation du raisin. La vitesse du vent pendant ces événements de brise de mer a été mesurée, en moyenne, entre 4 et 6 $m.s^{-1}$. L'impact de ces facteurs climatiques sur les arômes de différents cépages a été mis en évidence (Carey *et al*., 2003).

A l'échelle de la région du Río de la Plata, des études de brise de mer ont été réalisées en Argentine (Sraibman, 2009 ; Humántico-Cisneros et Piccolo, 2011) mais aucune étude de la sorte n'a encore été menée en Uruguay et plus précisément, sur la région viticole de Montevideo et Canelones. Des centres de hautes pressions souvent situés sur l'Atlantique, ou plus au nord du pays en été, génèrent des vents d'est ou nord-est dans la région, produisant des anomalies négatives journalières de la température de surface océanique (Simionato *et al.*, 2009). Ce différentiel thermique terre-mer et la configuration topographique plus ou moins plate de la région semblent ainsi être favorables à l'établissement et à la pénétration de brise de mer sur le vignoble côtier.

L'objectif est de contribuer au développement des connaissances sur le climat à échelle fine des terroirs viticoles uruguayens, et plus précisément, d'analyser les phénomènes de brise dans la région sud du pays et d'évaluer les possibles impacts des contraintes climatiques dans les vignobles.

2.1. SITE EXPERIMENTAL, DONNEES ET METHODES

La région étudiée est le territoire viticole de Montevideo et Canelones, situé au sud de l'Uruguay en bordure de l'estuaire du Río de la Plata (Fig. 5). C'est la région viticole la plus importante du pays puisqu'elle totalise 76,4 % de la superficie des vignobles (INAVI, 2016). Le cépage le plus cultivé est le *Tannat*, cépage rouge prédominant et traditionnel en Uruguay.

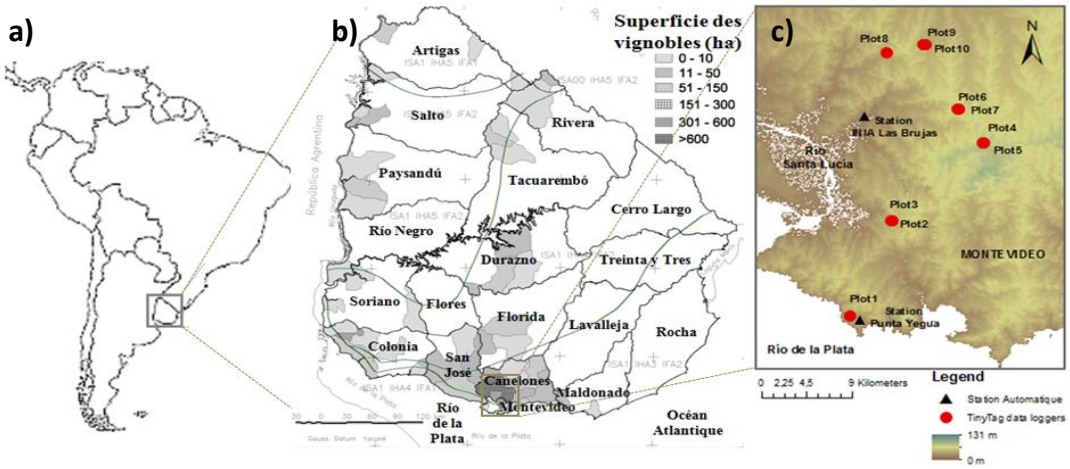


Figure 5. Cadre géographique de la région étudiée : situation à l'échelle : **a)** de l'Amérique du Sud ; **b)** de l'Uruguay et de ses régions viticoles (d'après Ferrer, 2007) et **c)** de la région viticole de Montevideo et Canelones (avec localisation du réseau de capteurs thermiques et des stations automatiques météorologiques INIA Las Brujas et Punta Yeguas. Source : ArcGIS).

Analyse climatique : Pour obtenir des données climatiques dans cette région viticole, dix capteurs de température de type *TinyTag Talk 2* (Gemini Data Loggers Ltd., UK) ont été installés depuis septembre 2011 dans des vignobles commerciaux et répartis principalement en fonction des différences topographiques et de la distance à l'estuaire du Río de la Plata. Cette phase s'est réalisée dans le cadre des projets ANR-JC-TERVICLIM et GICC-TERADCLIM (Quénol et Bonnardot, 2014) (Fig. 5 – Tableau 1). L'étude porte sur les données des périodes végétatives (du 1er septembre au 15 mars) des saisons 2011-12, 2012-13 et 2013-14. Nous avons aussi analysé des données climatiques complémentaires issues de deux stations météorologiques automatiques situées près des vignobles étudiés : une située à 15 km du Río de la Plata (Station de l'INIA Las Brujas) et l'autre située à moins d'un kilomètre du fleuve (Station *Punta Yeguas*), dans la parcelle la plus proche du fleuve (Plot 1) en décembre 2012, pour analyser plus spécifiquement les effets éventuels de la brise sur la région viticole côtière.

Tableau 1. Caractéristiques géographiques du réseau de capteurs *TinyTag* et des stations automatiques déployé dans la région viticole de Montevideo et Canelones.

Parcelle	Distance du Río de la Plata (km)	Altitude (m)	Pente (%)	Exposition
Plot1	0,9	34	3,3	Sud
Plot2	11,7	31	1,3	Ouest
Plot3	11,7	29	0,9	Ouest
Plot4*	18,3	95	2,3	Est
Plot5	18,3	83	2,9	Est
Plot6	21,9	65	2,6	Sud-est
Plot7	21,9	62	2,6	Sud
Plot8	28,0	53	4,4	Sud-est
Plot9	28,6	49	1,6	Nord
Plot10	28,6	46	3,6	Sud-est
Station Punta Yeguas	0,9	34	3,3	Sud
Station INIA Las Brujas	18,6	32	0,9	Sud-Ouest

* Le capteur du P4 n'est pas utilisé en raison de 40 % de données manquantes pour la saison 2013-2014.

Les données des stations météorologiques ont été utilisées afin d'analyser d'autres variables climatiques, notamment le vent (vitesse et direction) et l'humidité relative. La fréquence de la direction du vent et la moyenne de la vitesse du vent ont été calculées sur cette période du cycle végétatif. Un intérêt particulier s'est porté sur l'étude de la brise de mer pendant la période de maturation du raisin. L'analyse se concentre sur le mois de février, mois précédant la vendange, pour analyser les effets possibles sur la composition finale du raisin.

Analyse statistique : Une procédure univariée (ANOVA) est utilisée pour déterminer les différences significatives (selon le Test de Tukey ; α=0,05) entre parcelles et années, et une analyse en composantes principales est calculée en utilisant les indices bioclimatiques pour préciser l'impact thermique des circulations atmosphériques dans le vignoble (niveau de confiance de 95 %) et dégager ainsi des profils thermiques de parcelles. Ensuite, une classification hiérarchique ascendante (selon méthode de Ward) est appliquée avec ces mêmes variables thermiques pour distinguer d'éventuelles typologies de parcelles.

2.3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

2.3.1. Caractérisation du vent pendant la période végétative de la vigne

Pendant la période végétative de la vigne, les directions du vent les plus fréquentes sont celles de Nord-Est et d'Est (21 %) à la station *INIA Las Brujas*, et celle de Sud-Est (37,5 %) à *Punta Yeguas*, station de référence la plus proche de la côte (Fig. 6). La fréquence

remarquablement élevée des vents de Sud-Est à *Punta Yeguas* souligne l'effet de canalisation du vent synoptique par le Río de la Plata, le vent de Nord-Est devenant secondaire. La vitesse du vent est plus élevée à proximité du Río de la Plata et diminue vers l'intérieur (du fait de la forte rugosité).
Entre le jour et la nuit, les changements de fréquence de direction du vent traduisent l'influence des brises de mer et/ou de terre, de manière différente à *Las Brujas* et à *Punta Yeguas*. À *Punta Yeguas*, les vents de Sud-Est restent les plus fréquents de jour comme de nuit, mais on note aussi un renforcement (fréquence et force) des vents de Sud. Ainsi, sur la côte du Río de la Plata, la circulation de brise de mer existe bien, mais elle est en grande partie masquée par le vent dominant de Sud-Est (canalisé par l'estuaire) auquel elle se combine.

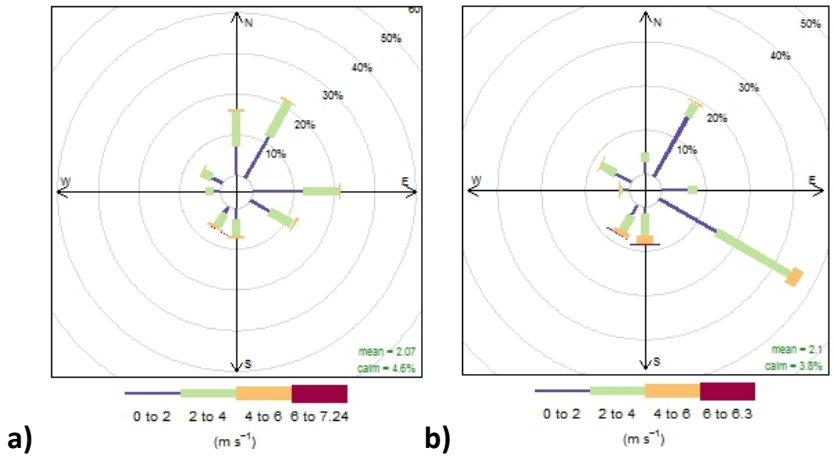


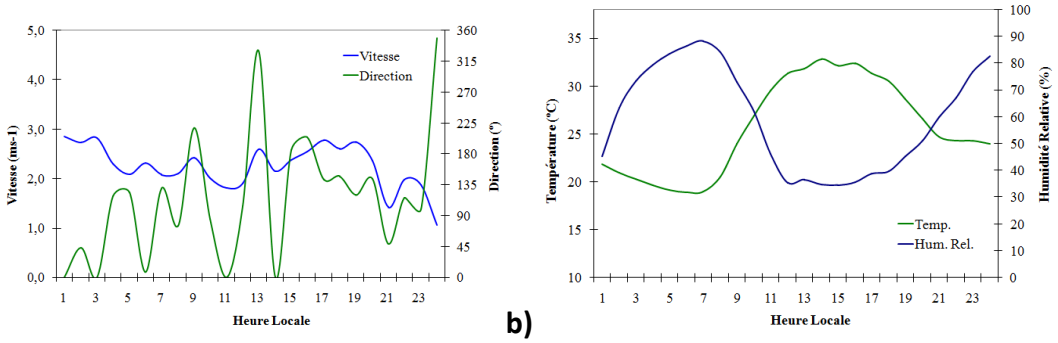
Figure 6. Fréquence et intensité des vents par secteur à la station INIA Las Brujas **(a)** et Punta Yeguas **(b)** – moyenne pour la période de novembre à février 2014.

Le nombre d'heures enregistrant une vitesse supérieure à 4 $m.s^{-1}$ pendant la période de maturation (février) à la station de *Las Brujas* pour les trois saisons étudiées est plus important en 2013 (26 heures de plus qu'en 2012, et 20 heures de plus qu'en 2014), avec des différences significatives l'après-midi (13 h et 14 h). Cette variabilité saisonnière pourrait contribuer à la différence entre les millésimes en jouant sur la composition finale de la baie, et ainsi, sur le vin.

2.3.2. Circulation atmosphérique locale : étude de cas quotidiens

Afin d'illustrer un événement typique d'occurrence de brise de mer et ses impacts climatiques sur la région viticole, les données du 14 février 2012 sont utilisées. Les conditions synoptiques ce jour-là sont anticycloniques sur l'Uruguay avec un centre de hautes pressions (1026 hPa) situé à 35°S sur l'océan Atlantique Sud, au large des côtes uruguayennes, bloquant l'avancée d'un système frontal localisé à la même latitude sur l'Argentine et apportant sur l'Uruguay une masse d'air chaud et humide d'origine

tropicale. La situation météorologique du 14 février 2012, est donc une situation typiquement estivale en Uruguay et génératrice de fortes chaleurs.
L'analyse des données de vent enregistrées à la station *INIA Las Brujas*, montre qu'une cellule de circulation de brise de mer s'est bien mise en place : on note une augmentation de la vitesse du vent à partir de 13 h (Heure Locale - HL) pour atteindre un maximum de 3 $m.s^{-1}$ vers 17 h, accompagnée d'un changement de direction (d'une composante nord jusqu'à 14 h à une composante sud et sud-est de 15 h à 20 h HL), marquant ainsi l'arrivée de la brise de mer. La faiblesse du vent dominant a permis le développement de la circulation de brise de mer, pourtant de direction opposée, et sa pénétration à l'intérieur des terres. Même si la moyenne de la vitesse du vent est modeste à 15 km de la côte, les vents marins originaires du Río de la Plata ont permis à la température, au moment du maximum diurne, de se stabiliser aux environs de 31,5°C de 11 h à 15 h, malgré une baisse rapide de l'humidité au contact de la surface continentale.
L'arrivée de la brise est bien visible sur les courbes de température enregistrée dans les vignobles au cours de la journée du 14 février 2012, avec une chute de température entre 10 h et 14 h HL sur toutes les parcelles. Cette baisse de température a été la plus marquée sur la parcelle la plus proche de la mer, avec une diminution de 4,7ºC entre 12 h et 17 h. De moindre ampleur (-2,1ºC) et de plus courte durée (entre 15 h et 16 h), cette baisse de température a été enregistrée jusqu'à 30 km à l'intérieur du vignoble (plot 10, le site le plus éloigné de la mer). Des conditions intermédiaires ont été observées, notamment sur les parcelles situées entre 18 et 22 km de la mer.



a) **b)**

Figure 7. Paramètres climatiques du 14 février 2012 à la station météorologique INIA Las Brujas : **a)** Vitesse ($m.s^{-1}$) et direction (º) du vent ; **b)** Température (ºC) et Humidité relative (%).

Sachant d'une part qu'une température supérieure à 35°C provoque un stress thermique pour la photosynthèse et ainsi, la fermeture des stomates, défavorisant donc le processus de transpiration (Jackson, 2008) ; et d'autre part, qu'une température comprise entre 25 et 30°C, représente les conditions optimales pour la photosynthèse et donc, pour la maturation du raisin, on peut conclure que l'arrivée de la brise de mer sur le vignoble durant cette journée du 14 février 2012 lui a permis de limiter le stress et de bénéficier de conditions thermiques favorables pour la photosynthèse. Dans le cas de la

région viticole de Montevideo et Canelones, la fréquence de brises de mer peut ainsi modifier considérablement les températures maximales pour la vigne.

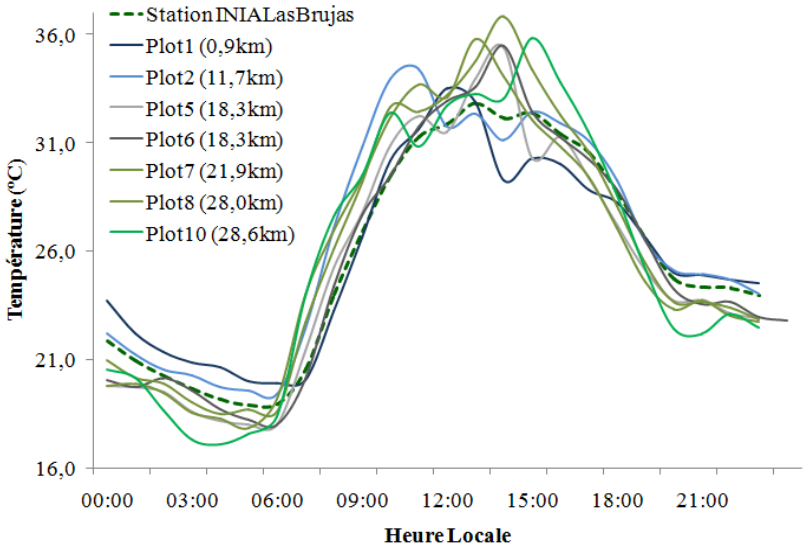


Figure 8. Température horaire (ºC) observée le 14 février 2012 dans sept des parcelles viticoles instrumentées (avec la distance au Río de la Plata en km) et la station INIA Las Brujas.

2.3.3. Impacts thermiques dans le vignoble

L'analyse des températures dans les parcelles des vignobles étudiés révèle une forte variabilité spatiale des conditions thermiques, notamment sur les températures horaires moyennes pendant la saison végétative (1er septembre au 15 mars). D'une manière générale, ces différences sont expliquées par l'effet modérateur du Río de la Plata sur la température, avec un écart de 1,8ºC pendant la nuit et de 1,4ºC lorsque les températures sont les plus élevées. Quand les conditions thermiques sont plus extrêmes (pendant l'été), les écarts de température sont plus marqués entre parcelles, de 2ºC durant la nuit et 1,5ºC dans la journée. Au cours de la période de maturation des baies, les situations de températures extrêmes jouent un rôle négatif sur la composition finale du moût, par un effet de dégradation des acides organiques et anthocyanes (Mori *et al.*, 2007 ; Sadras *et al.,* 2012) et d'inhibition de la synthèse des sucres réducteurs et phénols du raisin (Nicholas *et al.*, 2012).
Le calcul de l'amplitude thermique moyenne par parcelle met en évidence la parcelle la plus proche de la mer (Plot 1) par rapport aux autres parcelles (moyennes statistiquement différentes entre parcelles, r^2=0,72 ; p=0,058). Ainsi, les stations des parcelles 2 et 3 ont une amplitude thermique diurne plus forte que ne le laisserait supposer empiriquement leur seule distance à la côte. C'est leur position topographique abritée qui explique cette anomalie apparente, imposant ainsi des oscillations thermiques diurnes comparables à celles des parcelles et stations les plus éloignées de la côte.

2.3.4. Essai de classification des parcelles en fonction de l'impact thermique de la brise dans le vignoble

L'analyse factorielle en composantes principales résume 96,6 % de la variance totale. Le premier axe (PC1) est expliqué par les variables en lien avec les températures maximales, ainsi que par l'amplitude thermique ($r > 0,85$). En revanche, le deuxième axe (PC2) synthétise les variables relatives aux températures minimales ($0,59 < r < 0,63$) ainsi que les indices bioclimatiques ($r=0,99$ pour GDD et $r=0,66$ pour IH). Les parcelles les plus éloignées du Río de la Plata (Plot 8, 9 et 10) et les parcelles avec les situations topographiques particulières exposées au nord (Plot 2 et 3), se regroupent sur PC1, en révélant des conditions plus extrêmes ou continentales. Au contraire, le site Plot 1, situé près de la mer s'oppose à ce groupe de stations, en montrant des situations thermiques moins extrêmes, fraîches, grâce à l'effet du Río sur la région.

Sur les mêmes variables de température, une analyse multivariée de classification hiérarchique ascendante regroupe les parcelles soumises à des conditions thermiques similaires (Fig. 9). Les résultats indiquent que 55,3 % de la variance totale est expliquée par la partition en trois classes. La classe constituée par Plot 1 est caractérisée par des conditions thermiques moins extrêmes, avec une influence du Río de la Plata sur la température. C'est la classe avec les températures maximales les moins élevées (Température maximale du cycle = 24,7ºC), les minimales les plus élevées (TN du cycle = 15,2ºC) et l'amplitude thermique la plus faible (Moyenne pendant janvier et février de 10,7ºC). Une autre classe est composée par les parcelles les plus éloignées de la mer (Plot 7, 8, 9 et 10) et celles avec une exposition au nord (Plot 2 et 3). L'influence du Río y est moins marquée, donc les conditions thermiques sont plus contrastées : températures maximales élevées (TX du cycle = 25,9ºC), minimales plus basses (TN du cycle = 13,5ºC) et amplitude thermique plus forte (Moyenne de 13ºC en janvier). Avec des conditions thermiques intermédiaires, la dernière classe comprend les parcelles dont les altitudes sont les plus élevées de la région (Plot 5 et 6), à une distance du fleuve intermédiaire et donc, avec une modeste influence du Río de la Plata sur les températures.

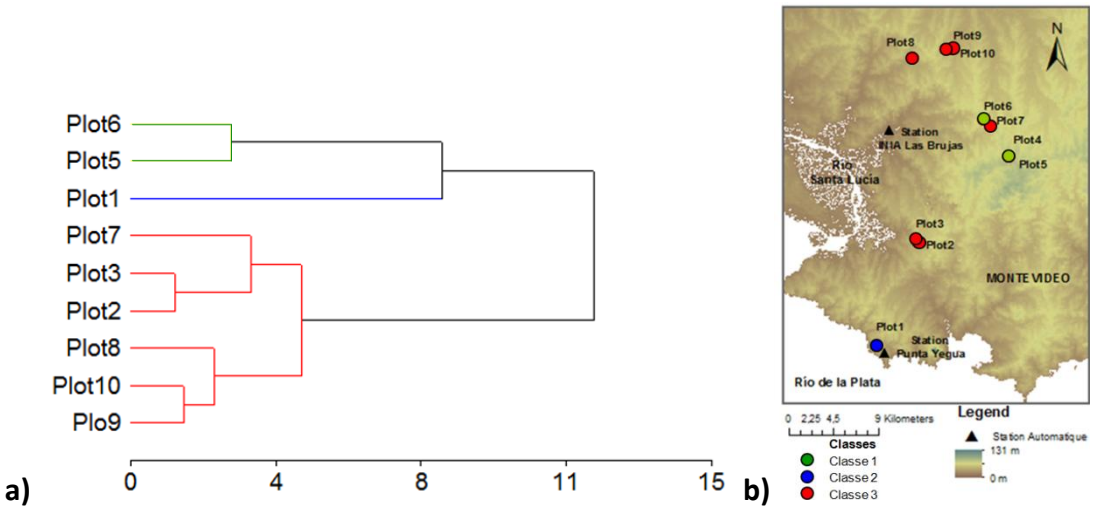


Figure 9. Dendrogramme d'une classification hiérarchique ascendante appliquée aux indices thermiques calculés à partir des données mesurées sur les 10 parcelles de septembre à mars pour 2012, 2013 et 2014 **(a)** et résultats cartographiés du classement **(b).**

2.4. CONCLUSION

La brise de mer peut être considérée comme un élément climatique très pertinent pour aider à l'identification des terroirs viticoles côtiers, car les techniques de gestion du vignoble peuvent être influencées par ses impacts dont la variabilité spatio-temporelle est forte. Le réseau de capteurs thermiques installé dans le vignoble de Montevideo et Canelones s'est avéré être un bon outil de mesure pour enregistrer les impacts thermiques de la brise de mer à l'échelle fine de ce vignoble. Cette étude des variations spatio-temporelles de la température observée a permis, en parallèle des données de stations météorologiques automatiques, de caractériser la pénétration de la brise de mer jusqu'à au moins 30 km sur la plus importante région viticole en Uruguay. L'étude a bien montré la chute de température au moment du maximum diurne (environ -4°C) associée à l'arrivée de la brise. Dans des conditions thermiques extrêmes au cœur de la période de maturation des raisins, l'impact de la brise sur la température pourrait donc réduire le stress thermique pour l'activité photosynthétique et ainsi, être bénéfique au développement des composantes primaires et secondaires des raisins.

CHAPITRE 3. EST-CE QUE LE COMPORTEMENT PHÉNOLOGIQUE DU TANNAT (*VITIS VINIFERA* L.) EST AFFECTÉ PAR LA VARIABILITÉ DE LA TEMPÉRATURE DANS LA RÉGION CÔTIÈRE DU SUD D'URUGUAY?

Les analyses climatiques présentées dans le chapitre précédent ont montré une forte variabilité climatique. Ceci est dû à l'influence du Río de la Plata et aux différentes situations topographiques dans la région viticole côtière (Fourment *et al.,* 2014).

La phénologie de la vigne, via les dates des stades spécifiques de croissance et de développement du cycle végétatif de la plante, est impactée par la variabilité spatiale du climat. Le moment et la durée des phases sont influencées surtout par la température de l'air (Jones et Davis, 2000 ; Keller, 2010), ainsi que par les différents relations source-puits de la plante (Keller, 2010).

Les viticulteurs prennent en compte les différents stades phénologiques du cycle afin de gérer leurs pratiques viticoles comme la taille d'hiver, l'éclaircissage de raisins, le rognage et les applications de produits phytosanitaires.

Actuellement, les travaux sur la phénologie de la vigne sont basé sur le développement de modèles prédictifs de stades phénologiques afin d'aider à la gestion des vignobles, à l'échelle de régions viticoles, à court terme c'est-à-dire durant la saison végétative (Caffarra et Eccel, 2009 ; Falcao *et al*., 2010 ; Parker *et al*., 2011 ; Tomasi *et al*., 2011 ; Lorenzo *et al*., 2013) ou à long terme, afin d'estimer les possibles impacts du changement climatique (Caffarra et Eccel, 2011 ; García de Cortázar-Atauri *et al.*, 2009 ; Fraga *et al.,* 2015 ; Mosedale *et al*., 2015).

Concernant les travaux sur la relation entre la phénologie et la température, Jones et Davis (2000) ont montré que l'occurrence d'un stade phénologique spécifique est conditionnée par des évènements climatiques froids et humides durant la période précédente. Calò *et al*. (1994) ont mis en évidence que la température moyenne maximale joue un rôle important sur l'occurrence de la floraison, avec des groupes de réponses entre différents cépages.

Bonnefoy *et al.* (2014) et Madelin *et al.* (2014) ont montré chez la vigne une précocité plus marquée lors de conditions plus chaudes, malgré l'effet de la gestion du vignoble et du type de sols qui peuvent masquer l'effet de la température à méso-échelle. Barbeau (2008) a montré un retard de la phénologie (véraison et maturation) lorsque la vigueur de la vigne est excessive, et à l'inverse, une précocité quand la vigueur de la plante est modérée voire faible, due à une meilleure efficience photosynthétique et à de meilleurs relations "source-puits". Pourtant, l'effet d'une augmentation de la température en maturation, par exemple, varie en fonction de la relation "source-puits".

On voit très clairement que la phénologie n'est pas uniquement conditionnée par le climat mais par d'autres facteurs liés à la physiologie de la vigne et aux pratiques des viticulteurs. Toutefois, le température a quand même un impact important et la variabilité spatiale de la température liée aux effets locaux agira forcément sur les

différentes phases de croissance de la vigne (Madelin et al., 2014 ; Neethling et al., 2014)
L'objectif de ce chapitre est donc d'étudier la phénologie du *Tannat* en relation avec la variabilité spatiale et temporelle de la température à méso-échelle, dans la région côtière du sud de l'Uruguay.

3.1. MATERIELS ET MÉTHODES

Le suivi phénologique a été effectué dans dix parcelles (P1 à P10) de cinq vignobles composées du cépage *Tannat* et conduits en espalier haut. Le *Tannat* présente un cycle phénologique intermédiaire, avec un débourrement et une période de maturation moyenne par rapport aux autres cépages de la région (PlantGrape, 2013).

Mesures sur la plante : Sur 100 sarments par parcelle, les stades phénologiques ont été suivis selon l'échelle Eichhorn et Lorenz (Coombe, 1995). Les stades clés sont : floraison (E-L 25), nouaison (E-L 27), fermeture de grappes (E-L 33) et véraison (E-L 35).

Analyse climatique : en prenant en compte 10ºC comme seuil de développement de la vigne (Pouget, 1963), nous avons calculé les indices bioclimatiques adaptés : Degré Jours - DJ (Winkler *et al.*, 1974) (DJ= ΣTmed–10) et Indice Heliothérmique d'Huglin - IH (Huglin, 1978) sur les données observées de température des capteurs (IH=Σ(Tmed–10+Tmax–10)/2k ou k=1 en Uruguay). DJ et IH ont été calculés pour chaque stade phénologique pendant trois saisons (2012, 2013 et 2014).

Analyse statistique : Une analyse de variance (ANOVA) a été faite selon le test de Tukey (α=0,05) afin de différencier les parcelles selon l'accumulation thermique. L'effet "année" a été considéré comme covariable. Pour établir les différences entre parcelles selon les différences de phénologie, une analyse binomiale de fréquences a été faite selon le test de LSD Fisher (α=0,05), en supposant que la distribution de fréquences par stade suivait un modèle linéal généralisé mixte. Pour corréler les stades phénologiques et les indices bioclimatiques et afin de déterminer les possibles effets de la température sur la phénologie, une analyse en composantes principales (multi-variée) a été faite.

3.2. RESULTATS ET DISCUSSION

3.2.1. Variabilité temporelle et spatiale de la température dans la région (méso-échelle)

Les indices bioclimatiques (Degrés-Jours (DJ) et indice Héliothermique (IH)), ont montré des différences entre les années (variabilité temporelle) et entre les parcelles (variabilité spatiale) (Tableau 2). Pour les trois années étudiées, la variabilité spatiale des moyennes de DJ et IH entre parcelles est statistiquement significative : la parcelle 5 (P5) est celle

qui a accumulé le moins d'unités thermiques, tandis que les parcelles qui en ont accumulées le plus ont été P1 (DJ) et P8, P9 et P10 (valeurs plus hautes d'IH).
L'analyse d'accumulation thermique selon les stades phénologiques a montré des différences statistiques entre parcelles quand elle est mesurée en DJ. Les parcelles 1, 8 et 9 ont accumulée la plus grande quantité d'unités thermiques en floraison (GD10>383), tandis que les P7 et 5, la plus petite quantité (GD10<379). Au moment de la fermeture de grappes, les parcelles statistiquement différentes ont été la P1 (GD10>747) et la P5 (GD10<727).

Tableau 2. Degré-Jours (DJ) et Indice Héliothermique (IH) cumulés par parcelle durant les cycles végétatifs de 2012, 2013 et 2014.

Parcelle	DJ*				IH**			
	2012	2013	2014	*Moyenne*	2012	2013	2014	*Moyenne*
P1	1776	1829	1804	*1803*	2327	2351	2328	*2335*
P2	1729	1757	1757	*1748*	2400	2400	2367	*2389*
P3	-[a]	1767	1748	*1758*	-[a]	2412	2366	*2389*
P4	1692	1741	-[b]	*1717*	2344	2366	-[b]	*2355*
P5	1617	1667	1659	*1648*	2260	2267	2261	*2263*
P6	1671	1733	1727	*1710*	2325	2361	2344	*2343*
P7	1649	1693	1710	*1684*	2341	2365	2355	*2354*
P8	1759	1822	1802	*1794*	2451	2464	2430	*2448*
P9	1743	1813	1796	*1784*	2474	2498	2452	*2475*
P10	1713	1771	1772	*1752*	2431	2457	2432	*2440*
Moyenne	*1705*	*1759*	*1753*	***1740***	*2373*	*2394*	*2371*	***2379***

*Différences statistiques entre parcelles (R^2=0,90; *P*<0,0001) **Différences statistiques entre parcelles (R^2=0,95; *P*<0,0001). [a] Capteur non installé [b] 40% de données manquantes.

L'accumulation thermique par stade obtenue dans ce travail ne correspond pas aux valeurs trouvées par van Leewuen *et al.* (2008) pour le *Tannat*. En floraison, l'accumulation est 80% inférieurs aux valeurs de van Leewuen *et al.* (2008) (<401 DJ), tandis que les valeurs atteintes en véraison sont supérieures (1153 DJ). Cette contradiction de résultats en véraison peut s'expliquer par la méthodologie de mesure de températures. Pour van Leewuen *et al.* (2008), les références d'accumulation thermique ont été calculées sur les données des stations météorologiques. Dans le cas de notre étude, les valeurs proviennent des capteurs installées dans les vignobles, et en générales ces valeurs sont supérieures aux températures issues de stations météorologiques (surestimation de la température de l'air). En véraison, cette différence entre la valeur entre uns de capteurs (P8 le plus proche à la station) et la station météorologique a atteint en moyenne pour les 3 saisons 47,3 GD de plus.

3.2.2. Variabilité spatiale de la phénologie de Tannat

Les modèles d'évolution des stades phénologiques calculés pour le *Tannat* dans les dix parcelles d'étude, ont été très contrastés entre les sites. L'analyse de la phénologie moyenne pour les trois saisons, a montré que les quatre stades phénologiques étaient statistiquement différents entre les parcelles (P<0,0001). La parcelle la plus tardive en moyenne a été la P7 pour tous les stades, et au contraire, les parcelles les plus précoces ont été la P4 (en floraison et véraison) et la P5 au début du cycle (en floraison et nouaison).
Le décalage de la P7 comparé aux autres est dû à la gestion du vignoble. Le viticulteur fait la taille d'hiver 4 semaines plus tard dans cette parcelle, pour éviter le risque de dégâts par le gel printanier. Avec cette pratique, il provoque un retard du cycle végétatif afin d'éviter l'exposition au gel. À l'inverse, les parcelles les plus précoces, P4 et P5, appartiennent au même vignoble (C, tableau 1). Ce qui pourrait les différencier, c'est le porte-greffe (*Gravesac*) qui engendrerait de la précocité.
Les différences statistiques entre parcelles pour chaque stade, ont montré une grande variabilité spatiale. A la floraison et lors de la fermeture des grappes, les différences semblent être associées au type de vignoble, en suggérant un possible effet de la gestion des pratiques viticoles et des porte-greffes sur la phénologie de la région.

3.2.3. Relations entre la phénologie du Tannat et l'accumulation thermique

L'analyse en composante principale (ACP) avec toutes les variables étudiés, a représenté 84,1 % de la variabilité totale. Les variables d'accumulation thermique par stade (DJ et IH), sont sur le premier axe (R>0,88), tandis que les stades phénologiques sont sur le deuxième (R>0,71).
Les stades phénologiques ont été corrélés significativement (R>0,82, p<0,01). L'emplacement des parcelles dans l'ACP a montré que P1 et P2 étaient situées près des variables, tandis que P7 était située à l'opposé des variables. Les parcelles les plus continentales (P8, 9 et 10), sont situées près des indices bioclimatiques selon les stades, et à l'opposé pour P4 et P5.
La figure 10 présente les résultats de la variabilité spatiale de la phénologie combinée avec l'accumulation thermique. Lors de la floraison, les parcelles avec les accumulations thermiques les plus fortes (>391 DJ, carré blanc), ne présentent pas de précocité. De la même manière, en fermeture de grappes, la parcelle avec la plus petite accumulation thermique (<700 DJ, carré noir), n'est pas la plus tardive.
La variation spatiale de la phénologie dans la région n'est pas assez marquée comme la variabilité spatiale de la température. Cela est certainement due à l'effet des différentes techniques culturales des différents vignobles, qui limitent l'effet du climat (van Leeuwen *et al.,* 2013). Cela peut expliquer le premier cas (P1), où la charge du raisin et la superficie foliaire exposée potentielle (SFEp) mettent en évidence un retard des stades.
Madelin *et al.* (2014) citent que les études de phénologie à méso-échelle sont

influencées par des autres facteurs en plus de la température (pratiques culturales, âge de la parcelle, porte-greffe, type de sol, clone du cépage, etc.) qui vont compenser ou atténuer l'effet thermique sur la phénologie de la vigne.

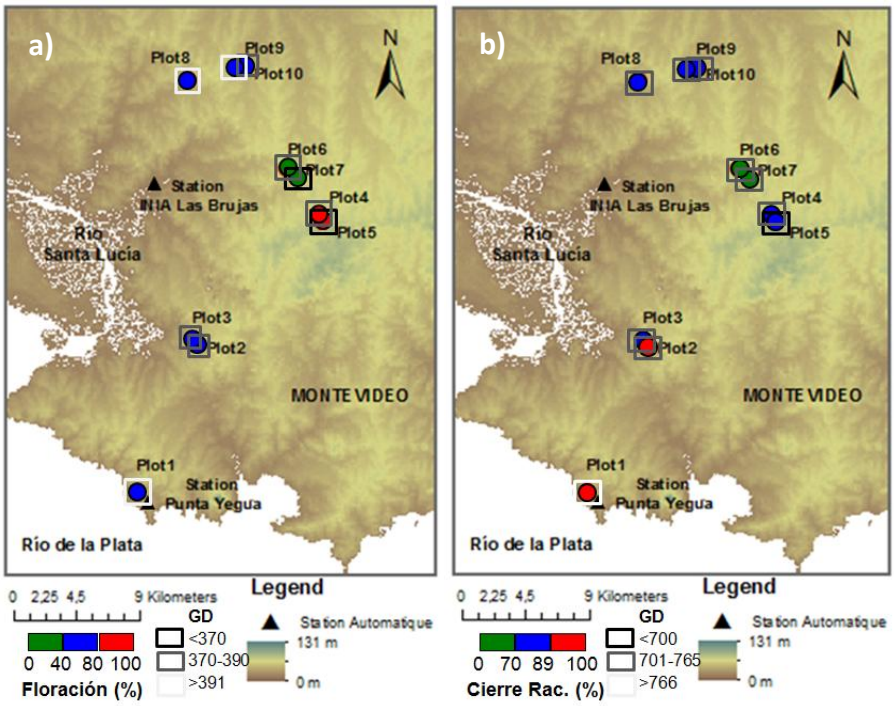


Figure 10. Variabilité spatiale de deux stades phénologiques (pourcentage de floraison **(a)** et fermeture de grappe **(b)**) et leur cumul thermique en Degré-Jours (DJ). Les couleurs différentes dans les pourcentages de stades (cercles), indiquent des différences statistiques (LSD Fisher ; $\alpha<0,05$). Les couleurs différentes dans l'accumulation thermique (carrés), indiquent des différences statistiques (Tukey ; $\alpha<0,05$).

3.3. CONCLUSIONS

La variabilité spatiale de la phénologie dans la région viticole du sud de l'Uruguay n'est pas aussi marquée que la variabilité spatiale de la température. Ceci est dû à l'effet de différentes pratiques culturales dans les vignobles de la région. Aucune tendance de précocité n'a été trouvée dans les parcelles avec une forte accumulation thermique. Dans la région, il existe d'autres facteurs non étudiés dans cette étude, qui peuvent êtres déterminants dans le développement du *Tannat*. Il est possible aussi que la différence thermique entre parcelles ne soit pas suffisante pour la plante pour montrer des différences de phénologie.

Il est envisageable de continuer des études d'interaction phénotype-environnement, afin d'évaluer quels facteurs sont déterminants dans la croissance et le développement du *Tannat*. Les propriétés du sol (profondeur, texture, stockage en eau) ainsi que les autres composants du climat, notamment la pluie, peuvent être des paramètres importants pour apporter des mesures de gestion du vignoble adaptées aux conditions méso-climatiques de la région.

CHAPITRE 4. COMPOSITION DU RAISIN DE TANNAT EN RÉPONSE À LA VARIABILITÉ SPATIALE DE LA TEMPÉRATURE DANS UNE RÉGION VITICOLE CÔTIÈRE

Les études de la distribution spatial des indices bioclimatiques adaptés à la vigne ont été utilisés afin d'évaluer la variabilité de la température des régions viticoles à macro-échelle (Smart et Dry, 1980 ; Jones et Davies, 2000 ; Tonietto et Carbonneau, 2004 ; Ferrer, 2007 ; Anderson *et al.,* 2012) et méso-échelle (Blanco-Ward *et al.,* 2007 ; Bonnefoy *et al.,* 2013 ; Hall et Jones, 2010).

À l'échelle d'une région viticole (méso-climat), la distribution spatiale des indices bioclimatiques comme les Degrés-Jours (Winkler *et al.,* 1974), l'indice Héliothermique d'Huglin (Huglin, 1978) et la température moyenne du cycle végétatif (Jones *et al.,* 2010), sont affectés par la proximité de surfaces en eau (océan, lac, rivière, ...) (Blanco-Ward *et al.*, 2007) et la topographie (Bonnefoy *et al.*, 2013 ; Jones *et al.*, 2010). Dans des régions viticoles côtières, et plus précisément en d'Afrique du sud, les études montrent un contraste physique entre la mer et la terre, produisant des circulations d'air locales importantes pour la vigne (Bonnardot *et al.*, 2005).

En ce qui concerne les interactions à méso-échelle entre les températures et le fonctionnement de la vigne, l'occurrence des conditions climatiques extrêmes et la réponse de la vigne à ces événements sont très impactant sur la qualité du raisin et du vin. Les occurrences des événements climatiques extrêmes comme le gel printanier (Madelin 2004 ; Quénol *et al.*, 2007 ; Bonnefoy *et al*., 2013) et les vagues de chaleur (Bonnefoy *et al*., 2013 ; Fourment *et al.*, 2014) dans les vignobles ont été évalués dans différentes régions viticoles et ils montrent une variabilité de la température très forte entre parcelles.

Les études qui combinent le climat et la réponse phénologique de la vigne montrent un avancement phénologique dans les situations plus chaudes (Calame *et al.*, 1977 ; Tesic *et al.*, 2001) et une grande diversité de réponses en terme de composition du raisin et notamment du vin (Nicholas *et al.*, 2011 ; Barnuud *et al.*, 2014).

Les réponses directes et indirectes de la composition primaire et secondaire du raisin à la température sont connues (Sadras *et al.*, 2012). Des températures élevées durant la période de maturation de la baie, causent une forte accumulation de sucres et une dégradation des acides (Jackson, 2008 ; Kobashayi *et al.*, 2011), due à la consommation d'acide malique (Jackson et Lombard, 1993), et altèrent la synthèse et l'accumulation en polyphénols (Bergqvist *et al.*, 2001 ; Mori *et al.*, 2007 ; Tarara *et al.*, 2008 ; Hakimi et Reynolds, 2010 ; Nicholas *et al.*, 2011). Le stress thermique durant la véraison peux engendrer la dégradation et l'inhibition de l'accumulation en anthocyanes (Mori *et al.*, 2007 ; Tarara *et al.*, 2008).

En Uruguay, le *Tannat* est considéré comme le cépage le plus adapté aux conditions locales. Ce cépage se caractérise par un grand potentiel œnologique car ses niveaux élevées en anthocyanes, tannins et acidité (González-Néves *et al.*, 2006) produisent des vins d'une grande originalité et typicité.

L'objectif de ce travail a été d'évaluer la réponse du *Tannat* à la variabilité spatiale de la température. En effet, l'étude se concentre sur la relation entre la variabilité spatiale de la température à méso-échelle et la composition du raisin en vendange, pour la région côtière du sud de l'Uruguay.

4.1. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Description et sélection du site : Un réseau de dix parcelles (P1 à P10) sur cinq vignobles commerciaux de la région viticole côtière du sud de l'Uruguay a été utilisé afin d'évaluer la composition du *Tannat* en vendange. Le système de conduite est l'espalier et le but de production est l'élaboration de vin de qualité (VCP : *Vino de calidad preferencial* – INAVI, 2016).

Données climatiques et analyses : Les données climatiques (1972-2015) de la station météorologique de l'INIA Las Brujas (INIA, 2016) ont été utilisées pour décrire le macroclimat de la région. Les données des capteurs de température « TinyTag Talk 2 » (Gemini Data Loggers Ltd. UK) installés dans chaque parcelle ont été utilisées pour décrire le méso-climat (température horaire). Le climat des trois saisons a été caractérisé a partir du calcul des indices bioclimatiques (Degrés-Jours – DJ - et Indice Héliothermique - IH) du 1er septembre au 28 février. Les températures du janvier et février ont été analysées afin d'évaluer la variabilité spatiale de la température à une échelle fine durant la période de maturation.

Échantillonnage des baies et analyses : Le prélèvement de 250 baies de *Tannat* (méthodologie de Carbonneau *et al.,* 1991) a été effectué lors des vendanges (fin février, début mars) sur 30 souches dans chaque parcelle. Nous avons mesuré les totaux de sucres (g/l, par réfractométrie), l'acidité totale (g H_2SO_4/l, par titrage) et le pH (tensiométrie), selon les protocoles de l'OIV (1990). Les estimations du potentiel phénolique ont été réalisées par la méthode de Glories et Augustin (1993) avec un spectrophotomètre Shimadzu UV-1240 MINI.

Analyse statistique : une procédure uni-variée (ANOVA) a été utilisée afin de déterminer les différences statistiques du climat et la composition du raisin entre parcelles (test de Tukey, α = 5%).Une analysemulti-variée (ACP) a été faite afin d'analyser les corrélations significatives entre température et composition. Avec les variables fortement corrélées, l'analyse de cluster a été faite pour agrouper de parcelles.

4.2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les moyennes des données à long terme (1972-2015) de la station INIA Las Brujas, ont montré que la région présente des conditions chaudes en été (28,1 °C de température maximale en janvier) et des conditions douces en hiver (5,6°C de température minimale en juillet) avec des précipitations régulières durant l'année (Fig. 11a). Ces conditions

climatiques correspondent à la classe "*Cfa*" selon la classification climatique de Köppen, c'est-à-dire, un climat sub-humide chaud tempéré. Aucune tendance significative en termes de température ou de précipitations n'a été trouvée dans les valeurs annuelles pour cette région (Fig. 11b).

4.2.1. Variabilité saisonnière du climat

Le cycle végétatif de la vigne en Uruguay commence en septembre et finit mi-mars. À partir des données mensuelles de température et de précipitations de chaque saison (de septembre à mars), il est constaté que la saison 2012 est caractérisée par un été chaud (23,7 °C de température moyenne en février), et 2013 par un printemps chaud (16,9 °C température moyenne en octobre). 2014 a été très humide (469 mm en janvier et février). Ces conditions climatiques en relation avec le cycle de la vigne peuvent influencer la composition finale du raisin.

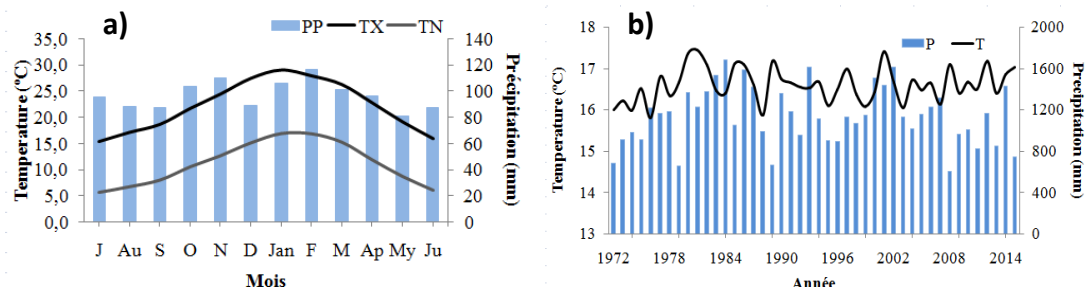


Figure 11. a) Températures mensuelles (ºC) minimales (TN) et maximales (TX) et précipitations (P en mm) (moyenne de la période 1972-2015) et **b)** Température moyenne annuelle (T en °C) et précipitations (P en mm) de 1972 à 2015 à la station INIA Las Brujas (INIA, 2016).

Durant la période de maturation (janvier et février), 2012 a été la saison la plus chaude avec des températures maximales de 1,2 ºC et 1,3 °C au dessus de la moyenne, tandis que la température minimale moyenne (Indice de fraîcheur de nuits) a été 1,5°C au dessus de la moyenne. À l'inverse, 2014 a été la plus fraîche, spécifiquement en février avec une température maximale de 1,6 ºC en dessous de la moyenne. Ainsi, la période de maturation a été très humide, avec des précipitations totales de 469 mm en janvier et février ; i.e. le double de la moyenne et 300 mm de plus que 2012 et 2013. La particularité de 2013, en comparaison aux deux autres saisons est liée aux conditions très sèches en véraison : 80 mm en dessous de la moyenne et 330 mm de moins qu'en 2014.

4.2.2. Variabilité spatiale de la température

Les différences statistiques des indices bioclimatiques entre parcelles ont été montrées dans le chapitre précédent (3.2.1.). La P5 est la parcelle la plus fraîche en terme d'accumulation thermique exprimée tant en DJ qu'en IH (R^2=0,81 ; *P*=0,0001 et R^2=0,95 ; *P*<0,0001 respectivement). Ainsi, la différence spatiale la plus forte a été trouvée entre

la P1 et la P5 : 156 unités de DJ en moyenne. Les différences entre parcelles ont été plus fortes que celles entre saisons. En effet, la différence saisonnière la plus forte atteint 70 unités de DJ pour P9 (à 28,6 km du Río de la Plata) et 36 unités d'IH pour P6 (à 21,9 km de la mer) entre la saison la plus chaude (2013) et la plus fraîche (2012).
En outre, l'effet des différences de stress thermique sur le développement des arômes et des couleurs entre parcelles a été évaluée en utilisant la quantité de jours et d'heures avec des températures au dessus de 35 ºC (NDT35 et NHT35) au tour de la maturation de la baie. Les résultats ont montré des différences statistiques entre parcelles : P8 et P9 ont subies 8 jours en moyenne avec une température supérieure à 35 ºC, atteignant 25,7 et 27 heures de stress thermique pour la vigne, respectivement. En raison des conditions chaudes pendant la nuit et le stress thermique inférieur durant la journée, la P1 est la parcelle avec la plus modeste amplitude thermique journalière.

4.2.3. Composition du raisin de Tannat en vendange

Les vendanges des trois saisons étudiées ont eu lieu sur une période de trois semaines (entre le 18 février et le 7 mars). La composition et l'état sanitaire des raisins issus des parcelles ont été différents lors des trois vendanges. Les valeurs moyennes des composantes du raisin de *Tannat* ont montré que P1 a été la parcelle la plus variable entre les millésimes, notamment en sucres, acidité et polyphénols (potentiel en anthocyanes extractibles – ApH3,2 et richesse phénolique – A280), tandis que les parcelles les plus équilibrées pour l'élaboration du vin rouge ont été les P2, 4, 5 et 6, avec des valeurs supérieurs en sucres (R^2=0,62 ; P<0,0001), potentiel en anthocyanes extractibles (R^2=0,35 ; P=0,0008), richesse phénolique (R^2=0,34 ; P<0,01) et moindre acidité (R^2=0,77 ; P<0,0001).
Pour toutes les variables de composition du raisin, deux composants ont été analysées en raison des variabilités spatiales et temporelles. Les parcelles distantes de 18 km et 22 km de la mer ont montré des valeurs supérieures en taux de sucres (en rouge, Fig. 12), même si la variabilité dans la région et entre vignerons est assez forte. Dans ces parcelles, la quantité en sucres a été au moins de 211 g/l (en 2014) et la valeur d'ApH3.2 a été au moins de 941 mg/l (en 2012).

4.2.4. Réponse de la composition du raisin de Tannat à la température

Les corrélations et probabilités de l'ACP pour les trois millésimes ont montré que la température sur le cycle végétatif est l'indicateur qui affecte significativement le plus la composition du raisin, avec des corrélations significatives entre l'IH et le sucre (r=-0,62 ; P=0,05), ApH1 (r=-0,69 ; P=0,03) et A280 (r=-0,60 ; P=0,07). Les températures extrêmes ont eu aussi des fortes corrélations avec la composition du raisin, comme le NH35 et les métabolites secondaires, notamment ApH1 (r=-0,58 ; P=0,08) et A280 (r=-0,56 ; P=0,09).
En 2013, l'ACP a atteint la valeur la plus élevée de variabilité totale (82,5 %) en comparaison avec les deux autres millésimes (75,7 % en 2012 et 73,6 % en 2014). Les principaux contributeurs à la composante 1 étaient des mesures de températures

pendant la période de maturation (contribution positive à C1) (jMaxT, jMinT, TAm, NH30 et NH35) et les métabolites secondaires de la baie (ApH1, ApH3,2 et A280) (contribution négative à C1). Les principaux contributeurs à la composante 2 étaient IH et CNI (positive) et les métabolites primaires comme pH et TA (négative).

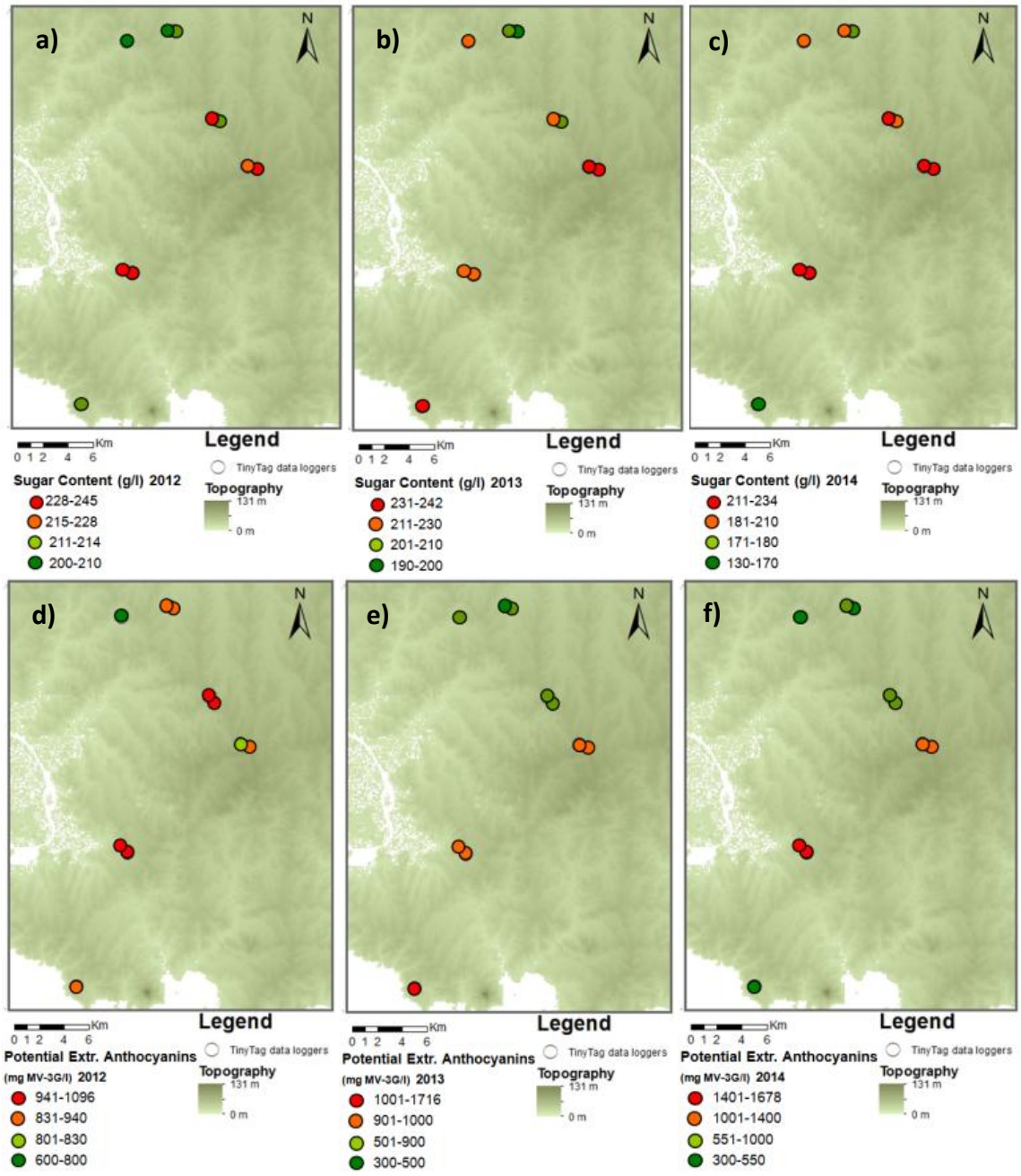


Figure 12. Composition du raisin de *Tannat* en vendange issu des parcelles : Sucres en 2012 **(a)**, 2013 **(b)** et 2014 **(c)** et le Potentiel en anthocyanes extractibles en 2012 **(d)**, 2013 **(e)** et 2014 **(f)**. Les couleurs représentent les résultats du test Tukey (α = 5 %).

Les variables climatiques du CP1 ont eu une forte corrélation avec les métabolites secondaires de la baie (*r*>0,70), d'une manière positive avec les variables concernant les températures minimales (jMinT, fMinT et CNI) et négativement avec les températures maximales (jMaxT et fMaxT), TAm et le NH30.
Pour les trois millésimes, les analyses multi variées sur la composition du *Tannat* en vendange et les variables thermiques ont montré au moins trois caractéristiques : (1) la réponse du *Tannat* à la variabilité spatiale de la température varie sur les trois saisons, (2) les corrélations entre la composition et la température augmentent avec des conditions de maturation sèches, et (3) les corrélations entre les métabolites secondaires et la température sont plus fortes que celles des métabolites primaires et la température.
Les métabolites secondaires ont été plus corrélées avec les variables climatiques comme IH (*r*>-0,6) et NHT35 (*r*>-0,56), en montrant plus de sensitivité que les métabolites primaires dans la région. Sur l'analyse des corrélations par saison, des résultats similaires ont été trouvés, avec des plus fortes corrélations en 2013.
Les anthocyanes de *Tannat* en vendange ont été supérieurs dans les baies issues des parcelles plus fraîches durant la nuit (parcelles à 18,3 km du Río de la Plata) en comparaison à celles plus chaudes. Cela est en accord avec les résultats de Mori *et al.* (2005) et Barnuud *et al.* (2014). En effet, les niveaux plus élevés en A280 ont été trouvés dans les baies issus des parcelles à 18,3 km de la mer.
Même si la qualité des vendanges n'était pas le cœur du travail, elle varie énormément d'une année sur l'autre. Les niveaux les plus élevés en sucres et ApH1 des baies de *Tannat* dans la région ont été obtenus en 2012, le millésime le plus froid de l'étude en termes d'accumulation thermique (DJ et IH). Cela contredit les résultats trouvés par Baciocco *et al.* (2014) à Bordeaux (France). Des résultats divergents pourraient être expliqués éventuellement car le climat à Bordeaux ne correspond pas à la même classe du Köppen-Geiger qu'en Uruguay (été tempéré à Bordeaux vs. été chaud en Uruguay; *Cfb* et *Cfa* respectivement) et cette classification d'accumulation thermique est critique pour la qualité du vin.

4.4. CONCLUSIONS

Ce chapitre a eu pour objectif d'étudier la relation entre la variabilité spatiale du climat et la composition du *Tannat*. Il semble que la composition finale du *Tannat* répond à la température et cette relation est dépendante de l'année et est plus forte avec les métabolites secondaires. Les résultats révèlent que dans un millésime particulier (2013), les températures et la composition de la baie représentent 82,5 % de la variabilité totale de la région. Le nombre de jours avec des températures au dessus 35 ºC et l'amplitude thermique sont les composantes thermiques qui expliquent la variabilité spatiale de la température, avec les valeurs les plus extrêmes près ou loin de la côte. Le potentiel en anthocyanes extractibles et la richesse phénolique du raisin de *Tannat* en vendange sont les métabolites les plus affectés par la variabilité spatiale de la température.

Dans les conditions de l'étude, la réponse du *Tannat* à la température est affectée par d'autres variables climatiques et cette réponse est plus forte dans des conditions sèches de maturation que dans des conditions chaudes ou froides. Avec la forte variabilité saisonnière du climat en Uruguay, et plus précisément de la variabilité interannuelle des précipitations, il est très important de déterminer quand le comportement de la vigne est plus sensible au climat et ainsi comment le viticulteur peut avec des pratiques culturales intervenir afin d'assurer la qualité du raisin.

La connaissance de la variabilité spatiale de la température et des relations avec la composition du raisin en vendange, contribue à améliorer la gestion du vignoble afin de modifier les conditions du micro-climat de la canopée pendant la période de maturation. Ces résultats conduisent à une enquête plus approfondie sur l'adaptabilité des vignobles du sud de l'Uruguay à la variabilité du climat dans le contexte du changement climatique.

CHAPITRE 5. PERCEPTIONS ET RÉPONSES À LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE DANS UNE RÉGION VITICOLE D'URUGUAY

La vulnérabilité d'un agro-écosystème est définie comme la somme de l'exposition physique, la sensibilité et la capacité adaptative (GIEC, 2007 et 2014). L'exposition physique fait référence aux conditions climatiques, souvent défavorables, que subit un agro-écosystème : températures défavorables pour le bon développement et la bonne croissance d'une culture, précipitations déficitaires ou en excès, intensité et vitesse du vent élevés. La température favorable durant le cycle végétatif de la vigne est de 25 ºC pour la photosynthèse (Champagnol, 1984) et entre 500 mm et 750 mm de pluies sont nécessaires pour le fonctionnement de la plante (Jackson, 2008).

La vulnérabilité de la vigne s'analyse sur une exposition physique défavorable : températures extrêmes (par exemple, température supérieure à 35 ºC), précipitations déficitaires (stress hydrique pendant la maturation du raisin), ou combinaison entre températures extrêmes et radiation directe ou températures extrêmes et différents régimes hydriques (Bergqvist *et al.,* 2001 ; Spayd *et al.* 2002 ; Goto-Yakamoto *et al.*, 2011 ; van Leeuwen *et al.*, 2008).

La sensibilité d'un agro-écosystème s'étudie à travers l'impact de certaines conditions environnementales. Concernant la vigne, des travaux abordent la sensibilité de la plante en fonction des variables climatiques (Barbeau *et al.*, 2014). La sensibilité est déterminée par des indicateurs de croissance et de développement (stades phénologiques), de production finale et de qualité des raisins et du vin. La capacité adaptative d'un agro-écosystème peut être évaluée par l'analyse des capacités des producteurs à s'adapter aux risques climatiques. C'est le composant "humain" de l'équation de vulnérabilité et dépend de nombreux facteurs : le type de producteur (familial ou entreprise), leur capacité à s'informer, l'accès au ressources, la connaissance de la culture qu'il exploite (Grothmann et Pratt, 2005 ; Yaro, 2013). Selon van Leeuwen *et al.* (2013) la capacité d'adapter la gestion du vignoble des viticulteurs a provoqué une diminution des impactes du changement climatique sur la vigne.

La perception du changement climatique par les producteurs et les techniciens de la filière viticole fait partie de la capacité adaptative du système (Grothmann et Pratt, 2005). À une échelle globale, la perception du risque associé au changement climatique pourrait aider à l'adaptation (Battaglini *et al.*, 2009 ; Yaro, 2013). À une échelle locale, la perception des viticulteurs à la variabilité spatiale du climat est primordiale pour une gestion du vignoble adaptée aux conditions locales.

Ce chapitre a pour objectif de déterminer la perception de la variabilité climatique que les viticulteurs ont dans la région viticole du sud de l'Uruguay, ainsi que la vulnérabilité des vignobles a travers le développement de matrices permettant de systématiser l'information. Dans cet optique, la propre connaissance des viticulteurs et des conseillers sera la base pour apporter des mesures d'adaptation au changement climatique à moyen et long terme (Boissière *et al*., 2013).

5.1. MATERIELS ET MÉTHODES

La méthodologie est composée en trois étapes :

Partie 1 – Evaluation de la capacité adaptative et de la perception. Elaboration et exécution des enquêtes : des enquêtes semi-directives ont été proposées aux principaux acteurs de la filière viticole : huit viticulteurs et trois conseillers de la région selon le protocole développé dans le projet TERADCLIM (Neethling *et al.*, 2016).
Les viticulteurs enquêtés sont les propriétaires des vignobles situés dans les départements de Canelones et Montevideo, et leur objectif de production est varié (vin fin et vin de table). Ils représentent 4,7 % du total des producteurs dans la région (193 caves en 2015, selon INAVI, 2016). Les conseillers enquêtés sont des ingénieurs professionnels qui travaillent dans la région et ont une large expérience dans le domaine du conseil.
A partir des enquêtes, des informations sur leurs pratiques viticoles ont été collectées ainsi que leur évolution durant la période 1994 à 2014. Les enquêtés ont classifié les millésimes dans deux groupes : "bon millésime" et "mauvais millésime". Pour finir, la perception de la variabilité et du changement climatique des acteurs a été évaluée.

Partie 2 – Développement des matrices théoriques de vulnérabilité : afin de déterminer la vulnérabilité des systèmes de production viticoles de la région, les matrices ont été élaborées selon la méthodologie suggérée par Cobon *et al.* (2009), concernant les menaces climatiques qui affectent couramment la vigne dans la région. Quatre facteurs clés du fonctionnement de la vigne ont été pris en compte : rendement, phénologie, composition du raisin en vendange (composition primaire et secondaire) et état sanitaire.

Partie 3 – Proposition de possibles mesures d'adaptation à la variabilité climatique dans la région : à partir des résultats de perception et de vulnérabilité, nous avons proposé des un panel de mesures d'adaptation de la vigne à la variabilité climatique. Ces mesures ont été proposées en fonction des résultats des enquètes. Suivant leur « savoir-faire », les enquêtés ont établis des décisions quotidiennes sur la gestion de leur vignoble. Ces mesures sont ainsi présentées par des matrices, avec la méthodologie de Cobon *et al.* (2009).

5.2. RESULTATS ET DISCUSSION

5.2.1. Evolution des pratiques viticoles et le rôle du climat en tant que déterminant du changement

Les enquêtes réalisées auprès des acteurs de la région ont permis d'acquérir des informations sur la gestion de leur vignoble et l'évolution des décisions en fonction des paramètres climatiques. La gestion de la canopée (effeuillage, rognage, etc.), le travail

du sol et l'utilisation des produits phytosanitaires ont été les pratiques que les viticulteurs ont le plus modifiées ces dernières années.
L'évolution des traitements phytosanitaires a été très importante durant cette période. L'évolution des molécules des principes actifs et les normes mises en place par le Ministère de l'Agriculture (MGAP) ont permis de développer des normes de production intégrées et une sensibilisation des traitements par des objectifs préventifs et des traitements spécifiques pour résoudre les problèmes sanitaires des maladies ponctuelles (par ex., des pourritures de *Botrytis* spp.).
Actuellement, la gestion des phytosanitaires est faite pour prévenir les maladies et l'usage de produits sélectifs est réservé aux maladies de grappes (87,5 % des cas), l'utilisation d'insecticides est presque nulle et on peut noter une amélioration de l'efficacité des traitements avec le contrôle du volume en eau en fonction des systèmes de conduites. 43 % des cas ont montré que le climat est le facteur clé dans l'évolution de gestion de maladies dans le vignoble.
Les activités annuelles du vignoble, hors contrôle sanitaire, (gestion du sol, de la canopée, éclaircissage de grappes, etc.) ont connu une évolution vers des critères de production (contrôle de la charge) et de qualité (changement des standards de composition du raisin en vendange), en fonction de la disponibilité de la main d'œuvre et finalement vers les exigences des consommateurs (changement ou amélioration du produit final). Hadarits *et al.* (2010) ont montré des résultats similaires. Les résultats issus d'enquêtes ont montré une certaine sensibilisation au climat dans la région du Maule en Chili, mais ce n'était pas un facteur crucial pour le changement des prises de décisions. Le marché, les accords institutionnels et aussi la main d'œuvre sont des facteurs plus déterminants (Hadarits *et al.*, 2010).
Les stratégies de gestion des producteurs durant le cycle végétatif de la vigne sont basées sur ces facteurs, et donc, l'adaptation des techniques en fonction du climat ne semble pas être prioritaire. Plusieurs viticulteurs attribuent ce fait au manque de fiabilité des prévisions météorologiques. Ces constatations sont similaires aux résultats des travaux de Yaro (2013) qui a également montré que ce sont des facteurs non climatiques qui influence l'adaptation des pratiques des viticulteurs.

5.2.2. Classification des millésimes et ses déterminants

Les résultats des enquêtes concernant les bonnes et mauvaises années pour l'élaboration des vins, ont été classifiées. (Tableau 3). Les enquêtés ont qualifiés les mauvaises années selon des conditions défavorables, surtout durant la période de maturation du raisin (pluies importantes en février et mars). Pourtant le climat est déterminant durant la vendange avec des possibilités de perte de rendement et de qualité. Les années avec des événements extrêmes particuliers (par ex., la grêle de 2013) ont été qualifiées dans les deux catégories (bon et mauvais), selon l'intensité des dégâts dans la région.

Cette classification a mis en évidence l'importance du climat pour la qualité finale du vin, en tant que facteur principal de la classification quand les conditions climatiques ont été défavorables pour une bonne maturation des baies.
Plusieurs auteurs abordent l'importance du climat sur la classification des millésimes. Jones et Davis (2000) ont analysé la pertinence de la variabilité interannuelle dans le prix final du vin, par exemple, à Bordeaux (France). Dans ce travail, 62 % de la variabilité totale d'évaluation de qualité est expliquée avec seulement quatre variables climatiques (niveau d'insolation, nombre de jours avec des températures au dessus 30 ºC entre floraison et véraison, nombre de jours avec des températures au dessus 30 ºC en véraison et pluies durant la maturation). Baciocco *et al.* (2014), toujours dans la région bordelaise, ont identifié le climat comme un facteur clé de différentiation de qualité du vin. Pour ces auteurs, la température moyenne maximale est un important discriminateur des bons et mauvais millésimes.

Tableau 3. Classification de millésimes (très bon, bon, neutres, mauvais et très mauvais) pour l'élaboration du vin selon les enquêtés (période de 2000 à 2014).

Classification	Années[+]	Caractéristiques
Trés bons	2000	Maturations complètes, avec faibles pluies pendant la maturation.
	2002	
	2004	*Grand déficit hydrique. Dans quelque cas avec blocage de la maturation.
	2011*	
Bons	2006	*Bon pour les vignobles pas touchés par la grêle
	2009	
	2013*	
Neutres	2010	
Mauvais	2003*	*Gel tardif en printemps avec dégâts
	2008[+]	[+]Pluies à la fin du cycle
Très mauvais	2001	Toutes ces années se caractérisent par des pluies durant la maturation et en conséquence, des problèmes sanitaires (pourriture des raisins)
	2005	
	2012*	
	2014	*occurrence des pluies intenses (plus de 10 jours consécutifs)

[+]Les producteurs et conseillers ne se souviennent pas des millésimes qui précédent 2000

5.2.3. Perception de la variabilité locale du climat, Vulnérabilité et Adaptation

Les résultats des enquêtes ont montré une perception des producteurs de la région à la variabilité locale du climat, mais surtout, à la variabilité annuelle (interannuelle). Ils ont souligné aussi les événements extrêmes de ces dernières années (fortes pluies avec rafales de vent, grêles, etc.). 71 % des cas, considèrent que ces événements sont plus fréquents.
Bossière *et al.* (2013) définissent les "perceptions locales" comme la manière dont les viticulteurs identifient et interprètent les observations et les concepts. Même si le

changement climatique peut apporter des conditions différentes de leur expérience, la connaissance locale et la perception restent la base de toutes réponses locales. Dans les enquêtes, la perception du changement climatique n'était pas évidente. Malgré la connaissance des enquêtés sur l'information de la communauté scientifique sur le changement climatique en Uruguay, un certain scepticisme ressort dans leur réponse.

Il émerge l'existence des menaces climatiques (hors changement climatique) dans la région qui affectent les composants de la plante et se traduisent comme un risque pour la production du raisin pour l'élaboration du vin. Ces menaces climatiques ont été définies comme les facteurs clés de mauvais millésimes de la série étudiée (Tableau 3).

De la même manière, à partir des enquêtes il en ressort l'existence des menaces non climatiques qui affectent aussi les composants de la plante : coût de la main d'œuvre, prix final du raisin, restrictions commerciales du vin stocké dans la cave, compétitivité d'un produit. Ces facteurs déterminent aussi la vulnérabilité des systèmes de production analysés. Des travaux similaires ont montré que la vulnérabilité des systèmes viticoles est le résultat de facteurs climatiques et non climatiques (Belliveau *et al.*, 2006 ; Hadarits *et al.*, 2010 ; Pérez-Catalá, 2013).

De la matrice de vulnérabilité surgissent des mesures d'adaptation des vignobles que les acteurs appliquent dans leur vignoble. Ces mesures d'adaptation sont identifiées selon leur moment d'action (anticipés ou réactives) et leur durée (tactiques ou stratégiques) (Belliveau *et al.*, 2006 ; Neethling *et al.*, 2016). Les mesures tactiques sont à court terme et répondent à la variabilité journalière du climat. Quelques unes sont anticipatrices (Belliveau *et al.*, 2006), comme par exemple, irriguer les parcelles pour diminuer le stress thermique durant l'été et éviter le blocage de la maturation du raisin (Flexas *et al.*, 2010) tandis que quelques autres sont réactives, par exemple, l'application de Cyanamide pour homogénéiser le débourrement dans des situations d'hivers doux (faible accumulation d'unités de froid) (Martin et Dunn, 2000).

Les mesures d'adaptation stratégiques à long terme peuvent être anticipatrices, comme le choix de porte-greffe plus tolérant à l'affixe radiculaire et donc les excès hydriques (Koundouras *et al.*, 2008) ou le choix d'autres lieux pour l'implantation des parcelles, par exemple, avec des situations topographiques élevées pour éviter les dégâts de gels. Une mesure stratégique réactive se produit quand il y a une possibilité pour une année donnée, quand les finances permettent d'investir sur un système pour diminuer les risques (Belliveau *et al.*, 2006) comme par exemple, avec l'achat d'un équipement d'application phytosanitaire afin d'optimiser l'usage des produits.

Ces enquêtes ont fait ressortir élément crucial pour réduire la vulnérabilité, et cela concerne la distribution des vignobles dans la région. Belliveau *et al.* (2006) soulignent cette capacité comme une stratégie d'adaptation de diminution de risque qui permet au viticulteur d'avoir de la diversité de raisins issus de différents lieux. 67 % des viticulteurs possèdent leur vignoble dans différents secteurs de la région. Les événements climatiques extrêmes de ces dernières années dans la région ont montré que la répartition spatiale des vignobles dans différents endroits de la région a permis de réduire les risques pour les viticulteurs. Les épisodes de grêles de janvier 2013 ont touché plusieurs vignobles dans la région mais ils n'ont pas affecté 100% des viticulteurs

car certains ont pu limiter les dégats car ils n'ont pas leur exploitation d'un seul tenant. Ces constatations sont aussi faites pour les précipitations, avec la grande variabilité spatiale qui peut affecter la qualité finale des baies si celles-ci se produisent en période de maturation ou pendant les vendanges.
A moyen et long terme, les mesures d'adaptation concernent principalement le choix des cépages et les objectifs productifs. Dans cette optique, les viticulteurs proposent de ne pas prendre le risque de produire un unique cépage, car en cas de conditions défavorables ils peuvent perdre la totalité de la production.
Une manière de réduire la vulnérabilité dans les cas d'une faible capacité adaptative (non observé dans la matrice), est le groupement de producteurs. Un exemple peut être le groupe CREA, dont 73 % des enquêtés font parties. Le groupement leur apporte le conseil technique, l'échange d'information et l'accès aux machineries. Ce dernier est de plus en plus courant dans la région. Plusieurs viticulteurs s'inquiètent sur le coût élevé de la main d'œuvre et le manque d'adaptation des systèmes de mécanisation de leurs vignobles, par exemple, pour des systèmes de conduction en lyre. Ils soulignent la nécessité d'améliorer le système de production afin de pouvoir intervenir dans leurs parcelles avec les machines spécifiques pour la gestion des vignobles.

5.3. CONCLUSIONS

Les viticulteurs du sud d'Uruguay ont des critères spécifiques pour la prise de décisions sur la gestion du vignoble. Cela fait partie de la connaissance locale. Ces critères ont évolué durant les 20 dernières années et ceci est dû à la nécessité de modifier la qualité du raisin, de contrôler l'équilibre de la plante, de suivre les exigences des consommateurs et aussi suivant la disponibilité de la main d'œuvre.
Cependant, le climat est rarement perçu comme un facteur clé pour la prise de décision durant le cycle végétatif de la vigne et encore en moindre mesure, pour les décisions à moyen et long terme. Toutefois, les viticulteurs connaissent la variabilité interannuelle du climat, ainsi que le rôle du climat sur les caractéristiques de la qualité du vin au cours d'années particulières.
La perception du changement climatique, par les acteurs de la filière, est faible. Ils assument le fait que les effets du changement climatique se produiront dans le futur et donc à long terme. Mais même s'ils sont très sensibles à la variabilité interannuelle du climat, la plus part d'entre eux n'identifient pas cette variabilité dans un contexte de changement climatique. Cela peut s'expliquer par la faible diffusion locale des impacts dans la région (augmentation de la variabilité, phénomènes ENSO, etc.) en comparaison à la diffusion internationale (augmentation des températures, sécheresses extrêmes et prolongés, etc.). Cela s'explique également par le fait que la viticulture uruguayenne n'est pas soumise à des effets extrêmes comme d'autres régions viticoles où l'augmentation des températures, la diminution des ressources en eau, a déjà un impact important sur la viticulture (Quénol *et al.*, 2014).
Il a été possible d'obtenir des réponses d'adaptation claires et concises par rapport à des phénomènes spécifiques qui affectent la région, perçus par les acteurs comme

risque pour la production des raisins de qualité. Les mesures d'adaptation tactiques à court terme se réfèrent à l'équilibre "source-puits" de la vigne afin d'obtenir du raisin de qualité pour l'élaboration du vin. Les mesures d'adaptation stratégiques à moyen et long terme se réfèrent à l'implantation des vignobles, à la sélection de cépages et porte-greffes et à la distribution des systèmes viticoles au sein de la région.
Ce travail apporte des outils pratiques de gestion par rapport aux menaces climatiques qui sont perçues par les acteurs de la région. Cette connaissance peut être intéressante pour les décideurs de politiques publiques sur l'adaptation au changement climatique dans la région.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les études scientifiques sur les impacts actuels et futurs du changement climatique sur l'agriculture ont pris une grande importance, ainsi que les études qui déterminent les mesures d'adaptation des cultures. Ces mesures se basent sur l'analyse des risques auxquelles font face les systèmes de production, c'est-à-dire de leur propre vulnérabilité définit comme lien entre l'exposition physique, la sensibilité de la culture et la capacité adaptative apportée par les producteurs (GIECC, 2007 et 2014). Ce travail a eu pour objectif de définir la variabilité du climat actuel des vignobles dans la région côtière du sud de l'Uruguay, d'évaluer les possibles impacts sur la vigne et d'apporter des réponses d'adaptation dans un contexte de changement climatique.

Cette thèse contribue à la connaissance de la principale région viticole du pays.

L'influence du Río de la Plata sur le climat local et son impact sur les vignobles de Tannat a été démontrée. Cela pourrait être mis en valeur pour mettre en évidence l'effet de la brise sur les vins comme cela a été fait il y a quelques années en Afrique du Sud dans les vignobles de Stellenbosch (Bonnardot *et al.*, 2014). La variabilité spatiale de la température est définie par l'influence du Río de la Plata, les conditions topographiques et la distance de la mer comme déterminants du comportement thermique dans la région. À une échelle plus fine, le phénomène de la pénétration de la brise de mer et son effet sur l'évolution thermique durant la journée affecte la physiologie de la vigne. C'est le Río de la Plata qui est l'un des principaux composants de la région viticole du sud d'Uruguay.

Le cépage *Tannat* est emblématique en Uruguay. Il est considéré comme bien adapté aux conditions locales d'implantation. Son comportement dans cette région côtière résulte de plusieurs facteurs (type de sol, topographie, pluviométrie, etc.), en plus de la variabilité locale de la température. La sensibilité que montrent les vignes (mesurés indirectement) aux différentes conditions thermiques n'est pas évidente ; une position plus continentale des parcelles ne montre pas des vignobles plus précoces ou des raisins plus concentrés en sucres.

Lors de l'analyse de dix vignobles de *Tannat* pour quatre stades phénologiques (floraison, nouaison, fermeture de grappes et véraison), on a pu constater que la variabilité spatiale de la température n'est pas suffisante pour influencer la phénologie. Les porte-greffes utilisés et la gestion des vignobles, ont une forte influence qui limite l'impact de la température. Inversement, ces différences de température sont corrélées avec les métabolites secondaires du raisin à la vendange (anthocyanes et phénols). La réponse de la vigne à la température, expliquée dans ce cas par la composition, est différente sur les trois millésimes de l'étude et est liée aux conditions climatiques générales pendant la maturation des baies (thermiques et hydriques).

L'évaluation de la perception et de l'adaptation réalisée dans cette thèse a apporté une perspective complémentaire à l'analyse agronomique et climatique. Les principaux acteurs de la région (viticulteurs et conseillers) connaissent la variabilité locale du climat et la variabilité interannuelle. Ils ont bien identifiés les aspects du climat qui jouent favorablement et défavorablement pour la qualité des vendanges. Cependant, d'une manière générale, le climat n'as pas un rôle prépondérant dans la prise de décision. D'une manière moins consciente, le climat (et surtout les précipitations) joue un rôle fondamental dans la gestion du vignoble par le producteur. Dans cette optique, la vulnérabilité des vignobles a une composante sociale et économique qui est supérieure à la composante climatique.

L'évolution des pratiques viticoles durant les 20 dernières années, a permis d'identifier la connaissance locale en tant que point de départ pour fournir des mesures d'adaptation à la variabilité du climat dans la région. Les stratégies les plus récurrentes selon les enquêtes sont : à court terme, la gestion sanitaire ; à moyen terme, la gestion de la canopée afin d'atteindre un équilibre correcte pour chaque système de production et donc masquer l'impact du climat et à long terme, plusieurs producteurs analysent la distribution de leur vignoble dans la région afin de diminuer le risque lié aux événements climatiques extrêmes.

La thèse apporte une méthodologie d'étude interdisciplinaire.

La méthodologie de l'étude a permis d'aborder de manière systémique, les trois facteurs de la vulnérabilité pour les systèmes de production : le climat local, son impact sur une culture pérenne et la capacité adaptative des acteurs de la filière. Cette méthodologie a permis d'avoir une vision globale des systèmes viticoles de la région.

Le terroir et la vigne sont des systèmes complexes affectés par plusieurs facteurs, quelques uns sont quantifiables tandis que d'autres ne le sont pas. Cette étude a essayé de montrer la variabilité présente dans cette région que cela soit au niveau du climat, de la production et de la qualité. Les résultats sont le bilan d'un nombre important d'attributs qui influencent le système (type du sol, capacité de réserve en eau, porte-greffe, clone du cépage, gestion du sol, gestion des maladies, etc.). Et c'est pour cela, que les résultats sont une « image » des vignobles, travaillés dans les situations naturelles d'exploitation.

À partir de cette étude, se posent des perspectives de recherche.

Sur le climat il serait intéressant de continuer avec les études à méso-échelle, car elles permettent de connaître la variabilité du climat dans la région.
La modélisation atmosphérique de la brise de mer à échelle fine serait une approche pour comprendre d'autres facteurs qui expliquent la variabilité spatiale des températures observées sur les 3 années de mesures. De cette manière, il est possible

d'associer la brise avec des différents types de situations synoptiques ou type de climat. Un exemple peut être l'impact des phénomènes ENSO sur la fréquence d'apparition de la brise du Río de la Plata.
L'étude de la variabilité spatiale et temporelle de la pluviométrie est nécessaire, car elle s'associe fortement au type de vin élaboré chaque année. Connaître la distribution spatiale des pluies peut aider à déterminer les secteurs les plus favorables pour le développement de la vigne notamment avec la question des maladies (*Botrytis, Mildiou*).
D'une manière générale, l'ensemble des paramètres climatiques devraient être étudiés (vent, humidité, ...) en relation avec le fonctionnement de la plante. La modélisation du climat à méso-échelle s'avèrerait très pertinente dans la région car elle permettrait d'avoir une base avant d'y intégrer les scénarios climatiques futurs dans une optique d'adaptation raisonnée au changement climatique. Dans la région, il existe des travaux sur les perspectives climatiques à macro-échelle (avec plus ou moins d'incertitude), mais dans la région côtière du sud de l'Uruguay comme dans le reste du pays à une échelle plus fine, les scénarios climatiques futurs pourraient être différents de ceux analysés à une échelle plus large. On a pu voir à travers enquêtes réalisées auprès des viticulteurs (certes, à partir d'un faible échantillon) que la perception du changement climatique n'est pas encore optimale.

Par rapport aux impacts du climat sur la vigne, il est important d'approfondir sur l'analyse des systèmes viticoles dans la région.

Les techniques de culture qui peuvent accentuer ou masquer les conditions locales du climat seraient un apport pour la région. Par exemple, évaluer la gestion du vignoble afin de modifier le microclimat dans les vignobles prés de la côte. Par exemple, la forte humidité relative a un impact important sur l'état sanitaire des vignobles et cause régulièrement des pertes de rendement et de qualité des raisins.
La nécessité d'étudier d'autres cépages dans la même région est également apparue évidente. Par exemple, ces cépages blancs, pour lesquels l'impact de la brise de mer pourrait favoriser une bonne qualité en vendange avec la diminution de la température maximale pendant la journée. D'une même manière, l'évaluation des matériels génétiquement modifiés (OMG) (cépages résistants et tolérants aux maladies) pourra aider à l'adaptation de la viticulture aux conditions plus humides et donc avec plus de pression sanitaire.
Les résultats actuels du comportement de la vigne à la diversité climatique d'une région nous apportent une idée de ce que pourrait être la culture dans le futur. Cependant, il faudrait connaître l'évolution de ce que sera tout le système de production dans un avenir proche. L'évolution et la diversité des agents causants des maladies et favorisant le développement des ravageurs peuvent aussi modifier les possibles réponses d'adaptation.

L'analyse des événements extrêmes qui impactent les vignobles aidera également à la compréhension de la physiologie de la vigne et donc contribuera aux possibles mesures d'adaptation face au changement climatique. La grêle de janvier 2013 qui a touché la majorité des vignobles étudiés, est un exemple de l'impact que peut causer ces phénomènes. Quantifier les niveaux des dégâts et la réponse de la plante les années suivantes est important dans la mesure où les perspectives climatiques futures prévoient une augmentation de la fréquence des événements extrêmes.

L'étude de modèles de culture parait aussi intéressante dans le sens où elle permet de séparer les effets environnementaux et donc d'isoler l'effet du climat. Cela permettrait l'évaluation du risque du système de production sous les projections climatiques futures dans la région. Cependant, en Uruguay il n'y a pas d'antécédents d'études de modélisation de la vigne et il faudrait valider le modèle dans les conditions locales.

Sur la perception et la capacité adaptative des viticulteurs, il serait intéressant de comparer des acteurs de la filière dans différentes régions viticoles du monde. L'analyse des matrices pourrait être développée dans d'autres régions traditionnelles (France, Espagne, Italie), pour la comparer avec des pays de l'hémisphère sud. Cela pourrait apporter une approche anthropologique sur les différences de connaissances et de perceptions locales face à différentes situations climatiques et surtout dans des pays où l'impact du changement climatique est différent. Des points de vue de viticulteurs issus de régions extrêmes permettraient d'accélérer la prise de conscience.

La méthodologie utilisée dans cette étude pourrait être utilisée pour des autres cultures pérennes, comme par exemple, les arbres fruitiers caducifoliés. L'observation et la quantification des impacts de la variabilité spatiale de la température (ou des autres variables climatiques) sur la phénologie et la qualité des fruits peuvent contribuer à l'analyse des réponses d'adaptation à la variabilité climatique.

Ce travail qui propose certaines réponses d'adaptation à la variabilité local du climat apportées directement par l'expérience locale, conduit à la réflexion sur les politiques publiques d'adaptation au changement climatique à moyen et long terme. Cette thèse montre aussi le risque productif et social de la viticulture en Uruguay et pourrait être un point de départ pour une étude plus globale de la prise de décisions de politiques publiques.

Même si les impacts du changement climatique sur la vigne sont globaux, ils sont hétérogènes dans chaque région viticole. C'est pour cela, qu'il pourrait être intéressant de mettre en place un réseau international d'études de vulnérabilité et d'adaptation de la vigne à méso-échelle, afin de comparer et de discuter les mesures d'adaptation dans un contexte de changement climatique. Ce réseau pourrait uniformiser l'information généré par des études scientifiques, sensibiliser les acteurs de la filière, planifier

correctement la distribution des vignobles dans des régions et la gestion durable du vignoble.

BIBLIOGRAPHIE

Anderson JD, Jones GV, Tait A, Hall A, Trought MCT. 2012. Analysis of viticulture region climate structure and suitability in New Zealand. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, **46**: 149-165.

Baciocco KA, Davis RE, Jones GV. 2014. Climate and Bordeaux wine quality: identifying the key factors that differentiate vintages based on consensus rankings. *Journal of Wine Research*, **25**: 75-90.

Barbeau C, Barbeau G, Joannon A. 2014. Analyzing the sensitivity of viticultural practices to weather variability in a climate change perspective. An application to workable-days modelling. *Journal Internationale des Sciences de la Vigne et du Vin*, **48**: 141-152.

Barbeau G, Blin A. 2010. Influence du porte-greffe sur le comportement agronomique de la vigne (var. Cabernet franc) en moyenne vallée de la Loire. *Techniloire*, 15 p. In : http://www.techniloire.com/documents/124963587/Essai%20porte-greffe%20CF_vf.pdf (visité le 20/05/2016).

Barbeau G. 2008. Influence du fonctionnement de la vigne sur la qualité du vin. *Proceedings of VI Foro Mundial del Vino*. Logroño, España. 24 abril 2008.

Barnuud NN, Zerihun A, Gibberd M, Bates B. 2014. Berry composition and climate: responses and empirical models. *International Journal of Biometeorology*, **58**: 1207-1223.

Battaglini A, Barbeau G, Bindi M. 2009. European winegrowers' perception to climate change impact and options for adaptation. *Regional Environmental Change*, **9**: 61-73.

Belliveau S, Smit B, Bradshaw B. 2006. Multiple exposures and dynamic vulnerability: Evidence from the grape industry in the Okanagan Valley, Canada. *Global Environmental Change*, **16**: 364-378.

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.

Blanco-Ward D, García Quejeiro JM, Jones GV. 2007. Spatial climate variability and viticulture in the Miño River Valley of Spain. *Vitis*, **46**: 63-70.

Boissière M, Locatelli B, Sheil D, Padmanaba M, Sadjudin E. 2013. Local perceptions of climate variability and change in Tropical Fortests of Papua, Indonesia. *Ecology and Society*, **18**(4): 13.

Bonnardot V, Carey V, Cautenet S, Madelin M, Coetzee Z, Quénol H. 2014. Changement climatique et variabilité spatiale des températures à fine échelle dans les vignobles de Stellenbosch (Afrique du Sud). In : Quénol H. 2014. *Changement climatique et terroirs viticoles*. Paris, France. Lavoisier, pp 247-266.

Bonnardot V, Carey V, Madelin M, Cautenet S, Coetzee Z, Quénol 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**: 1-13.

Bonnardot V, Planchon O, Cautenet S. 2005. The sea breeze development under an offshore synoptic wind in the South Western Cape and implications for the Stellenbosch wine producing area. *Theoretical and Applied Climatology*, **81**: 203-218.

Bonnardot V, Planchon O, Carey VA, Cautenet S. 2002. Diurnal wind, relative humidity and temperature variation in the Stellenbosch-Groot Drakenstein winegrowing area. *South African Journal of Enology and Viticulture*, **23**(2): 62-71.

Bonnefoy C, Neethling E, Sicard S, Barbeau G, Bonnardot V, Planchon O, Madelin M, Quénol H. 2014. Approche régionale des climats des terroirs viticoles du Val de Loire. In : Quénol, H. 2014. *Changement climatique et terroirs viticoles*. Paris, Francia. Lavoisier, pp. 161-188.

Bonnefoy C, Quénol H, Bonnardot V, Barbeau G, Madelin M, Planchon O, Neethling E. 2013. Temporal and Spatial Analyses of Temperature in a French Wine-Producing Area: the Loire Valley. *International Journal of Climatology*, **33**(8): 1849-1862.

Caffarra A, Eccel E. 2011. Porjecting the impacts of climate change on the phenology of grapevine in a mountain area. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, **17**: 52-61.

Caffarra A, Eccel E. 2009. Increasing the robustness of phenological models for *Vitis vinifera* cv Chardonnay. *International Journal of Biometeorology,* **54**: 255–267.

Calame F, Rochaix M, Simon JL. 1977. Observations phénologiques et mesures bioclimatiques dans plusieurs sites valaisans à différentes altitudes en vue de la délimitation de l'aire viticole. *Bulletin OIV*, pp. 601-616.

Calò A, Tomasi D, Costacurta A, Biscaro S, Aldighieri R. 1994. The effect of temperature thresholds on grapevine (*Vitis* sp.) bloom: An interpretive model. *Rivista di Viticoltora e di Enologia*, **1**: 3-14.

Campbell-Clause JM. 1998. Stomatal response of grapevines to wind. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, **38**: 77-82.

Carbonneau A, Moueix A, Leclair N, Renoux J. 1991. Proposition d'une mèthode de prélèvement de raisin à partir de l'analyse de l'hétérogenité de maturation sur un cep. *Bulletin OIV*, **64**: 679-690.

Carey VA, Bonnardot V, Schmidt A, Theron JCD. 2003. The interaction between vintage, vineyard site (mesoclimate) and wine aroma of Vitis vinifera L. cvs. Sauvignon blanc, Chardonnay and Cabernet Sauvignon in the Stellenbosch-Klein Drakenstein wine producing area. *Bulletin OIV*, **76**: 4-29.

Champagnol F. 1984. *Eléments de physiologie de la vigne et viticulture générale*. Imp. Dehan, Montpellier, 351p.

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. 1995. Adopting of a system for identifying grapevine growth stages. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, **1**: 100-110.

Cobon DH, Stone GS, Carter JO, Scanlan JC, Toombs NR, Zhang X, Willcocks J, McKeon GM. 2009. The climate change risk management matrix for the grazing industry of northern Australia. *The rangeland Journal*, **31**: 31-49.

CPTEC 2013. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. In : http://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/20981 (visité le 23/01/14).

Deloire A, Vaudour E, Carey VA, Bonnardot V, van Leeuwen C. 2005. Grapevine responses to terroir: a global approach. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, **39**(4): 149-162.

Duchêne E, Schneider C. 2005. Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agronomy of Sustainable Developement*, **25**: 93–99.

Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, González L, Tablada M, Robledo CW. 2012. *InfoStat versión 2012. Grupo InfoStat.* Córdoba, Argentina. FCA, Universidad Nacional de Córdoba.

Falcao LD, Burin VM, Sidinei-Chaves E, Vieira HJ, Brighenti E, Rosier JP, Bordignon-Luiz MT. 2010. Vineyard altitude and mesoclimate influences on the phenology and maturation of Cabernet-sauvignon grapes from Santa Catarina State. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin,* **44**(3): 135-150.

FAO. 2011. Proyecto TCP/URU/3302 Fase 1: *Adaptación a la variabilidad climática. Informe final. SARAS.* Montevideo, Uruguay. FAO publicaciones. 125p.

Ferrer M, González-Néves G, Echeverría G, Camussi G. 2012. Plant response and grape composition of Vitis vinifera L. cv Tannat in different climatic regions. *Journal of Agricultural Science and Technology*, **2**: 1252-1261.

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'écophysiologie des systèmes de conduite Espalier et Lyre sur Merlot*. Thèse doctorale. Montpellier, Francia. École Nationale Supérieure Agronomique, Université de Montpellier II. 385p.

Flexas J, Galmés J, Gallé A, Gulías J, Pou A, Ribas-carbo M, Tomàs M, Medrano H. 2010. Improving water use efficiency in grapevines: potential physiological targets for iotechnological improvement. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, **16**: 106–121.

Fourment M, Bonnardot V, Planchon O, Ferrer M, Quénol H. 2014. Circulation atmosphérique locale et impacts thermiques dans un vignoble côtier : observations dans le sud de l'Uruguay. *Climatologie*, **11**: 47-64.

Fourment M, Ferrer M, González-Néves G, Barbeau G, Bonnardot V, Quénol H. 2013. Spatial variability of temperature and grape berry compostion at terroir scale in Uruguay. In : *Proceedings of 18th International Simposium GiESCO*. Porto, Portugal. 7 al 11 de Julio de 2013.

Fourment M, Ferrer M, Quénol H. 2013. *Vitis vinifera* L cv. Tannat: respuesta del cultivo frente a la variabilidad climática. *Agrociencia Uruguay*, **17**(2): 33-44.

Fraga H, Santos JA, Moutinho-Pereira J, Carlos C, Silvestre J, Eiras-Dias J, Mota T, Malheiro AC. 2015. Statistical modelling of grapevine phenology in Portguese wine regions: observed trends and climate change projections. *Journal of Agricultural Science*, 1-17.

Freeman BM, Kliewer WM, Stern P. 1982. Influence of windbreaks and climatic region on diurnal fluctuation of leaf water potential, stomatal conductance, and leaf temperature of grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 33(4): 233-236.

Füssel HM. 2010. *Review and quantitative analysis of indices of climate change exposure, adaptive capacity, sensitivity and impacts. Backgroundnote to the World Development Report 2010.* Development and climate change. In : http://danida.vnu.edu.vn/cpis/files/References/Vulnerability/REVIEW%20AND%20QUANTITATIVE%20ANALYSIS%20OF%20INDICES%20OF%20CLIMATE%20CHANGE%20EXPOSURE,%20ADAPTIVE%20CAPACITY,%20SENSITIVITY,%20AND%20IMPACTS.pdf (visité le 26/05/16)

García de Cortázar-Atauri I, Brisson N, Gaudilliere JP. 2009. Performance of several models for predicting budburst date of grapevine (*Vitis vinifera* L.). *International Journal of Biometeorology*, **53**: 317–326.

Gladstones J. 1992. *Viticulture and environment*. Adelaïde, Australia. Winetitles, 310p.

Glories Y, Augustin M. 1993. Maturité phénolique du raisin, conséquences technologiques: application aux millésimes 1991 et 1992. En: *Proceedings of the Compte Rendu Colloque Journée Techn.* CIVB, Bordeaux, France, pp 56-61.

González-Néves 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 Uruguay*, **10**(2): 1-14.

Goto-Yakamoto N, Mori K, Numata M, Koyama K, Kitiyama M. 2011. Effects of temperature and water regimes on flavonoid contents and composition on the skin of red-wine grapes. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, Special Issue, 75-80.

Grothmann T, Pratt A. 2005. Adaptive capacity and human cognition: The process of individual adaptation to climate change. *Global Environmental Change*, **15**: 199-213.

Hadarits M, Smit B, Diaz H. 2010. Adaptation in viticulture: A case study of producers in the Maule region of Chile. *Journal of Wine Research*, **21**: 167–178.

Hall A, Jones GV. 2010. Spatial analysis of climate in winegrape growing regions in Australia. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, **16**: 389-404.

Huglin P. 1978. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture*, 1117-1126.

Humántico-Cisneros MA, Piccolo MC. 2011. Caractertización de la brisa marina en el balneario de Monte Hermoso, Argentina. *Estudios Geográficos*, **271**: 461-475.

INAVI 2016. Instituto Nacional de Vitivinicultura. Estadísticas de los viñedos. In : http://www.inavi.com.uy/categoria/102-datos-nacionales-2015.html (visité le 20/04/16).

INIA 2016. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Registros climáticos del portal GRAS de la estación de Las brujas. In : http://www.inia.uy/investigaci%C3%B3n-e-innovaci%C3%B3n/unidades/GRAS/Clima/Banco-datos-agroclimatico (visité le 20/04/16).

GIEC 2007. Intergovernemental Panel on Climate Change. *Informe de Síntesis.* In : http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf (visité le 21/04/16).

Jackson DI, Lombard PB. 1993. Environmental management practices affecting grape composition and wine quality – a review. *American Journal of Enology and Viticulture*, **44**: 409-430.

Jackson RS. 2008. *Wine Science principles and applications*. Elsevier, 3e edition, Oxford, Angleterre, 789p.

Jones GV, Duff AA, Hall A, Myers JW. 2010. Spatial analysis of climate in winegrape growing regions in the Western United States. *American Journal of Enology and Viticulture*, **61**: 313–326.

Jones GV, Davis RE. 2000. Grapevine phenology, grape composition, and wine production and quality for Bodeaux, France. *American Journal of Enology and Viticulture*, **51**: 249-261.

Keller M. 2010. *The science of grapevine: anatomy and physiology.* Academic press, Amsterdam, Pays-Bas, 522p.

Kliewer WM, Gates D. 1987. Wind effects on grapevine growth, yield and fruit composition. *Australian and New Zealand Wine industry Journal*, **2**: 30-37.

Kliewer WM. 1977. Influence of temperature, solar radiation, and nitrogen on coloration and composition of Emperor grapes. *American Journal of Enology and Viticulture*, **23**: 71-77.

Koundouras S, Tsialtas IT, Zioziou E, Nikolaou N. 2008. Rootstock effects on the adaptive strategies of grapevine (*Vitis vinifera* L. cv. Cabernet-Sauvignon) under contrasting water status: leaf physiological and structural responses. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **128**: 86–96.

Lorenzo MN, Taboada JJ, Lorenzo JF, Ramos AM. 2013. Influence of climate on grape production and wine quality in the Rías Baixas, north-western Spain. *Regional Enviornmental Change*, **13**(4): 887-896.

Madelin M, Bois B, Quénol H. 2014. Variabilité topoclimatique et phénologique des terroirs de la montagne de Corton (Bourgogne). In : Quénol H. 2014. *Changement climatique et terroirs viticoles*. Paris, France. Lavoisier, pp. 215-227.

Madelin M. 2004. *L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne : modélisation spatiale aux échelles fines des températures minimales et des écoulements de l'air*. Thèse doctorale. Paris, Francia. Université Paris 7, 353p.

Magrin GO, Marengo JA, Boulanger JP, Buckeridge MS, Castellanos E, Poveda G, Scarano FR, Vicuña S. 2014. Central and South America. In : *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp 1499-1566. En: http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/ (visité le 05/06/16).

Matese A, Crisci A, Di Gennaro SF, Primicerio J, Tomasi D, Marcuzzo P, Guidoni S. 2014. Spatial variability of meteorological conditions at different scales in viticulture. *Agricultural and Forest Meteorology*, **189-190**: 159-167.

Martin SR, Dunn GM. 2000. Effect of pruning time and hydrogen cyanamide on budburst and subsequent phenology of *Vitis vinifera* L. variety Cabernet Sauvignon in central Victoria. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, **6**: 31-39.

MGAP-FAO. 2013. *Clima de cambios: Nuevos desafíos de adaptación en Uruguay.* Astigarraga L, Picasso V, Ferrer M, Mondelli M, Cruz G, Camussi G, Fourment M, Varela V, Pereyra G, Taks J, Contreras S, Cobas P. Resultados del proyecto FAO/TCP/URU 3302, Montevideo, Uruguay.

Mira de Orduña R. 2010. Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Research International*, **43**: 1844-1855.

Mori K, Goto-yamamoto N, Kitayamam M, Hashizume H. 2007. Loss of anthocyanins in red-wine grape under high temperature. *Journal of Experimental Botany*, **58**: 1935-1945.

Mosedale JR, Wilson RJ, Maclean IMD. 2015. Climate change and crop exposure to adverse weather: changes to frost risk and grapevine flowering conditions. *PLOS ONE* **10**(10):e0141218.

Neethling E, Petitjean T, Quénol H, Barbeau G. 2016. Assessing local climate vulnerability and winegrowers' adaptive process in the context of climate change. *Mitigation and Adaptation Strategies of Global Change*, 1-27.

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.

Nicholas KA, Mathews MA, Lobell DB, WIllits NH, Field CB. 2011. Effect of vineyard-scale climate variability on Pinot noir phenolic composition. *Agricultural and Forest Meteorology*, **151**: 1556-1567.

OIV. 1990. *Recueil des méthodes internationales d'analyse des vins et des moûts.* Office International de la Vigne et du Vin, Paris, France, 368p.

Parker AK, De Cortázar-Atauri Ig, van Leeuwen C, Chuine I. 2011. General phenological model to characterize the timing of flowering and veraison of Vitis vinifera L. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, **17**: 206–16.

PlantGrape. 2013. Le catalogue de vignes cultivées en France. En: http://plantgrape.plantnet-project.org/ (visité le 01/10/15).

Pérez-Catalá A. 2013. *Viticulture under climate change: understanding vulnerability and adaptive capacity of wineries and growers. A case study in El Penedès region*, Catalonia. Tesis doctoral. Barcelona, España. Universitat Autònoma de Barcelona, 34p.

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.

Pouget R. 1963. Recherches physiologiques sur le repos végétatifs de la vigne (*Vitis vinifera* L.) : la dormance de bourgeons et le mécanisme de sa disparition. *Annales d'amélioration des plantes*, **13**: 1-247.

Quénol H. 2014. *Changement climatique et terroirs viticoles*. Lavoisier, Paris, 444p.

Quénol H, Bonnardot V. 2014. A multi-scale climatic analysis of viticultural terroirs in the context of climate change: the "TERADCLIM" project. *International Journal of Vine and Wine Sciences*, LACCAVE; Vigne et Vin Publications Internationales, Special issue, 23-32.

Quénol H, Maciel A, Monteiro A, Beltrando G. 2007. Variabilidade espacial do gelo primaveril nos vinhedos do Vinho Verde (Portugal). *Geografía*, **32**: 5-27.

Rusticucci M, Renom M. 2008. Variability and trends in indices of quality controlled daily temperature extremes in Uruguay. *International Journal of Climatology*, **28**(8): 1083-1095.

Sadras VO, Petrie PR, Moran MA, 2012. Effects of elevated temperature in grapevine. II juice pH, titrable acidity and wine sensory attributes. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, **19**: 107-115.

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.

Simionato CG, Luz Clara Tejedor M, Moreira D, Campetella C. 2009. Sea surface temperature variability at the Argentinean and Uruguayan Coast off the Rio De La Plata estuary: evidence of upwelling. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, **56**: 1424-1428.

Spayd ES, Tarara JM, Mee DL, Ferguson JC. 2002. Separation of sunlight and temperature effects on the composition of *Vitis vinifera* cv. Merlot berries. *American Journal of Enology and Viticulture*, **53**: 171-182.

Sraibman L. 2009. *Modelado numérico atmosférico de capas bajas sobre el Río de la Plata y zonas de influencia y su empleo en estudios de variabilidad climática*. Thèse doctorale. Buenos Aires, Argentina. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 144p.

Tarara JM, Lee J, Spayd SE, Scagel CF. 2008. Berry temperature and solar radiation alter acyclation, proportion, and concentration of anthocyanin in Merlot Grapes. *American Journal of Enology and Viticulture*, **59**: 235-247.

Tomasi D, Jones GV, Giust M, Lovat L, Gaiotti F. 2011. Grapevine Phenology and Climate Change: Relationships and Trends in the Veneto Region of ltaly for 1964-2009. *American Journal of Enology and Viticulture,* **62**(3): 329-339.

Tonietto J, Carbonneau A. 2004. A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Fortest Meteorology*, **124**, 81-97.

van Leeuwen C, Schultz HR, García de Cortázar-Atauri I, Duchêne E, Ollat N, Pieri P, Bois B, Goutouly JP, Quénol H, Touzard JM, Malheiro AC, Bavaresco L, Delrot S. 2013. Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine-

producing areas by 2050. In : *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America* 110 (33).

van Leeuwen C, Bois B, Cellie N, Tregoat 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.

van Leeuwen C, Garnier C, Agut C, Baculat B, Barbeau G, Besnard E, Bois B, Boursiquot JM, Chuine I, Dessup T, Dufourcq T, García de Cortazar-Atauri I, Marguerit E, Monamy C, Koundouras S, Payan JC, Parker A, Renouf V, Rodriguez-Lovelle B, Roby JP, Tonietto J, Trambouze W. 2008. Heat requirements for grapevine varieties are essential information to adapt plant material in a changing climate. In : *Proceedings of the 7th International Terroir Congress*, Nyon, Switzerland pp. 222–227.

Webb LB, Whetton PH, Barlow EWR. 2008. Modelled impact of future climate change on the phenology of winegrapes in Australia. *Austarlian Journal of Grape and Wine Research*, **13**: 165-175.

Winkler AJ, Cook JA, Kliewer WM, Lider LA. 1974. *General viticulture*. Berkeley, USA. University of California Press, 710p.

Yaro JA. 2013. The perception of and adaptation to climate variability/change in Ghana by small-scale and comercial farmers. *Regional Environmental Change*, **13**: 1259-1272.

ANNEXES

Valorisation scientifique de la thèse

Articles publiées dans revues avec comité de lecture

Fourment M, Ferrer M, Quénol H. 2013. *Vitis vinifera* L cv. Tannat: respuesta del cultivo frente a la variabilidad climática. *Agrociencia Uruguay,* **17**(2): 33-44. http://www.fagro.edu.uy/~agrociencia/index.php/directorio/article/view/820

Fourment M, Bonnardot V, Planchon O, Ferrer M, Quénol H. 2014. Circulation atmosphérique locale et impacts thermiques dans un vignoble côtier : observations dans le sud de l'Uruguay. *Climatologie*, **11**: 47- 64. http://lodel.irevues.inist.fr/climatologie/index.php?id=589

Articles publiées dans congrès avec comité de lecture

Fourment M, Ferrer M, González-Neves G, Barbeau G, Bonnardot V, Quénol H. 2013. Spatial variability of temperature and grape berry compostion at terroir scale in Uruguay. In: *Proceedings of 18th International Simposium GiESCO*. 7th to 11th July. Porto, Portugal.

Fourment M, Bonnardot V, Ferrer M, Quénol H. 2014. Température et circulation atmosphérique locale : observations dans le vignoble du sud de l'Uruguay. In : *Actes du XXVIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie AIC*. 2nd to 5th July. Dijon, France.

Quénol H, Neethling E, Leroux R, Grassin M, **Fourment M**, Van Leeuwen C, De Resseguier L, Barbeau G. 2015. Characterisation and perception of climate change at viticultural terroir scale. In : *Proceedings of 19th International Simposium GiESCO*. 31st May to 3th June. Gruissan and Montpellier, France.

Résumés publiés dans congrès

Fourment M, Ferrer M, Quénol H. 2013. Variabilidad espacial de la temperatura y la fenología de Tannat en una región vitícola de Uruguay. In : *Actas del XIV Congreso Latinoamericano de Viticultura y Enología*. 20th to 22th November. Tarija, Bolivia.

Fourment M, Ferrer M, Bonnardot V, Quénol H. 2014. Preliminary results of fine scale temperature variability in a wine region of Uruguay. In : *Proceedings of the World Climate Research Programme WCRP Conference for Latin America and Caribbean:*

developing, linking and applying climate knowledge. 17th to 21th March. Montevideo, Uruguay.
http://pampero.cima.fcen.uba.ar/wcrp/posters/AE11_Fourment.pdf

Fourment M, Ferrer M, Barbeau G, Quénol H. 2015. Percepción de la variabilidad climática en la región sur de Uruguay. In : *Actas del XV Congreso Latinoamericano de Viticultura y Enología.* 3th to 7th November. Bento Gonçalves, Brasil.

Fourment M, Ferrer M, Quénol H. 2015. Sensibilidad y capacidad adaptativa de la vid al cambio climático en Uruguay: enfoque de matrices. In : Actas *del XV Congreso Latinoamericano de Viticultura y Enología*. 3th to 7th November. Bento Gonçalves, Brasil.

Fourment M, Ferrer M, Barbeau G, Quénol H. 2016. Perception of climate variability and vineyards vulnerability in a coastal wine region in South America. In: Proceedings of the Sustainable grape and wine production in the context of climate change. 10th to 13th April. Bordeaux, France.

Chapitres de livres

Ferrer M, Camussi G, **Fourment M**, Varela V, Pereyra G, Taks J, Contreras S, Cobas P, Mondelli M, Cruz G, Astigarraga L, Picasso V. 2013. Clima de cambios. Nuevos desafíos de adaptación en Uruguay. Volumen VI. Sensibilidad y capacidad adaptativa de la viticultura y la fruticultura frente al cambio climático. In : Oyhantçabal W, Sancho D, Galván M. Clima de cambios. *Nuevos desafíos de adaptación en Uruguay. Uruguay, FAO y MGAP*. Project FAO/TCP/URU 3302, Montevideo, Uruguay. 306p.

Quénol H, Arauni C, **Fourment M**, Trapateau L, Grassin M, Briche E, Quini C, Ortiz H, Ferrer M, Barbeau G, Neethling E, Pinson L, Polimeni M. 2014. Changement climatique dans les vignobles d'Amérique du Sud. In : Quénol, H. *Changement climatique et terroirs viticoles*. Lavoisier. Paris. 444p.

RÉSUMÉ : Pour déterminer la vulnérabilité des systèmes de production viticole au changement et variabilité climatique, il faut connaître l'exposition physique d'une région, la sensibilité de la vigne et la capacité adaptative, apporté par le viticulteur par son « savoir-faire ». Ainsi, les mesures d'adaptation comme réponses au changement climatique (CC), résultent de la conjonction de ces trois composantes, analysées dans une perspective locale. L'objectif de cette étude a été définir la variabilité du climat dans la région viticole côtière du sud de l'Uruguay, évaluer les possibles impacts sur la vigne, et d'apporter des réponses sur l'adaptation de la vigne dans un contexte de CC. Dans dix vignobles commerciaux de Tannat situés dans les départements de Montevideo et Canelones, des capteurs de température ont été installés, répartis en fonction de la distance au Río de la Plata. La variabilité spatiale et temporelle de la température des vignobles a été mesurée par une analyse à méso-échelle. À une échelle plus fine, le phénomène de la pénétration de la brise de mer et leur effet sur l'évolution thermique diurne a été ainsi étudié. Le Río de la Plata à travers l'effet de l brise, est une des composants principaux du climat de la région viticole. La réponse de la vigne à la température sur la composition est expliquée par des conditions climatiques générales pendant la maturation (thermiques et hydriques). Les principaux acteurs de la filière (viticulteurs et conseillers) connaissent la variabilité locale du climat et ils ont identifié les aspects défavorables pour la production du raisin de qualité. Cependant, le climat ne semble pas avoir un rôle important dans la prise de décisions, mais d'une manière sous-jacente, il joue un rôle fondamental en la gestion du vignoble. Finalement, ils ont été identifiés des mesures d'adaptation à la variabilité locale du climat, en proposant stratégies à partir de la connaissance locale.
Mots clés : variabilité de la température, méso-échelle, comportement de la vigne, adaptation.

RESUMEN: Para determinar la vulnerabilidad de los sistemas de producción vitícola al cambio y la variabilidad climática, se requiere conocer la exposición física de una región, su sensibilidad y la capacidad adaptativa aportada por el viticultor por su *savoir-faire*. Las medidas de adaptación en respuesta al cambio climático (CC), resultan de la conjunción de estos componentes, analizados desde una perspectiva local. El objetivo del estudio fue definir la variabilidad del clima actual de la región costera Sur de Uruguay, evaluar los posibles impactos en la vid, y aportar respuestas para su adaptación en el contexto de CC. En diez viñedos comerciales de Tannat ubicados en Canelones y Montevideo se instalaron sensores de temperatura según un diseño que contempló la distancia del Río de la Plata. Se precisó la variabilidad espacial y temporal de la temperatura de estos viñedos mediante un análisis a meso-escala. A una escala más fina, se estudió el fenómeno de la penetración de la brisa marina y su efecto en la evolución térmica diurna. El Río de la Plata a través del efecto de la brisa, es uno de los componentes principales del clima de la región vitícola sur. La sensibilidad de la vid a la temperatura sobre la composición es explicada por las condiciones climáticas generales durante la maduración (térmicas e hídricas). Los principales actores del sector (viticultores y asesores) conocen la variabilidad local del clima y tienen identificados los aspectos que son desfavorables para producir uvas de calidad. Sin embargo el clima no parece tener un rol preponderante en la toma de decisiones, pero de manera subyacente, este juega un rol fundamental en la gestión del viñedo. Por último, se identificaron medidas de adaptación a la variabilidad local del clima, proponiendo estrategias a partir del conocimiento local.
Palabras clave: variabilidad de la temperatura, meso-escala, comportamiento de la vid, adaptación.

SUMMARY: To determine the vulnerability of viticulture farming system to climate change (CC) and variability, the knowledge of climate exposure over the region, sensitivity and adaptive capacity provided by the winegrowers through their "*savoir-faire*" is primordial to contribute to adaptation issues to CC. The aim of this study was to define climate variability of the southern coastal wine region of Uruguay, evaluate its possible impacts in vinegrape and to provide adaptative responses in the context of CC. Ten plots were installed in commercial vineyards of Tannat over Canelones and Montevideo region at different distances to the Río de la Plata. Spatial and temporal variability of temperature was defined over the coastal region at meso-scale. At a fine scale, it was studied the sea breeze penetration and its impacts in the diurnal thermal evolution. The Río de la Plata through the sea breeze effect is one of the principal climate components in the southern wine region. Temperature grapevine sensitivity on berry composition at harvest is explained by climate general conditions during ripening (thermal and hydric conditions). The principal actors (winegrowers and advisors) know the local climate variability and have well identified unfavorable climate conditions to produce high quality grapes. However, climate seemed to be not relevant in producers' decision making, but in an underlined way, its plays a fundamental role in vineyard management. Adaptation measures to local climate variability were identified by strategies proposed from the local knowledge.
Key Words: temperature variability, meso-scale, grapevine behaviour, adaptation.

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

Adaptación de la vid (*Vitis vinifera* L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay

por

María Mercedes FOURMENT REISSIG

TESIS presentada como uno de los requisitos para obtener el título de Doctora en Ciencias Agrarias

Montevideo
URUGUAY
Julio de 2016

Tesis aprobada por el tribunal integrado por, el 20 de julio de 2016. Autora: Ing. Agr. (MSc.) Mercedes Fourment. Director Dr. Hervé Quénol, Co-directora Dra. Milka Ferrer.

Dedicada a Mario Pablo Mondelli por ser inspiración y aliento

AGRADECIMIENTOS

TABLA DE CONTENIDO

		Página
	PÁGINA DE APROBACIÓN	II
	AGRADECIMIENTOS	IV
	RESUMEN	X
	SUMMARY	XI
1.	**INTRODUCCIÓN GENERAL**	1
1.1.	**MARCO DEL ESTUDIO**	2
1.1.1.	**La viticultura en Uruguay**	3
1.1.2.	**Cambio climático en Uruguay e impactos en la vid**	5
1.2.	**OBJETIVOS DEL ESTUDIO**	9
1.3.	**PRESENTACIÓN DE LOS CAPÍTULOS**	10
2.	**CIRCULATION ATMOSPHERIQUE LOCALE ET IMPACTS THERMIQUES DANS UN VIGNOBLE COTIER : OBSERVATIONS DANS LE SUD DE L'URUGUAY**	13
2.1.	**RESUMÉ**	13
2.2.	**SUMMARY**	14
2.3.	**INTRODUCTION**	15
2.4.	**SITE EXPERIMENTALE, DONNÉES ET MÉTHODES**	17
2.5.	**RÉSULTATS ET DISCUSSION**	22
2.5.1.	**Caractérisation du vent pendant la période végétative de la vigne**	22
2.5.2.	**Circulation atmosphérique locale : étude de cas quotidiens**	27
2.5.3.	**Impacts thermiques dans le vignoble**	32
2.5.4.	**Essai de classification des parcelles en fonction de l'impact thermique de la brise dans le vignoble**	35
2.6.	**CONCLUSION**	38
2.7.	**RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**	39

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

3.	**¿ES EL COMPORTAMIENTO FENOLÓGICO DE TANNAT (*VITIS VINIFERA* L.) AFECTADO POR LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA REGIÓN COSTERA DEL SUR DE URUGUAY?**	44
3.1.	**RESUMEN**	44
3.2.	**SUMMARY**	45
3.3.	**INTRODUCCIÓN**	46
3.4.	**MATERIALES Y MÉTODOS**	48
3.4.1.	**Área de estudio**	48
3.4.2.	**Mediciones en la planta**	49
3.4.3.	**Análisis climático**	50
3.4.4.	**Análisis estadístico**	50
3.5.	**RESULTADOS**	51
3.5.1.	**Variabilidad temporal y espacial de la temperatura en la región (meso-escala)**	51
3.5.2.	**Variabilidad espacial de la fenología de Tannat**	54
3.5.3.	**Relaciones entre la fenología del Tannat y la acumulación térmica en las parcelas**	57
3.6.	**DISCUSIÓN**	61
3.6.1.	**Clima**	61
3.6.2.	**Fenología**	62
3.6.3.	**Fenología y Temperatura**	64
3.7.	**BIBLIOGRAFÍA**	66
4.	**TANNAT GRAPE BERRY COMPOSITION RESPONSES TO SPATIAL VARIABILITY OF TEMPERATURE IN A COASTAL WINE REGION**	71
4.1.	**SUMMARY**	71
4.2.	**RESUMEN**	72
4.3.	**INTRODUCTION**	73

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

4.4	**MATERIALS AND METHODS**	74
4.5	**RESULTS**	78
4.6	**DISCUSSION**	88
4.7	**CONCLUSIONS**	93
4.8	**REFERENCES**	95
5.	**PERCEPCIONES Y RESPUESTAS A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN UNA REGIÓN VITÍCOLA DE URUGUAY**	99
5.1.	**RESUMEN**	99
5.2.	**SUMMARY**	100
5.3.	**INTRODUCCIÓN**	101
5.4.	**MATERIALES Y MÉTODOS**	104
5.5.	**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**	108
5.6.	**CONCLUSIONES**	119
5.7.	**BIBLIOGRAFÍA**	120
6.	**CONCLUSIONES GENERALES Y PERSPECTIVAS**	124
7.	**BIBLIOGRAFÍA**	130
8.	**ANEXOS**	146
8.1.	**VALORIZACIÓN DE LA TESIS**	146

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

RESUMEN

Para determinar la vulnerabilidad de los sistemas de producción vitícola al cambio y la variabilidad climática, se requiere conocer la exposición física de una región, su sensibilidad y la capacidad adaptativa aportada por el viticultor por su *savoir-faire*. Las medidas de adaptación en respuesta al cambio climático (CC), resultan de la conjunción de estos componentes, analizados desde una perspectiva local. El objetivo del estudio fue definir la variabilidad del clima actual de la región costera Sur de Uruguay, evaluar los posibles impactos en la vid, y aportar respuestas para su adaptación en el contexto de CC. En diez viñedos comerciales de Tannat ubicados en Canelones y Montevideo se instalaron sensores de temperatura según un diseño que contempló la distancia del Río de la Plata. Se precisó la variabilidad espacial y temporal de la temperatura de estos viñedos mediante un análisis a meso-escala. A una escala más fina, se estudió el fenómeno de la penetración de la brisa marina y su efecto en la evolución térmica diurna. El Río de la Plata a través del efecto de la brisa, es uno de los componentes principales del clima de la región vitícola sur. La sensibilidad de la vid a la temperatura sobre la composición es explicada por las condiciones climáticas generales durante la maduración (térmicas e hídricas). Los principales actores del sector (viticultores y asesores) conocen la variabilidad local del clima y tienen identificados los aspectos que son desfavorables para producir uvas de calidad. Sin embargo el clima no parece tener un rol preponderante en la toma de decisiones, pero de manera subyacente, este juega un rol fundamental en la gestión del viñedo. Por último, se identificaron medidas de adaptación a la variabilidad local del clima, proponiendo estrategias a partir del conocimiento local.

Palabras clave: variabilidad de la temperatura, meso-escala, comportamiento de la vid, adaptación.

Vinegrape (*Vitis vinifera* L.) adaptation to climate variability at meso-scale in southern Uruguay

SUMMARY

To determine the vulnerability of viticulture farming system to climate change (CC) and variability, the knowledge of climate exposure over the region, sensitivity and adaptive capacity provided by the winegrowers through their "*savoir-faire*" is primordial to contribute to adaptation issues to CC. The aim of this study was to define climate variability of the southern coastal wine region of Uruguay, evaluate its possible impacts in vinegrape and to provide adaptative responses in the context of CC. Ten plots were installed in commercial vineyards of Tannat over Canelones and Montevideo region at different distances to the Río de la Plata to analyze grapevine behavior and temperature variability. Spatial and temporal variability of temperature was defined over the coastal region at meso-scale. At a fine scale, it was studied the sea breeze penetration and its impacts in the diurnal thermal evolution. The Río de la Plata through the sea breeze effect is one of the principal climate components in the southern wine region. Temperature grapevine sensitivity on berry composition at harvest is explained by climate general conditions during ripening (thermal and hydric conditions). The principal actors (winegrowers and advisors) know the local climate variability and have well identified unfavorable climate conditions to produce high quality grapes. However, climate seemed to be not relevant in producers' decision making, but in an underlined way, its plays a fundamental role in vineyard management. Adaptation measures to local climate variability were identified by strategies proposed from the local knowledge.

Key Words: temperature variability, meso-scale, grapevine behaviour, adaptation.

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

A lo largo de la historia, se ha estudiado la determinación de la adaptación de un agro-ecosistema al ambiente y particularmente a la variabilidad climática. En el presente, los posibles impactos del cambio climático (CC) han llevado a estudios más específicos de la adaptación de varios cultivos. La vid, como planta indicadora del clima según Chuine *et al.* (2004), ha sido objeto de estudio en varias regiones vitícolas. Los trabajos de adaptación de la vid pueden ser aplicados a otros sistemas de producción. Sin embargo, la vulnerabilidad de los sistemas cambia considerablemente de un sitio a otro.

La definición de vulnerabilidad de un agro-ecosistema al cambio climático fue realizada por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2007), entendiéndola como la sumatoria entre su exposición física, la sensibilidad y su capacidad adaptativa.

En los países del viejo mundo, los viticultores y profesionales del sector se preocupan por los impactos presentes y futuros del cambio climático en sus *terroirs* (Quénol, 2014). Ellos demandan medidas de adaptación a sus condiciones locales, para poder aplicar técnicas de cultivo lo suficientemente temprano, para anticiparse a los impactos negativos que actualmente observan en sus uvas y vinos.

En los países llamados del nuevo mundo como Uruguay, la sensibilización de los impactos del CC aún es incipiente (Hadarits *et al*., 2010). Como punto de partida, la caracterización de los *terroirs* es esencial para conocer la diversidad de una región vitícola, determinada por sus diferentes situaciones meso-climáticas, de suelo y de prácticas culturales.

Sobre el meso-clima de una región, varios estudios han sido desarrollados para comprender la variabilidad espacial de la temperatura (Blanco-Ward *et al.*, 2007; Bonnefoy *et al.*, 2013; Hall y Jones, 2010; Jones *et al.*, 2010; Matese *et al.*, 2014; Quénol *et al.*, 2007), ya que es un factor determinante en los diferentes procesos fisiológicos de la vid y es un componente principal del *terroir*.

Para poder determinar la vulnerabilidad de los sistemas de producción vitícola, se debe conocer la exposición física de una región (su clima y eventos locales), su

sensibilidad (el impacto en el cultivo a dicha exposición) y la capacidad adaptativa, aportada por el viticultor, mediante su *savoir-faire*. De esta forma, las medidas de adaptación, como respuestas al CC, resultan de la conjunción de estos componentes, analizados en una perspectiva local.

A partir de lo expuesto surgen varias preguntas:

- ¿Cuál es la variabilidad espacial y temporal de la temperatura en una región y cuáles son los factores locales que la caracterizan?
- ¿La variabilidad espacial de la temperatura tiene un impacto sobre la vid? ¿La fenología de la vid se modifica en función de la temperatura regional? ¿Genera un impacto en la composición final de la uva?
- ¿Los actores del sector (productores y asesores) conocen la variabilidad local del clima? ¿Cuál es el rol del clima en la toma de decisiones? ¿A partir del conocimiento local, pueden surgir medidas de adaptación al CC aplicables a la región?

1.1. MARCO DEL ESTUDIO

Uruguay se sitúa entre los 30º y los 35º Latitud sur. Presenta 672 km de estuario marítimo, correspondiente a las costas del Río de la Plata y el Océano Atlántico. Es un país agrícola, donde el 80 % de la superficie total (176.220 km²) es utilizada para la producción. La viticultura en el país ocupa 6.682 ha (INAVI, 2016), es decir el 3,8 % de la superficie total, distribuida en diversas regiones y en consecuencia, sobre diferentes condiciones edafo-climáticas.

Uruguay presenta un clima cálido templado (Cfa según la clasificación de Köppen), con cuatro estaciones bien definidas. La temperatura mínima promedio es 5,6 ºC en julio y la temperatura máxima promedio alcanza los 29,1 ºC en enero (Normales climáticas del sur del país, 1972-2015; INIA, 2016. Figura 1). Las precipitaciones tienen un régimen iso-higro, con 1163 mm anuales repartidas a lo largo del año (estación INIA Las Brujas, INIA, 2016). Durante el ciclo vegetativo de la vid (setiembre-marzo) la acumulación de precipitaciones alcanza los 715 mm, que equivalen a 102 mm mensuales. Durante los meses de verano, pueden suceder

situaciones de déficit hídrico debido a que la demanda atmosférica (E.T.P.) aumenta por el efecto del aumento de temperaturas mientras que las precipitaciones son limitadas.

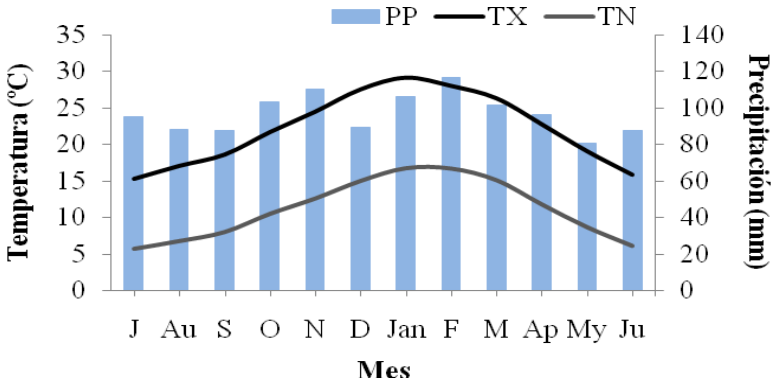


Figura 1. Normales climáticas de temperatura máxima (TX en ºC), temperatura mínima (TN en ºC) y precipitaciones (PP en mm) de la estación INIA Las Brujas de 1972-2015 (INIA, 2016).

1.1.1. La viticultura en Uruguay

La vid fue introducida en Uruguay en el siglo XVI por los primeros inmigrantes españoles y portugueses. La producción de uva fue destinada, en ese entonces, al consumo de la población. Fue recién en el siglo XIX que comienza el desarrollo comercial de la viticultura, quien contribuyó en gran medida al proceso de modernización de estructuras económicas en el Río de la Plata (Bonfanti, 2010).

De esa parte a la actualidad, la vitivinicultura nacional ha sufrido cambios estructurales importantes. Hasta finales de la década de los 90', el sector se caracterizaba por ser de tradición inmigrante, con producción de vino de mesa proveniente de híbridos productores directos y variedades de orígenes varios. Con el fin de mejorar la calidad de los vinos producidos y estimular la elaboración de vinos de calidad preferencial (VCP), surge a finales de 1990, el Plan de Reconversión de Viñedos alentado por el Ministerio de Ganadería (MGAP-Dirección General de la Granja). Además de regularizarse la implantación de variedades de origen europeo y porta-injertos más adaptados a las condiciones locales, también se promovió un

paquete de medidas técnicas, tal como el cambio de sistemas de conducción (hacia la espaldera alta o lira), el ajuste de la carga (rendimiento final), entre otras (Ferrer, 2007). La variedad de uva Tannat fue considerada como una de las más promisorias ya que se adaptaba a las situaciones de Uruguay. Así fue que se transformó en el *cépage* insignia del país.

Si bien los viñedos se reparten en el país, la mayor predominancia de implantaciones se presenta en el sur y noroeste de Uruguay. La principal región vitícola es la que se sitúa al sur (Departamentos de Canelones y Montevideo) representando el 76,3 % del viñedo del país (INAVI, 2016). En su paisaje predominan las llanuras suaves de suelos profundos y sobre el clima existe una importante influencia del Río de la Plata.

Según INAVI (2016) la producción anual de vino es aproximadamente 77.198 hL mientras que la producción anual de uva para vino es de 108 millones kg/año (promedio 2006-2015). El rendimiento promedio es de 14.186 kg/ha (2006-2015). La producción total de vino en 2015 corresponde a un 48 % a vino tinto, 40,5 % vino rosado y 11 % de vino blanco. En total existen 193 bodegas repartidas su mayoría en los viñedos.

En cuanto a las variedades plantadas en el país, Tannat es la variedad tinta más plantada para la elaboración de vino tinto (de mesa y fino) mientras que es la Ugni-blanc la variedad más plantada para elaborar vino blanco (de mesa) (INAVI, 2016) (Figura 2).

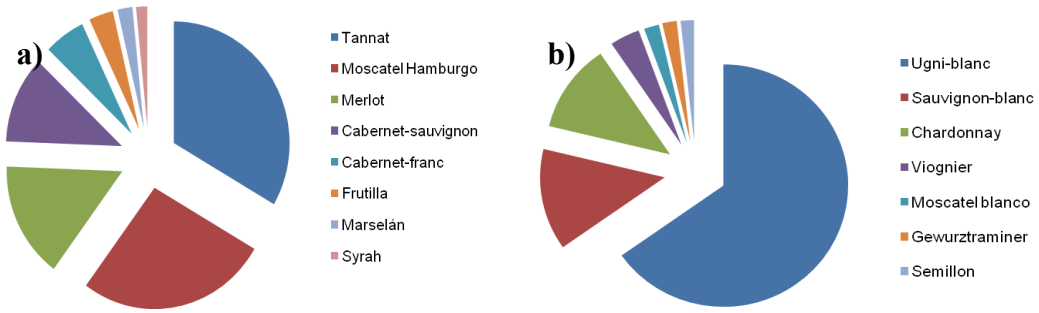


Figura 2. Las principales variedades tintas (a) y blancas (b) según su superficie en 2014 (INAVI, 2016).

A partir de la información generada de la investigación nacional, la variedad de uva Tannat se considera la más adaptada a las situaciones del país (Ferrer, 2007). Es el

cépage considerado emblema del país, ya que aporta vinos con gran tipicidad y originalidad debido a su gran potencial enológico (González-Néves *et al.*, 2006).

1.1.2. Cambio climático en Uruguay e impactos en la vid

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 Grupo Intergubernamental de Expertos sobre 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 Rusticucci y Renom (2008) para el periodo 1935-2002, existe un aumento de 0,8 ºC de temperatura máxima anual y 0,6 ºC de la temperatura mínima anual. El informe de la IPCC (Magrin *et al.*, 2014), reporta el aumento de días y noches cálidas (4 días por década).

Para las condiciones del sur de Uruguay, Fourment *et al.* (2013) constatan un aumento de los índices bio-climáticos térmicos de la vid, el Índice Heliotérmico - IH (aumento del 4,3 % en los últimos 15 años) (Figura 3a) y el Índice de Frescor nocturno - IF (aumento de 0,72 ºC en el mismo período) (Figura 3b).

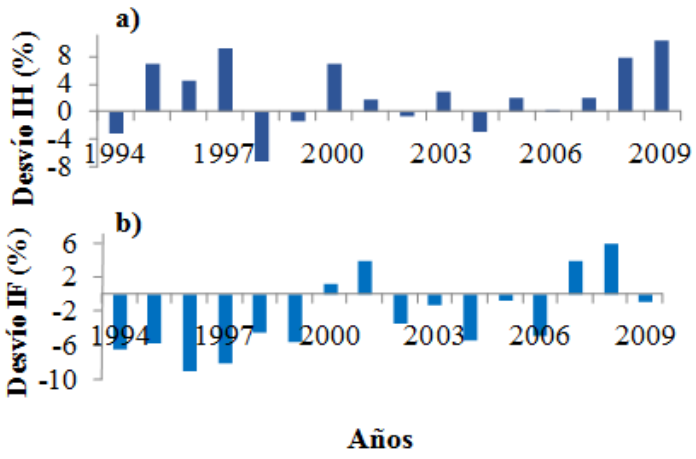


Figura 3. Desvíos estándar del Índice Heliotérmico con respecto a la media (IH 2089,6) (a) y el Índice de Frescor de noches con respecto a la media (IF 16,8 ºC) (b) para el período 1994-2009 (Datos INIA Las Brujas 2016).

Para las precipitaciones se observa una tendencia al aumento de la precipitación anual de 5 mm por año y aumento de la frecuencia de lluvias fuertes (Magrin *et al.*, 2014). Según FAO (2011), una gran parte de la variabilidad encontrada en la tendencia de aumento de lluvias mensual (del 20 % según su informe), 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. A partir de los datos de la Estación meteorológica del INIA Las Brujas y tomando en consideración el tipo de suelo predominante en la región vitícola de Canelones y Montevideo, el balance hídrico realizado por Fourment *et al.* (2013) expresado por el Índice de Sequía, representa la variabilidad interanual de disponibilidad de agua para la vid (Figura 4).

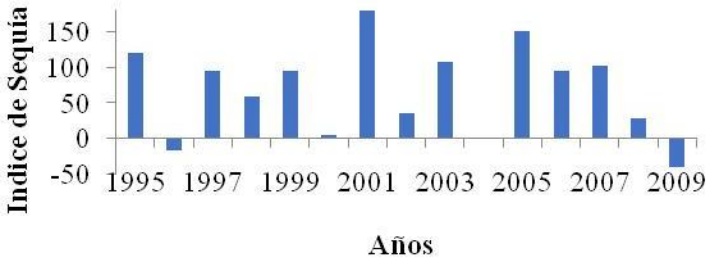


Figura 4. Evolución del Índice de sequía para el período 1994-2009.

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; Jones *et al.,* 2005) 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.

El aumento de temperatura provoca en el cultivo, 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 Davis, 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 moderado favorece la acumulación de azúcares y metabolitos secundarios (Carbonneau, 2004; Shellie, 2006; Castellarin *et al.*, 2007; Cohen *et al.*, 2008; van Leeuwen *et al*., 2009).

Fourment *et al.* (2013) muestran que la vid en Uruguay acompaña las tendencias del clima, evaluado a través del acortamiento del ciclo del cultivo, sobre todo del período de maduración (Figura 5), y la alteración en la producción de metabolitos primarios de la uva de Tannat, con tendencia a la disminución de la acidez como consecuencia del aumento de temperaturas en acuerdo con Duchêne y Schneider (2005) y García de Cortázar-Atauri (2006) (Figura 6). Sin embargo, estas alteraciones provenientes de tres viñedos del sur de Uruguay, pueden estar afectados por otros factores, además de la variabilidad anual del clima, como puede ser la evolución de las prácticas de manejo, el tipo de suelo, entre otras.

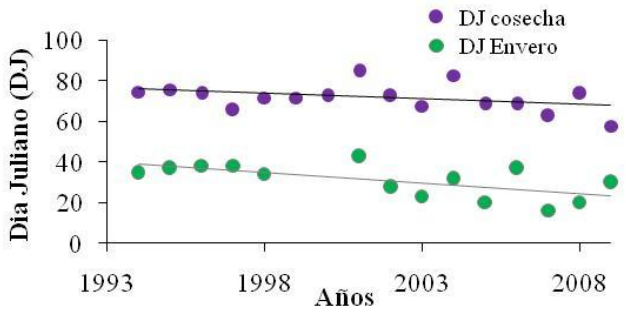


Figura 5. Fechas de envero y de cosecha expresadas en días julianos para el período 1994 a 2009.

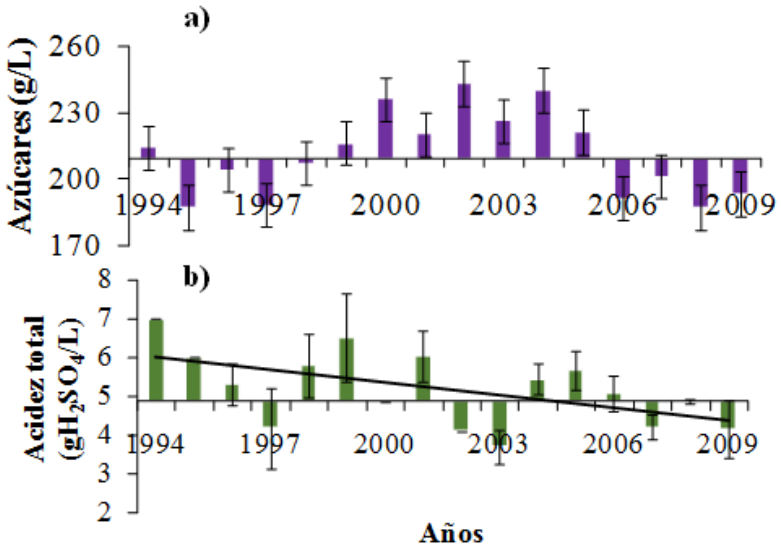


Figura 6. Evolución de los contenidos en azúcares (g/l) (a) y acidez total (g H2SO4/l) (b) en cosecha para el periodo 1994-2009.

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.

Para el caso de los viñedos del sur de Uruguay, la variabilidad del clima no es lo suficientemente conocida. A nivel de macro-clima, Ferrer (2007) caracteriza al país en seis regiones agro-climáticas para la vid. La región sur se clasifica como templado cálido, con noches templadas y sequía moderada, correspondiendo al grupo climático $ISA_1IHA_4IFA_2$ según la Clasificación Climática Multi-criterio adaptada a la vid (Tonietto y Carbonneau, 2004, Ferrer 2007) (Figura 7).

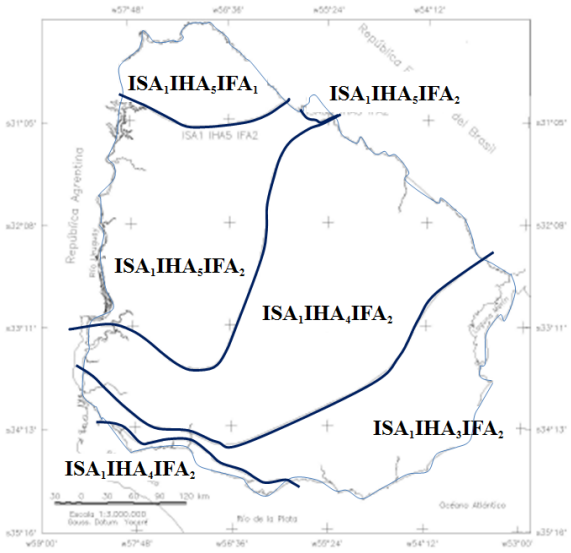


Figura 7. Clasificación Climática Multicriterio en Uruguay (Ferrer, 2007).

A nivel del meso-clima, no existen trabajos nacionales que determinen la variabilidad que existe en determinadas zonas del país y por ende, tampoco dentro de las regiones vitícolas. Si bien Ferrer *et al.* (2012) comparan la tipicidad de la uva en diferentes regiones vitícolas, el clima como componente esencial del *terroir* debe ser evaluado a meso.escala para determinar los factores locales (topografía, exposición, distancia de una masa de agua) que pueden estar influenciando a la vid y por tanto, imprimiendo tipicidad a la uva del lugar.

Para la región sur de Uruguay, la extensión del estuario del Río de la Plata promueve una fuente superficial de contraste térmico parecida a la de un océano (Sraibman 2009). A una escala más local, la diferencia térmica entre el Río y la tierra, además de la situación geográfica de llanuras suaves, parecen ser favorecedoras para establecer y permitir la penetración de la brisa del mar en la región vitícola.

1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo general del estudio es definir la variabilidad del clima actual de los viñedos de la región Sur de Uruguay, evaluar los posibles impactos en la vid, y aportar respuestas para la adaptación a las consecuencias del cambio climático.

Para cumplir con el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la distribución espacial y temporal de la temperatura a meso-escala y la ocurrencia de eventos locales de la región,
- Evaluar los posibles impactos de la variabilidad espacial de la temperatura sobre la variedad Tannat, a partir del seguimiento fenológico y las posibles diferencias en la composición de la uva en cosecha,
- Evaluar la vulnerabilidad y capacidad adaptativa del sistema vitivinícola mediante la percepción de los actores del sector (viticultores y asesores técnicos) al clima,
- Identificar medidas de adaptación a la variabilidad local del clima, proponiendo estrategias a corto, mediano y largo plazo.

1.3. PRESENTACIÓN DE LOS CAPÍTULOS

La tesis se compone de seis capítulos además del presente, los cuales corresponden a los diferentes componentes del estudio: clima (Capítulo 2), vid (Capítulo 3 y 4), percepción y adaptación (Capítulo 5) y conclusiones generales y perspectivas (Capítulo 6). La descripción de cada capítulo se detalla a continuación.

- El **capítulo 2** analiza la variabilidad espacial y temporal de la temperatura a meso-escala, en la región vitícola costera del sur de Uruguay, en los Departamentos de Canelones y Montevideo. El estudio fue realizado mediante una red de sensores de temperatura instalados en diez viñedos comerciales, a diferentes distancias del Río de la Plata y situaciones topográficas, para poder determinar la influencia de estos factores sobre la distribución térmica en la región. (*Circulation atmosphérique locale et impacts thermiques dans un vignoble côtier : observations dans le sud de l'Uruguay*)
- El **capítulo 3** y **capítulo 4** tratan los posibles impactos de la temperatura de la región sobre la vid. Se presenta la relación de la variabilidad espacial de la temperatura con el crecimiento y desarrollo de cada parcela de Tannat,

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

determinada mediante el registro de los diferentes estados fenológicos (Capítulo 3) y la composición de la uva en cosecha (Capítulo 4). *(¿El comportamiento fenológico de Tannat (Vitis vinifera L.) es afectado por la variabilidad espacial de la temperatura en la región costera del sur de Uruguay?* y *Tannat grape berry composition responses to spatial variability of temperature in a coastal wine region*)

- El **capítulo 5** aborda el estudio de la percepción y adaptación del cambio climático en la región. A partir de entrevistas a los principales actores de la región (viticultores y asesores técnicos) se analiza la evolución de las prácticas agrícolas realizadas en sus viñedos y el rol del clima en la toma de decisiones. También se detallan resultados de vulnerabilidad de los sistemas de producción y posibles medidas de adaptación a corto, mediano y largo plazo (*Percepciones y respuestas a la variabilidad del clima en una región vitícola de Uruguay*).
- Un **capítulo 6** es consagrado a las conclusiones finales y perspectivas del estudio.

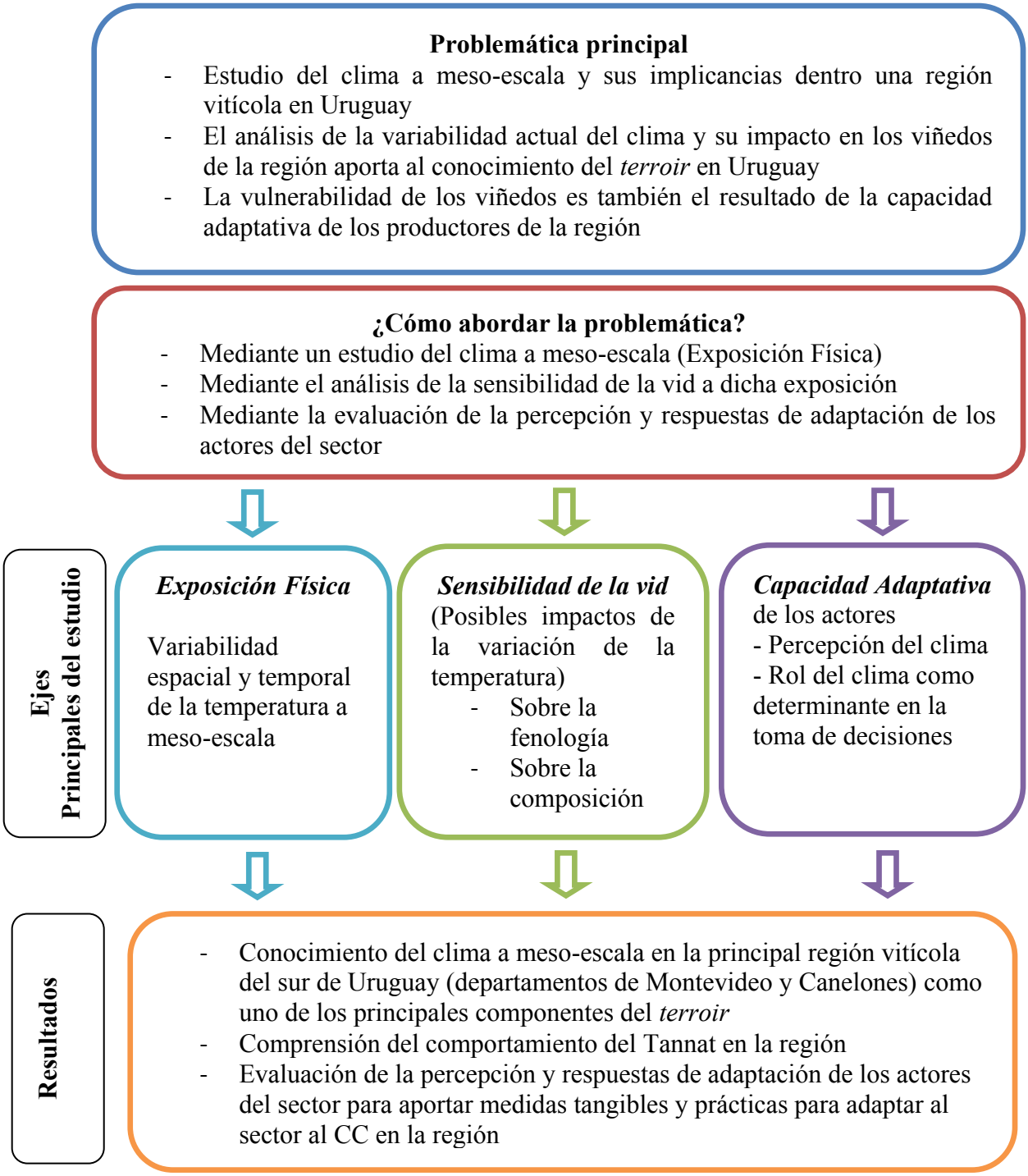


Figura 8. Esquema general del estudio realizado.

2. CIRCULATION ATMOSPHERIQUE LOCALE ET IMPACTS THERMIQUES DANS UN VIGNOBLE COTIER : OBSERVATIONS DANS LE SUD DE L'URUGUAY [1]

2.1. RESUMÉ

L'objectif est de contribuer au développement des connaissances sur le climat à échelle fine des vignobles uruguayens. La variabilité de la température est étudiée en relation avec les circulations atmosphériques locales dans la région viticole côtière de Montevideo et Canelones, la plus importante du pays, au sud de l'Uruguay. Des capteurs de température ont été installés dans des vignobles, répartis principalement en fonction de la topographie et de la distance à l'estuaire du Río de la Plata. Cette étude porte sur trois saisons végétatives (septembre à mars, pour 2012, 2013 et 2014), sur les données observées de température obtenues par neuf capteurs ainsi que des données climatiques complémentaires d'humidité relative et de vent (vitesse et direction) issues de deux stations météorologiques automatiques, situées à 0,8 km et 14,8 km du Río de la Plata. L'étude des données climatiques horaires de vent a permis d'identifier la fréquence de brise de mer sur la région viticole pendant la période de maturation du raisin. La chute des températures a atteint plus de 4°C entre 10 h et 14 h (Heure Locale) sur toutes les parcelles exposées au Sud lors du jour le plus chaud de l'été 2012. De moindre ampleur et de plus courte durée, cette baisse des températures a été enregistrée jusqu'à 30 km à l'intérieur du vignoble. Dans des conditions thermiques extrêmes au cœur de la période de maturation des raisins, l'impact de la brise sur les températures de la région viticole peut réduire le stress thermique pour l'activité photosynthétique et ainsi, être bénéfique au développement des composantes primaires et secondaires dans les raisins.

Mots-clés : Variabilité de la température, brise de mer, région viticole côtière, Uruguay.

[1] Artículo publicado en la revista internacional *Climatologie*. Cita: Fourment M, Bonnardot V, Planchon O, Ferrer M et Quénol H. 2014. Circulation atmosphérique locale et impacts thermiques dans un vignoble côtier : observations dans le sud de l'Uruguay. Climatologie, 11, 47-64.

2.2. SUMMARY

Local atmospheric circulation and thermal impacts in a coastal wine region: observations in southern Uruguay

The aim of this work was to contribute to increase knowledge on fine scale climate in a wine region of Uruguay. Temperature variability was studied in relation to local atmospheric circulation in the coastal Montevideo and Canelones wine regions in southern Uruguay. Temperature data loggers were installed in commercial vineyards according to topography and distance from the La Plata river estuary. Observed temperature data from nine sensors and complementary climatic data of humidity and wind (velocity and direction) from two automatic stations, located at 0.8 and 14.8 km from La Plata river were analyzed over three growing seasons (September to March of 2012, 2013 and 2014). The analysis of hourly wind data allowed identifying the development of sea breeze over the wine region during the ripening period. The drop in temperature reached more than 4 ºC between 10:00 to 14:00 (Local hour) at the south-facing plots, during the hottest day of summer 2012. With a shorter duration and less intensity, the drop in temperature was observed 30 km inland. Under extreme thermal conditions for grapevine during the ripening period, the sea breeze impact on temperature in the wine region could be of importance in reducing the thermal stress for plant functioning, like photosynthesis activity and berry synthesis and accumulation components.

Keywords: Temperature variability, Sea breeze, Coastal wine region, Uruguay.

2.3. INTRODUCTION

Dans la région viticole la plus importante de l'Uruguay (Montevideo et Canelones) (figure 1), une forte variabilité spatiale de la température a été observée en raison de la configuration du relief et/ou de la proximité à la mer (Fourment *et al.*, 2013), comme cela se retrouve dans d'autres régions viticoles à travers le monde (Quénol *et al.*, 2007 ; Bonnardot *et al*., 2012 ; Bonnefoy *et al.*, 2013), générant différentes conditions thermiques pour la phénologie de la vigne (Calame *et al.*, 1977). Les connaissances concernant les réponses de la vigne à son environnement au sens large, y compris le climat, sont nombreuses (inter alia Deloire *et al.*, 2005 ; Quénol, 2014). Ainsi, les conditions thermiques durant la période végétative de la vigne et de la maturation du raisin sont déterminantes car elles affectent les métabolismes primaires (photosynthèse et accumulation de sucres – Kliewer, 1977 ; Jackson et Lombard, 1993 ; Huglin et Schneider, 1998 ; Sadras *et al.*, 2012) et secondaires (synthèse et accumulation de polyphénols, arômes du raisin – Mori *et al.*, 2007 ; Tarara *et al.*, 2008 ; Sadras *et al.*, 2012 ; Nicholas *et al.*, 2011) qui sont responsables de la composition finale du raisin et donc du vin. Des variations de chaleur extrêmes peuvent réduire le développement des arômes et altérer la couleur du vin (Mori *et al.*, 2007 ; Tarara *et al.*, 2008). Outre la température, le vent figure aussi parmi les facteurs atmosphériques contrôlant la croissance et la physiologie de la vigne. Plusieurs auteurs rapportent qu'une vitesse du vent supérieure à 4-5 $m.s^{-1}$ peut ralentir et endommager la croissance de la plante (Campbell-Clause, 1998), causer directement la fermeture des stomates et donc, réduire l'activité photosynthétique (Freeman *et al.*, 1982 ; Kliewer et Gates, 1987 ; Gladstones, 1992), avec indirectement des altérations sur les activités métaboliques de la maturation, notamment une baisse de la concentration des sucres réducteurs, une augmentation de l'acidité et un possible retard de la maturation de la baie (Jackson et Lombard, 1993 ; Bettiga *et al*., 1996 ; Carey *et al.*, 2002).

Par ailleurs, par rapport aux conditions de température et de vent, une circulation atmosphérique locale de brise de mer dans les régions viticoles côtières peut être un facteur majeur de variation de ces deux facteurs atmosphériques, comme cela a été

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

montré par exemple dans le district viticole de Stellenbosch en Afrique du Sud (Bonnardot *et al.,* 2002). En effet, l'analyse de l'évolution journalière des données de vent de surface, de température et d'humidité atmosphériques dans ce vignoble de l'hémisphère sud a permis de montrer que l'occurrence de telles circulations locales pouvait y modifier les conditions climatiques, surtout en février, mois le plus chaud et surtout période de maturation du raisin. En situation synoptique anticyclonique favorisant un différentiel thermique important entre la surface continentale et la mer (au moins 4°C aux latitudes intertropicales : Okoola, 1978 ; Cautenet et Rosset, 1989 ; et 6°C aux hautes et moyennes latitudes : Cautenet, 1988), avec le développement d'une cellule de brise de mer, une diminution de température de 3 à 6 ºC aux heures les plus chaudes de la journée a pu être enregistrée dans les vignes les plus exposées, coïncidant à l'avancée de la brise sur les terres (Bonnardot *et al.*, 2005). La vitesse du vent pendant ces événements de brise de mer a été mesurée, en moyenne, entre 4 et 6 $m.s^{-1}$. L'impact de ces facteurs climatiques sur les arômes de différents cépages a été mis en évidence (Carey *et al*., 2003).

A l'échelle de la région du Río de la Plata, des études de brise de mer ont été réalisées en Argentine (Sraibman, 2009 ; Berri *et al.*, 2010 ; Humántico-Cisneros et Piccolo, 2011) mais aucune étude de la sorte n'a encore été menée en Uruguay et plus précisément, sur la région viticole de Montevideo et Canelones. La situation géographique semble pourtant théoriquement propice à l'établissement et à la pénétration de telles circulations atmosphériques sur le vignoble côtier. En effet, ce vignoble est situé au sud de l'Uruguay, en zone tempérée, à environ 34° de latitude Sud et surtout, en bordure de l'estuaire du Río de la Plata qui, large d'une centaine de kilomètres vers Montevideo, est une imposante superficie aquatique à proximité du vignoble (figure 1). Des centres de hautes pressions souvent situés sur l'Atlantique, ou plus au nord du pays en été, génèrent des vents d'est ou nord-est dans la région, produisant des anomalies négatives journalières de la température de surface océanique (Simionato *et al.*, 2009). Ce différentiel thermique terre-mer et la configuration topographique plus ou moins plate de la région semblent ainsi être favorables à l'établissement et à la pénétration de brise de mer sur le vignoble côtier. C'est l'hypothèse retenue et il est donc intéressant d'étudier ce phénomène d'échelle

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

régionale, qui caractérise l'ambiance climatique du vignoble pour aider à mieux comprendre le comportement bioclimatique de la vigne dans cette région sud-américaine.

L'objectif est de contribuer au développement des connaissances sur le climat à échelle fine des terroirs viticoles uruguayens, et plus précisément, d'analyser les phénomènes de brise dans la région sud du pays et d'évaluer les possibles impacts des contraintes climatiques dans les vignobles.

2.4. SITE EXPERIMENTAL, DONNEES ET METHODES

La région étudiée est le territoire viticole de Montevideo et Canelones, situé au sud de l'Uruguay en bordure de l'estuaire du Río de la Plata (figure 1). C'est la région viticole la plus importante du pays puisqu'elle totalise 76,4 % de la superficie des vignobles (INAVI, 2013). Le cépage le plus cultivé est le *Tannat*, cépage rouge prédominant et traditionnel en Uruguay.

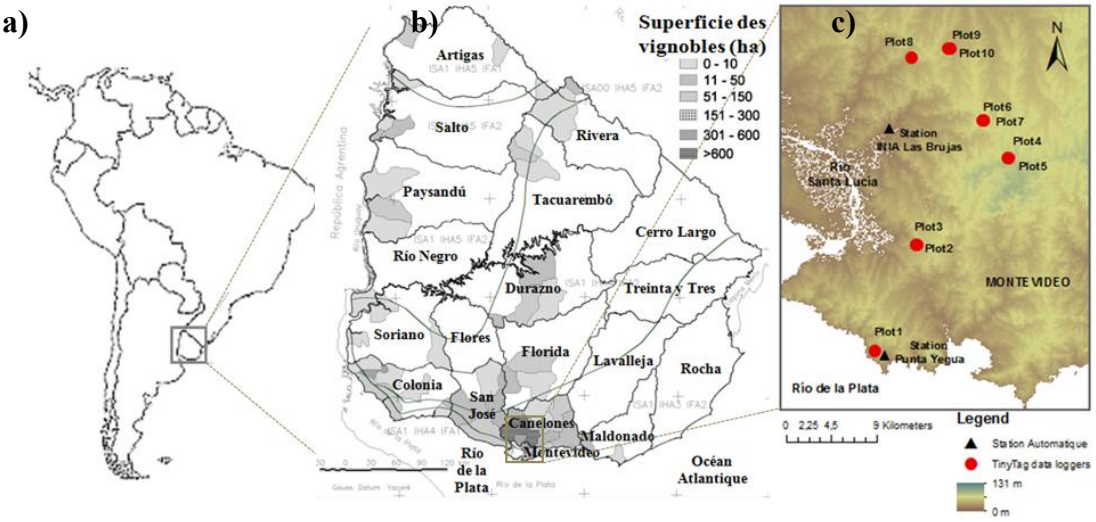


Figure 1 : Cadre géographique de la région étudiée : situation à l'échelle a) de l'Amérique du Sud ; b) de l'Uruguay et de ses régions viticoles (d'après Ferrer, 2007) et c) de la région viticole de Montevideo et Canelones (avec localisation du réseau de capteurs thermiques et des stations automatiques météorologiques INIA Las Brujas et Punta Yeguas ; source : ArcGIS). *Studied area: location a) at the South American scale; b) at the Uruguayan scale and wine producing regions and c) at the scale of the wine region of Montevideo and Canelones with location of the TinyTag*

data loggers and the automatic meteorological stations of INIA Las Brujas and Punta Yeguas (Map source: ArcGIS).

Selon la classification climatique de Köppen, la région présente un climat subtropical doux humide (Cfa). Selon la normale 1961-1990, les hivers sont doux (température moyenne supérieure à 10°C de juin à août), les étés sont chauds (température moyenne de janvier et février supérieure à 22°C) et la pluie est régulière tout au long de l'année (au moins 80 mm par mois), pour atteindre un total annuel supérieur à 1000 mm (figure 2). Selon la classification climatique multicritères (MCC) dédiée à la description des climats viticoles mondiaux (Tonietto et Carbonneau, 2004), la région appartient à la classe climatique *IH4, IF1 IS1*, c'est-à-dire « tempéré chaud avec des nuits tempérées et une sécheresse modérée » (Ferrer, 2007). Les conditions météorologiques les plus fréquemment observées en été sur l'Uruguay et les régions voisines du Rio Grande do Sul au Brésil et de la province de Buenos Aires en Argentine, sont caractérisées par une alternance entre masses d'air instable pluviogène d'origine tropicale et influence stabilisante (anticyclonique) de l'océan Atlantique (Prohaska, 1976).

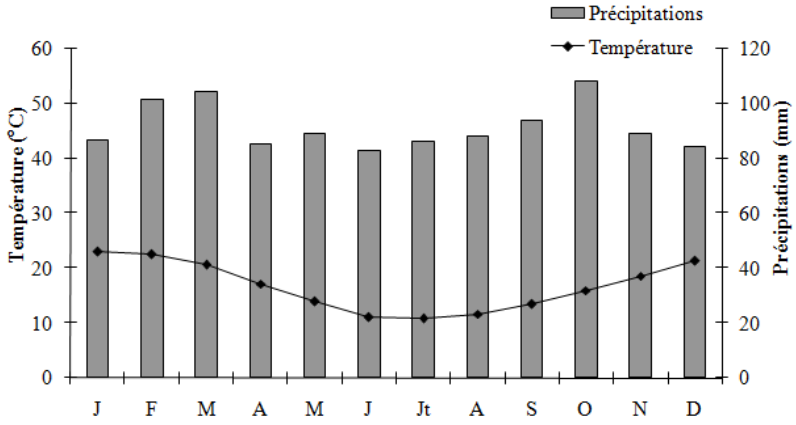


Figure 2 : Température et précipitations moyennes mensuelles à Montevideo (normale 1961-1990 ; source : OMM). *Monthly mean temperature and rainfall in Montevideo; average for the 1961-1990 period (data source: WMO).*

Pour obtenir des données climatiques dans cette région viticole, dix capteurs de température de type TinyTag Talk 2 (Gemini Data Loggers Ltd., UK) ont été

installés depuis septembre 2011 dans des vignobles commerciaux et répartis principalement en fonction des différences topographiques et de la distance à l'estuaire du Río de la Plata. Cette phase s'est réalisée dans le cadre des projets ANR-JC-TERVICLIM et GICC-TERADCLIM (Quénol et Bonnardot, 2014) (figure 1 et tableau 1). Seules les données de neuf d'entre eux ont été exploitées en raison de 40 % de données manquantes pour la saison 2013-2014 pour l'un des capteurs. L'étude porte sur les données des périodes végétatives (c'est-à-dire du 1er septembre au 15 mars) des saisons 2011-12, 2012-13 et 2013-14. Nous avons aussi analysé des données climatiques complémentaires issues de deux stations météorologiques automatiques situées près des vignobles étudiés : une située à 15 km du Río de la Plata (Station de l'INIA Las Brujas) et l'autre située à moins d'un kilomètre du fleuve (Station Punta Yeguas). La station Punta Yeguas (de type Davis Vantage Pro2, USA) a été installée à côté du Río de la Plata, dans la parcelle la plus proche du fleuve (Plot 1) en décembre 2012, pour analyser plus spécifiquement les effets éventuels de la brise sur la région viticole côtière.

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

Tableau 1 : Caractéristiques géographiques du réseau de capteurs TinyTag et des stations automatiques déployé dans la région viticole de Montevideo et Canelones. * Le capteur du Plot 4 n'est pas utilisé en raison de 40 % de données manquantes pour la saison 2013-2014. *Geographical characteristics of the TinyTag data loggers network and the automatic meteorological stations in the wine region of Montevideo and Canelones. * The data logger located in Plot 4 was not used because of 40 % missing data during the 2013-2014 season.*

Parcelle	Distance du Río de la Plata (km)	Altitude (m)	Pente (%)	Exposition
Plot1	0,9	34	3,3	Sud
Plot2	11,7	31	1,3	Ouest
Plot3	11,7	29	0,9	Ouest
Plot4*	18,3	95	2,3	Est
Plot5	18,3	83	2,9	Est
Plot6	21,9	65	2,6	Sud-est
Plot7	21,9	62	2,6	Sud
Plot8	28,0	53	4,4	Sud-est
Plot9	28,6	49	1,6	Nord
Plot10	28,6	46	3,6	Sud-est
Station Punta Yeguas	0,9	34	3,3	Sud
Station INIA Las Brujas	18,6	32	0,9	Sud-Ouest

Les données des stations météorologiques INIA Las Brujas (INIA, 2013) et Punta Yeguas, ont été utilisées afin d'analyser d'autres variables climatiques, notamment le vent (vitesse et direction) et l'humidité relative. La période étudiée s'étend du 1er novembre au 28 février de la saison 2013-14 en raison des données disponibles. La fréquence de la direction du vent et la moyenne de la vitesse du vent ont été calculées sur cette période du cycle végétatif, pendant le jour (7 h à 18 h), pendant la nuit (19 h à 6 h) et pendant les heures les plus chaudes de la journée (13 h à 15 h) pour étudier les circulations atmosphériques locales aux deux stations. Nous avons aussi calculé le nombre de jours avec une vitesse de vent supérieure à 4 $m.s^{-1}$ pour évaluer l'impact potentiel sur la physiologie de la vigne en période de maturation du raisin (Gladstones, 1992 ; Carey *et al.*, 2002 ; Bonnardot *et al.*, 2005).

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

Un intérêt particulier s'est porté sur l'étude de la brise de mer pendant la période de maturation du raisin. L'analyse se concentre sur le mois de février, mois précédant la vendange, pour analyser les effets possibles sur la composition finale du raisin. Une étude de fréquences de baisse de température au moment du maximum thermique journalier a été faite pendant la maturation du raisin (janvier et février) pour observer les possibles épisodes de brise de mer par parcelle. L'intensité et la durée de la baisse de température ont aussi été calculée, afin d'analyser l'influence thermique régionale de la brise.

Une procédure univariée (ANOVA) est utilisée pour déterminer les différences significatives (selon le Test de Tukey ; α=0,05) entre parcelles et années, à partir des températures maximales et minimales durant la période de maturation des raisins, selon l'amplitude thermique, la fréquence du vent et le nombre de jours avec une vitesse de vent supérieure à 4 $m.s^{-1}$ pendant le mois de février pour les trois saisons étudiées.

Avec les données enregistrées par les capteurs lors de ces trois saisons sont calculées différentes variables correspondant à des indices bioclimatiques adaptés à la vigne:

- Les degrés Jours (GDD=$\sum$(Tmj-10 ºC)), avec Tmj : Température moyenne journalière > 10ºC ;
- L'indice d'Huglin (IH=$\sum$(Tmj-10 ºC)+(Txj-10 ºC)/2*k) ; Huglin et Schneider, 1998 ;
- L'indice de Fraîcheur de Nuits (IF=Température minimale moyenne du mois de février) ;
- Les températures moyennes maximale (TX) et minimale (TN) du cycle, c'est-à-dire du 1er septembre au 15 mars ;
- Les températures moyennes maximale et minimale des mois de janvier (TXjan et TNjan) et février (TXfev, TNfev) ;
- L'amplitude thermique du 1er janvier au 15 mars ;
- Le nombre de jours avec une température maximale au-dessus de 35 ºC (NJt35) ;
- Le nombre d'heures avec une température au-dessus de 35 ºC (NHt35).

Une analyse en composantes principales (basée sur les données centrées-réduites) est calculée en utilisant ces indices pour préciser l'impact thermique des circulations atmosphériques dans le vignoble (niveau de confiance de 95 %), les ressemblances entre les parcelles en fonction des variables thermiques et dégager ainsi des profils thermiques de parcelles. Ensuite, une classification hiérarchique ascendante (selon méthode de Ward et distance euclidienne) est appliquée avec ces mêmes variables thermiques pour distinguer d'éventuelles typologies de parcelles. Un dendrogramme de classification issu de cette analyse aide ainsi à classer les comportements thermiques similaires entre parcelles.

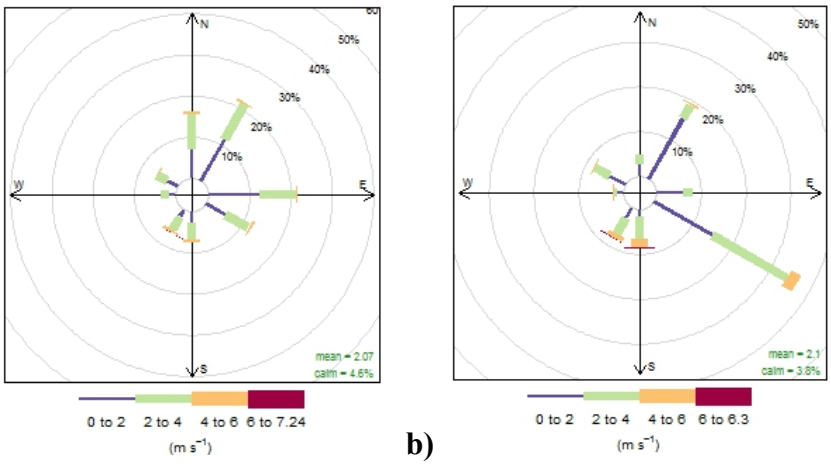
2.5. RÉSULTATS ET DISCUSSION

2.5.1. Caractérisation du vent pendant la période végétative de la vigne

Pendant la période végétative de la vigne, les directions du vent les plus fréquentes sont celles de Nord-Est et d'Est (21 %) à la station INIA Las Brujas, et celle de Sud-Est (37,5 %) à Punta Yeguas, station de référence la plus proche de la côte (figure 3). La fréquence remarquablement élevée des vents de Sud-Est à Punta Yeguas souligne l'effet de canalisation du vent synoptique par le Río de la Plata, le vent de Nord-Est devenant secondaire. La vitesse du vent est plus élevée à proximité du Río de la Plata et diminue vers l'intérieur (du fait de la forte rugosité).

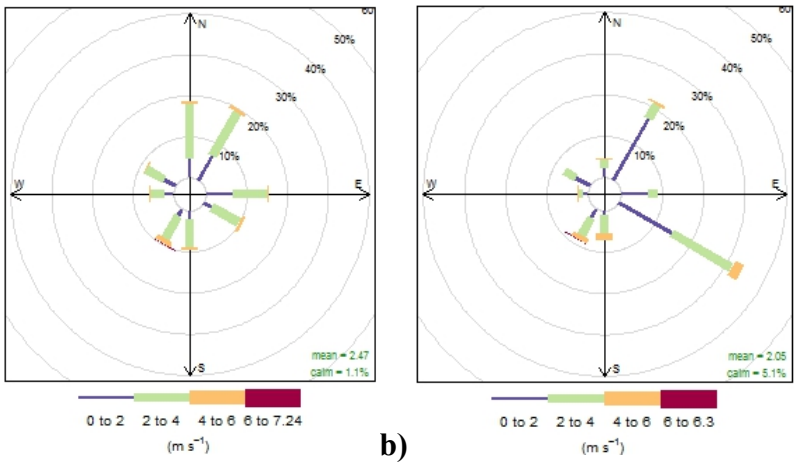
Entre le jour (figure 4) et la nuit (figure 5), les changements de fréquence de direction du vent traduisent l'influence des brises de mer et/ou de terre, de manière différente à Las Brujas et à Punta Yeguas. À Las Brujas, la fréquence plus élevée des vents de Nord-Est et surtout d'Est, de vitesses modestes (inférieures à 4 $m.s^{-1}$) mais regroupant 52,5 % de toutes les directions, pourrait traduire le développement d'une brise de terre et/ou de pente descendante malgré le faible dénivelé topographique (131 m entre le sommet le plus élevé du vignoble étudié et le Rio de la Plata). En effet, les vents des autres directions (surtout Ouest et Sud-Ouest) sont faibles ou quasi inexistants. Pendant la journée, les directions les plus fréquemment observées sont celles de Nord-Est et Nord, correspondant donc au flux dominant à l'échelle synoptique, mais on voit nettement se renforcer (en fréquence et en force) les vents

de Sud, indiquant l'arrivée de la brise de mer de façon répétée à cette station. À Punta Yeguas, les vents de Sud-Est restent les plus fréquents de jour comme de nuit, mais on note aussi un renforcement (fréquence et force) des vents de Sud. Ainsi, sur la côte du Río de la Plata, la circulation de brise de mer existe bien, mais elle est en grande partie masquée par le vent dominant de Sud-Est (canalisé par l'estuaire) auquel elle se combine.



a) **b)**

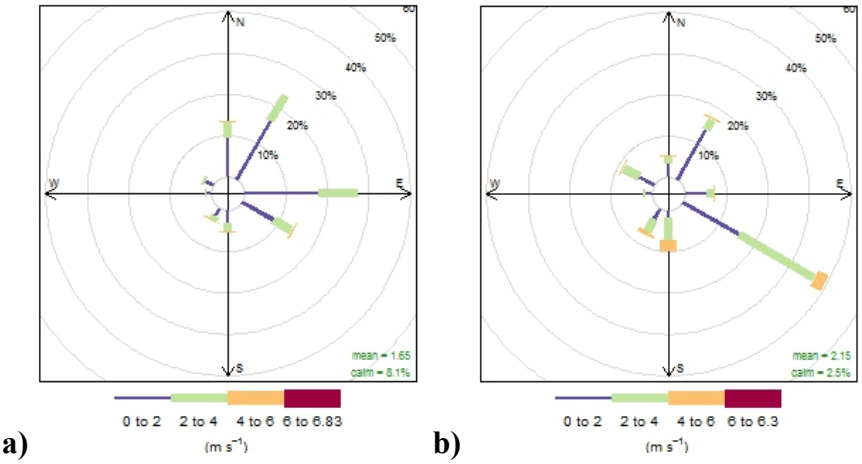
Figure 3 : Fréquence et intensité des vents par secteur à la station INIA Las Brujas **(a)** et Punta Yeguas **(b)** – moyenne pour la période de novembre à février 2014. *Wind frequency and velocity per sector at the INIA Las Brujas station **(a)** and Punta Yeguas station **(b)** - average for the November-February 2014 period.*



a) **b)**

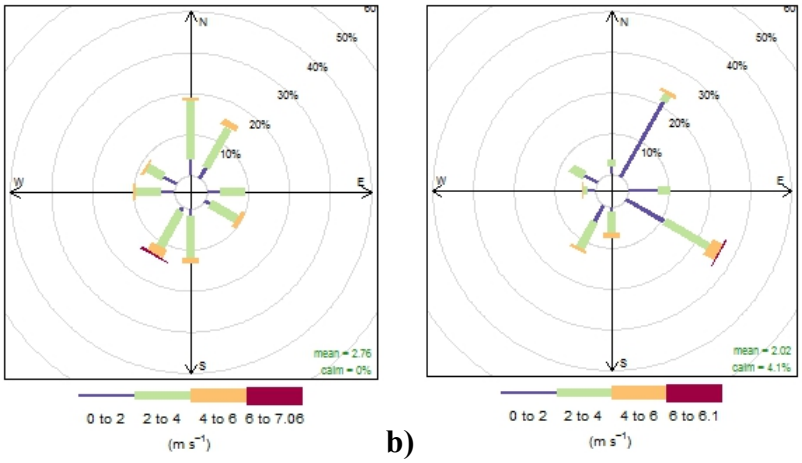
Figure 4 : Fréquence et intensité des vents par secteur à la station INIA Las Brujas **(a)** et Punta Yeguas **(b)** – moyenne pour la période de novembre à février 2014,

pendant le jour (7 h à 18 h). *Wind frequency and velocity per sector at the INIA Las Brujas station* ***(a)*** *and Punta Yeguas station* ***(b)*** *- average for the November-February 2014 period, during the day (7:00 to 18:00).*



a) **b)**

Figure 5 : Fréquence et intensité des vents par secteur à la station INIA Las brujas **(a)** et Punta Yeguas **(b)** – moyenne pour la période de novembre à février 2014, pendant la nuit (19 h à 6 h). *Wind frequency and velocity per sector at the INIA Las Brujas station* ***(a)*** *and Punta Yeguas station* ***(b)*** *- average for the November - February 2014 period, during the night (19:00 to 6:00).*



a) **b)**

Figure 6 : Fréquence et intensité des vents par secteur à la station INIA Las Brujas **(a)** et Punta Yeguas **(b)** - moyenne pour la période de novembre à février 2014, pendant les heures plus chaudes du jour (13 h à 15 h). *Wind frequency and velocity per sector at the INIA Las Brujas station* ***(a)*** *and Punta Yeguas station* ***(b)*** *- average*

for the November - February 2014 period, during the hottest hours of the day (13:00 to 15:00).

Durant les heures les plus chaudes de la journée (de 13 à 15 h), les variations de direction des vents montrent encore mieux l'influence de la brise de mer aux deux stations de référence (figure 6). On note ainsi une accentuation des caractéristiques déjà relevées à Las Brujas (vents plus forts de Sud-Ouest, avec une fréquence de 14,5 %) et à Punta Yeguas (vent le plus fort et fréquent de Sud-Est – 27,5 %), sans négliger ceux de Sud-Ouest et Sud.

Les courbes représentant la vitesse horaire du vent moyenne pour les mois de janvier et février 2014 aux deux stations (figure 7) montrent une accélération du vent en fin de matinée et pendant l'après-midi (entre 10 et 18 h). Malgré sa situation côtière, la station de Punta Yeguas enregistre des vents légèrement plus faibles en moyenne l'après-midi que ceux de Las Brujas, même si la différence n'est pas statistiquement significative entre les deux stations.

Le nombre d'heures enregistrant une vitesse supérieure à 4 $m.s^{-1}$ pendant la période de maturation (février) à la station de Las Brujas pour les trois saisons étudiées est plus important en 2013 (26 heures de plus qu'en 2012, et 20 heures de plus qu'en 2014), avec des différences significatives l'après-midi (13 h et 14 h) (tableau 2). Cette variabilité saisonnière pourrait contribuer à la différence entre les millésimes en jouant sur la composition finale de la baie, et ainsi, sur le vin. Pour la période de maturation 2014, pour laquelle on possède des données à la station de Punta Yeguas, le nombre d'heures avec une vitesse du vent supérieure à 4 $m.s^{-1}$ est élevé de jour comme de nuit, surtout durant la saison chaude. On dénombre pour cette station côtière et cette saison 2014 (janvier et février), 77 heures avec des vents forts pour les vignobles, tandis qu'on en dénombre seulement 34 à celle de Las Brujas. Ces contraintes peuvent engendrer des situations de stress sur les vignobles exposés. Ainsi, les vents les plus forts mesurés dans la parcelle 1 ont pu provoquer des altérations sur la maturation des raisins et un possible retard des stades phénologiques, notamment pour la finalisation de la maturité des baies, comme cela

a été constaté dans d'autres régions viticoles (Jackson et Lombard, 1993 ; Carey *et al.*, 2002).

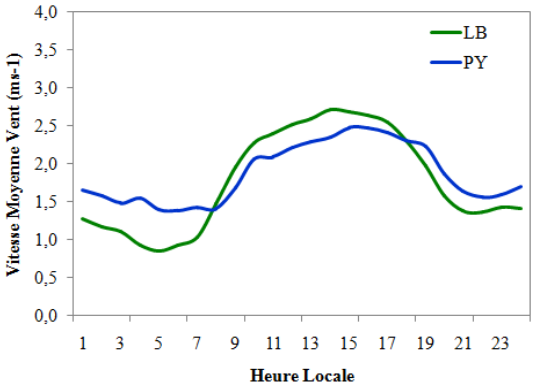


Figure 7 : Vitesse horaire du vent ($m.s^{-1}$), moyenne pour janvier et février 2014 aux stations INIA Las Brujas (LB) et Punta Yeguas (PY). *Hourly wind velocity ($m.s^{-1}$), average for January and February 2014 at INIA Las Brujas (LB) and Punta Yeguas stations (PY).*

Tableau 2 : Nombre d'heures avec une vitesse du vent supérieure à 4 $m.s^{-1}$ en février pour les saisons 2012, 2013 et 2014, à la station Las Brujas. *Number of hours with a wind velocity above 4 $m.s^{-1}$ in February for the 2012, 2013 and 2014 seasons at Las Brujas station.*

	Nombre d'heures en février avec un vent supérieur à 4 ms^{-1}		
Heure	2012	2013	2014
0	1	1	1
1	0	1	0
2	0	1	0
3	0	2	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	1
7	0	0	0
8	0	1	1
9	0	2	0
10	1	3	2
11	2	3	2
12	3	2	1
13*	2	5	2
14*	3	6	2
15	1	4	1
16	2	3	2
17	1	2	2
18	1	2	3
19	0	1	1
20	0	1	1
21	0	1	1
22	0	1	0
23	0	1	0

* Différences statistiquement significatives.

Significant differences (r^2=0,65 ; p<0,0001).

2.5.2. Circulation atmosphérique locale : étude de cas quotidiens

Afin d'illustrer un événement typique d'occurrence de brise de mer et ses impacts climatiques sur la région viticole, les données du 14 février 2012 sont utilisées. Les conditions synoptiques ce jour-là sont anticycloniques sur l'Uruguay avec un centre de hautes pressions (1026 hPa) situé à 35°S sur l'océan Atlantique Sud, au large des côtes uruguayennes, bloquant l'avancée d'un système frontal localisé à la même

latitude sur l'Argentine (CPTEC, 2013 ; figure 8) et apportant sur l'Uruguay une masse d'air chaud et humide d'origine tropicale. La situation météorologique du 14 février 2012, l'une des journées les plus chaudes de l'été de cette année (maximum de 36,8°C enregistré dans le vignoble au site Plot 8), est donc une situation typiquement estivale en Uruguay et génératrice de fortes chaleurs. Ces conditions synoptiques ont favorisé des températures élevées sur le continent, amplifiant le contraste thermique de l'air au dessus de la terre et de la mer. Sur la côte sud du pays, cette situation synoptique peut freiner la pénétration d'une brise de mer vers l'intérieur des terres, puisque le flux dominant de nord est théoriquement de direction opposée à la brise de mer dans cette région comme cela a été montré sur d'autres régions (Estoque, 1962 ; Savijärvi et Alestalo, 1988 ; Bonnardot *et al*., 2005).

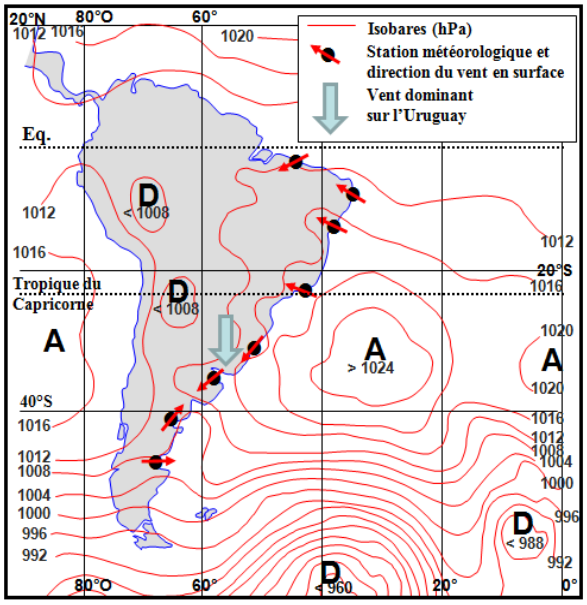


Figure 8 : Carte synoptique de l'Amérique du Sud et de l'Atlantique sud le 14 février 2012 (12h UTC). Source : Marinha do Brasil. *Synoptic weather map over South America and the South Atlantic Ocean on the 14th of February 2012 (12:00 UTC). Source: Marinha do Brasil.*

L'analyse des données de vent enregistrées à la station automatique située à 15 km du Río de la Plata (Las Brujas), montre qu'une cellule de circulation de brise de mer s'est bien mise en place : on note une augmentation de la vitesse du vent à partir de

13 h (Heure Locale - HL) pour atteindre un maximum de 3 $m.s^{-1}$ vers 17 h, accompagnée d'un changement de direction (d'une composante nord jusqu'à 14 h à une composante sud et sud-est de 15 h à 20 h HL), marquant ainsi l'arrivée de la brise de mer (figure 9a). La faiblesse du vent dominant a permis le développement de la circulation de brise de mer, pourtant de direction opposée, et sa pénétration à l'intérieur des terres. En effet, la brise de mer ne peut se développer sous des flux dominants dépassant 6 ou 8 $m.s^{-1}$ (Borne *et al.*, 1998) et, plus précisément, ne peut se développer en présence de flux dominants de direction opposée dépassant 6 $m.s^{-1}$ (Rey, 1967). Même si la moyenne de la vitesse du vent est modeste à 15 km de la côte, les vents marins originaires du Río de la Plata ont permis à la température, au moment du maximum diurne, de se stabiliser aux environs de 31,5°C de 11 h à 15 h, malgré une baisse rapide de l'humidité au contact de la surface continentale. La courbe de température du capteur de la parcelle 6, le plus proche de la station automatique, est similaire à celle de la station automatique, prouvant l'impact thermique de l'arrivée de la brise, mais le maximum thermique (35,5°C) a été légèrement plus élevé (figure 10). Cette différence thermique peut s'expliquer par la situation géographique plus éloignée et/ou par une différence d'instrumentation (capteur/station automatique).

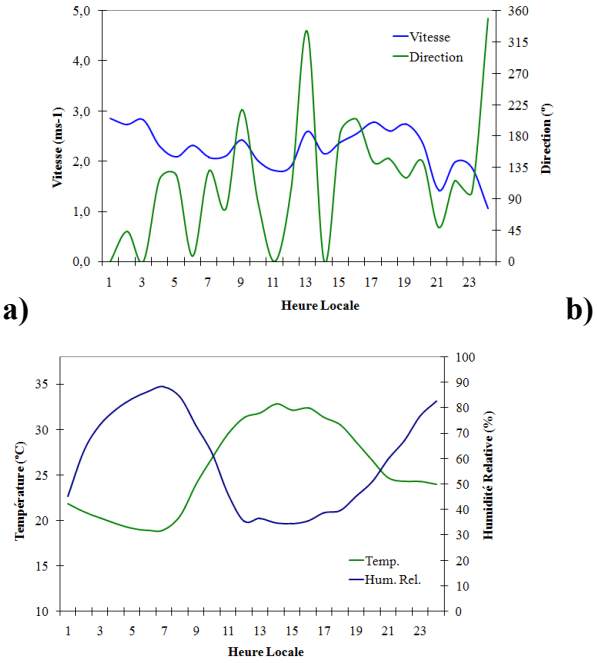


Figure 9 : Paramètres climatiques du 14 février 2012 à la station météorologique INIA Las Brujas : **a)** Vitesse ($m.s^{-1}$) et direction (º) du vent ; **b)** Température (ºC) et Humidité relative (%). *Climatic parameters of the 14th of February 2012 in INIA Las Brujas station:* ***a)*** *Wind velocity ($m.s^{-1}$) and direction (º).* ***b)*** *Temperature (ºC) and Relative humidity (%).*

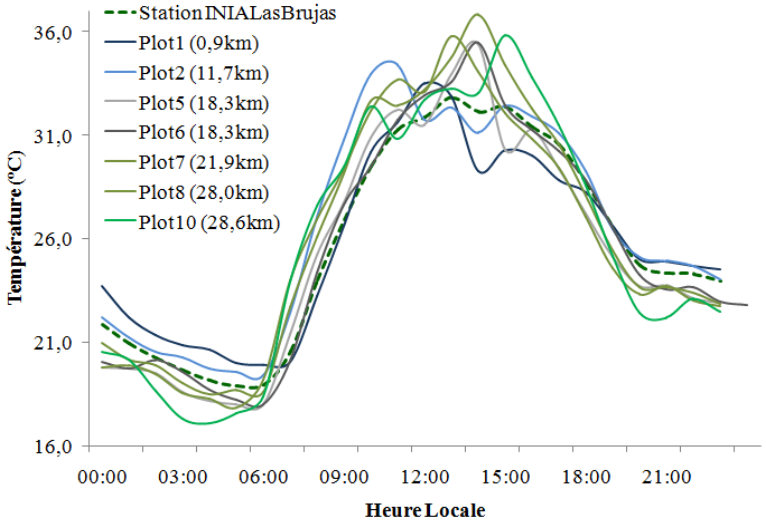


Figure 10 : Température horaire (ºC) observée le 14 février 2012 dans sept des parcelles viticoles instrumentées (avec la distance au Río de la Plata en km) et la

station INIA Las Brujas. *Observed hourly temperature (ºC) on the 14th of February 2012 in seven plots (with the distance from de Río de la Plata in km) and in the INIA Las Brujas station.*

L'arrivée de la brise est bien visible sur les courbes de température enregistrée dans les vignobles au cours de la journée du 14 février 2012, l'une des plus chaudes de l'été 2012, avec une chute de température entre 10 h et 14 h HL sur toutes les parcelles (figure 10). Cette baisse de température a été la plus marquée sur la parcelle la plus proche de la mer, avec une diminution de 4,7 ºC entre 12 h et 17 h. De moindre ampleur (-2,1 ºC) et de plus courte durée (entre 15 h et 16 h), cette baisse de température a été enregistrée jusqu'à 30 km à l'intérieur du vignoble (plot 10, le site le plus éloigné de la mer). Des conditions intermédiaires ont été observées, notamment sur les parcelles situées entre 18 et 22 km de la mer. La température sur ces parcelles a baissé de 4,2 ºC, un peu plus tard que sur la parcelle 1, entre 14 h et 16 h HL. Sur les parcelles les plus éloignées de la mer (Plot 8, 9 et 10), même si la brise a été plus faible, on remarque les sautes de température caractéristiques de l'arrivée de la brise sur chaque site.

Sachant d'une part qu'une température supérieure à 35°C provoque un stress thermique pour la photosynthèse et ainsi, la fermeture des stomates, défavorisant donc le processus de transpiration (Jackson, 2008) ; et d'autre part, qu'une température comprise entre 25 et 30°C, représente les conditions optimales pour la photosynthèse et donc, pour la maturation du raisin, on peut conclure que l'arrivée de la brise de mer sur le vignoble durant cette journée du 14 février 2012 lui a permis de limiter le stress et de bénéficier de conditions thermiques favorables pour la photosynthèse. Dans le cas de la région viticole de Montevideo et Canelones, la fréquence de brises de mer peut ainsi modifier considérablement les températures maximales pour la vigne.

Ces événements, habituels dans les conditions de températures maximales élevées, sont courants pendant toute la saison de maturation du raisin dans la région viticole côtière du sud de l'Uruguay. Ces conditions météorologiques particulières ont également été mises en évidence (figures 11 et 12) grâce aux données des deux

stations automatiques disponibles sur l'espace étudié pour la journée du 16 janvier du 2014. Les conditions synoptiques de cette journée sont similaires à celles du 14 février 2012, avec un flux dominant de direction opposée à la brise de mer sur la région étudiée. À partir du 11 h HL à Punta Yeguas et un peu plus tard à Las Brujas (figure 11b), la pénétration de la brise à l'intérieur des terres provoque une chute de température associée à une augmentation de l'humidité relative. L'évolution de la température dans les vignobles (figure 12) montre une stabilisation de la température à partir de 10 h (Plot1) et 12 h (les parcelles restantes), soulignant l'impact régional de la brise sur les conditions thermiques. Durant la journée du 16 janvier 2014, le vent est faible à Punta Yeguas (vitesse maximale : 2,25 $m.s^{-1}$ à 11 h), mais l'humidité atteint 75 % à 14 h (20,7 % plus élevée qu'à Las Brujas : figure 11a). Ainsi, durant cette journée, l'oscillation diurne de l'humidité relative est plus démonstrative de l'arrivée et de l'impact de la brise de mer que la vitesse du vent, faible en permanence.

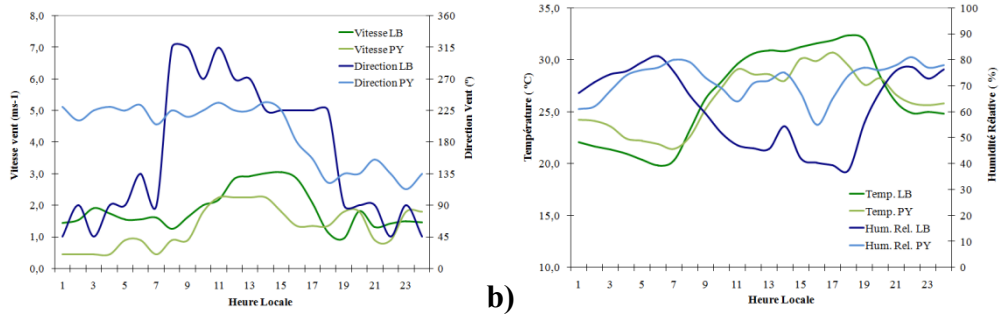


Figure 11 : Paramètres climatiques du 16 janvier 2014 : **a)** Vitesse ($m.s^{-1}$) et direction (º) du vent, **b)** Température (ºC) et Humidité relative (%), aux stations de Las Brujas (LB) et Punta Yeguas (PY). *Climatic parameters on the 16th of January 2014:* ***a)*** *Wind velocity ($m.s^{-1}$) and wind direction (º),* ***b)*** *Temperature (ºC) and Relative Humidity (%) in Las Brujas station (LB) and Punta Yeguas station (PY).*

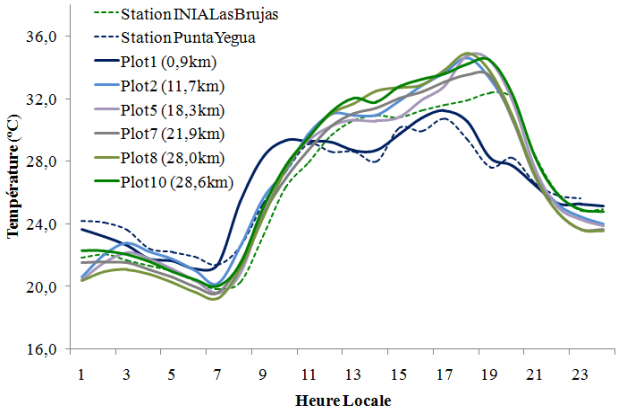


Figure 12 : Température horaire observée (ºC) le 16 janvier 2014 dans 6 des parcelles viticoles étudiées (avec la distance au Río de la Plata en km) et les stations météorologiques. *Hourly observed temperature (ºC) on the 16th of January 2014 in six of the studied plots (with their distance from Río de la Plata in km) and in the meteorological stations.*

2.5.3. Impacts thermiques dans le vignoble

L'analyse des températures dans les parcelles des vignobles étudiés révèle une forte variabilité spatiale des conditions thermiques. La figure 13 résume les températures horaires moyennes pendant la saison végétative (1er septembre au 15 mars) et les différences entre parcelles. D'une manière générale, ces différences sont expliquées par l'effet modérateur du Río de la Plata sur la température, avec un écart de 1,8 ºC pendant la nuit et de 1,4 ºC lorsque les températures sont les plus élevées. Quand les conditions thermiques sont plus extrêmes (pendant l'été), les écarts de température sont plus marqués entre parcelles, de 2 ºC durant la nuit et 1,5 ºC dans la journée (figure 13c). Au cours de la période de maturation des baies, les situations de températures extrêmes jouent un rôle négatif sur la composition finale du moût, par un effet de dégradation des acides organiques et anthocyanes (Mori *et al.*, 2007 ; Sadras *et al.,* 2012) et d'inhibition de la synthèse des sucres réducteurs et phénols du raisin (Nicholas *et al.*, 2011).

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

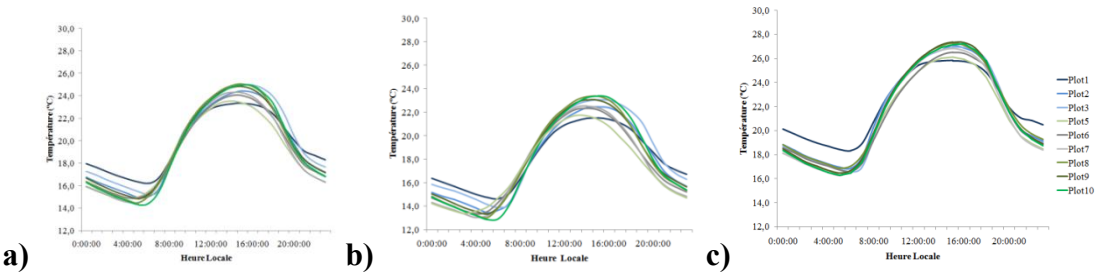


Figure 13 : Température horaire dans chaque parcelle pendant **(a)** la saison végétative de la vigne, de septembre à février ; **(b)** la saison pré-véraison, de septembre à décembre et **(c)** la saison post-véraison, de janvier à mars ; moyenne des trois saisons étudiées (2011-12, 2012-13 et 2013-14). *Hourly temperature in each plot during* **(a)** *the vine growing season, from September to March;* ***(b)*** *the pre-veraison season, from September to December; and* ***(c)*** *the post-veraison season, from January to March; average for the three studied seasons (2011-12, 2012-13 and 2013-14).*

La figure 14 analyse le gradient de température en fonction de la distance à la côte, avec quelques nuances locales liées à la position topographique des parcelles et des stations. Le calcul de l'amplitude thermique moyenne par parcelle met en évidence la parcelle la plus proche de la mer (Plot 1) par rapport aux autres parcelles (moyennes statistiquement différentes entre parcelles, r^2=0,72 ; p=0,058). Ainsi, les stations des parcelles 2 et 3 ont une amplitude thermique diurne plus forte que ne le laisserait supposer empiriquement leur seule distance à la côte. C'est leur position topographique abritée qui explique cette anomalie apparente, imposant ainsi des oscillations thermiques diurnes comparables à celles des parcelles et stations les plus éloignées de la côte.

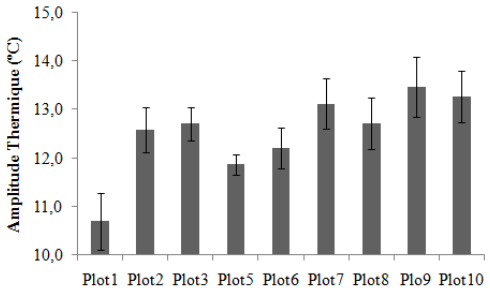


Figure 14 : Moyenne et écart type des amplitudes thermiques (ºC) pendant la période de maturation du raisin (1er janvier au 15 mars) pour les saisons 2012, 2013 et 2014 dans chaque parcelle. *Average and standard deviation of thermal amplitude (ºC) during the grape ripening period (1st January to15th March) for the 2012, 2013 and 2014 seasons in each plot.*

L'amplitude thermique diurne joue un rôle déterminant pour la qualité finale du vin. Un écart diurne de température supérieur à 15 ºC peut provoquer une dégradation des anthocyanes dans les raisins ainsi qu'un déséquilibre des composantes primaires, les sucres et l'acidité (Huglin et Schneider, 1998). Les stations des parcelles étudiées enregistrent, en moyenne, des valeurs toutes au-dessous de ce seuil, mais dans des cas particuliers d'étés chauds, comme celui de 2012, les parcelles avec des conditions thermiques extrêmes ont bien atteint le seuil critique pour la maturation correcte du raisin.

L'analyse de la fréquence des événements de brise de mer sur la région souligne, pour les années étudiées, le poids des jours chauds sur l'occurrence de ce phénomène. L'analyse du nombre de jours avec une chute de température entre 10h et 15h en janvier et février pour les trois saisons étudiées révèle des différences entre parcelles (figure 15). Le site Plot 1 est la parcelle la plus impactée par la brise, c'est-à-dire avec le plus grand nombre de jours enregistrant une chute de température, toutes intensités confondues (par exemple : 50 jours avec une baisse de température de -0,5 ºC en une heure). Au contraire, le site Plot 10 enregistre le moins d'influence de la brise sur la température, avec le nombre minimum de jours ayant enregistré ces événements (44 jours avec une baisse de température de -0,5 ºC en une heure).

Ces parcelles, représentatives des différents environnements de la région viticole étudiée (Ferrer, 2007), permettent d'illustrer, sur une même région d'étude, une grande variété de conditions possibles (et contrastées) de stress thermique pour la vigne. Ces résultats suggèrent aussi de quelle manière l'influence maritime pourrait expliquer des différences dans la composition des baies du cépage Tannat issues de ces vignobles.

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

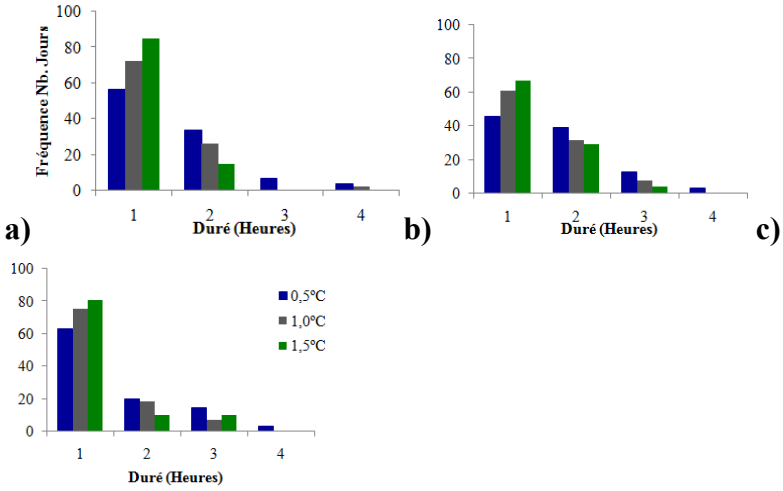


Figure 15 : Fréquences des nombres de jours avec des chutes de températures d'intensité différentes (0,5, 1 et 1,5°C) au moment du maximum journalier et durée de l'évènement (en heures) pour trois capteurs de la région : Plot 1 (a), Plot 5 (b) et Plot 10 (c) ; moyenne des trois saisons étudiées. *Frequency of days with temperature decreases of different intensity (0.5, 1 and 1.5 ºC) at the time of diurnal maximum and duration of the event (in hours) for three plots of the wine region: Plot1 (a), Plot5 (b) and Plot10 (c); average for the three studied seasons.*

2.5.4. Essai de classification des parcelles en fonction de l'impact thermique de la brise dans le vignoble

La figure 16 présente les deux principaux axes d'une analyse factorielle en composantes principales qui résument 96,6 % de la variance totale. La première composante principale (PC1) explique 66,7 % de la variance et la seconde (PC2) 29,9 %. Le premier axe est expliqué par les variables en lien avec les températures maximales, ainsi que par l'amplitude thermique ($r > 0,85$). En revanche, le deuxième axe synthétise, dans une moindre mesure, les variables relatives aux températures minimales ($0,59 < r < 0,63$) ainsi que les indices bioclimatiques ($r=0,99$ pour GDD et $r=0,66$ pour IH). Les parcelles les plus éloignées du Río de la Plata (Plot 8, 9 et 10) et les parcelles avec les situations topographiques particulières exposées au nord (Plot 2 et 3), se regroupent sur PC1, en révélant des conditions plus extrêmes ou continentales. Ce sont des parcelles avec les conditions thermiques les plus

stressantes de la région pour la vigne. Au contraire, le site Plot 1, situé près de la mer, s'oppose à ce groupe de stations par rapport à PC1, en montrant des situations thermiques moins extrêmes (près des indices de températures minimales), fraîches, grâce à l'effet du Río sur la région.

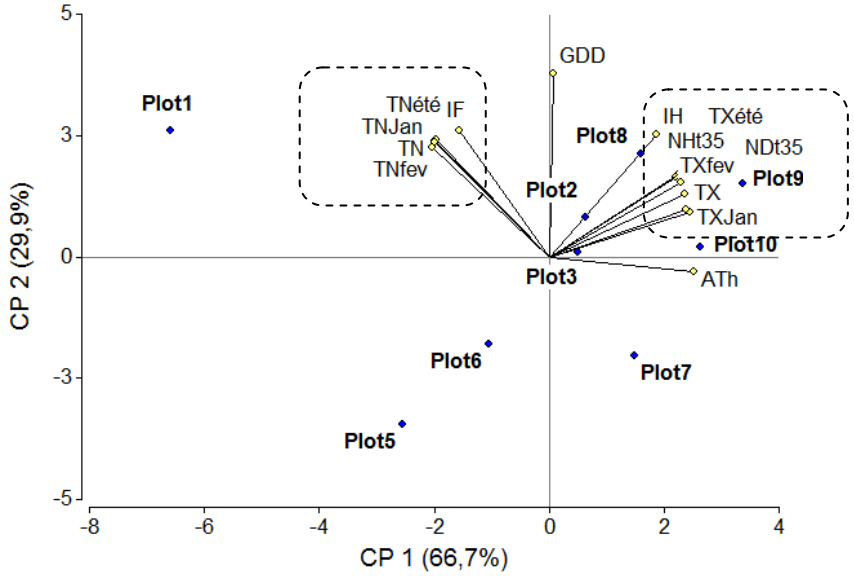


Figure 16 : Projection des individus (Plot ; en bleu) et des variables thermiques (en jaune) sur le plan principal de l'ACP (CP1 et CP 2) pour 2012, 2013 et 2014 avec TN = Température minimale ; TX = Température maximale ; IF = Indice de Fraîcheur de Nuits ; IH = Indice de Huglin ; GDD = Indice de Degrés Jours ; Ath= Amplitude thermique du 1er janvier au 15 mars ; NDT35 et NHT35 = Nombre de Jours et nombre d'Heures avec une Température au dessus 35 ºC. Les carrés pointillés indiquent les variables très fortement corrélées ($r^2 > 0,83$). *Projections of plots (in blue) and temperature variables (in yellow) in the principal plan (PC1 and PC2) for 2012, 2013 and 2014, with TN = Minimal Temperature; TX = Maximum Temperature; IF = Cool Night Index; IH = Huglin Index; GDD = Growing Degree Days; Ath= Thermal Amplitude between the 1st of January and the 15th of March ; NDT35 et NHT35 = Number of Days and number of Hours with temperature over 35 ºC. Dotted squares indicate variables with high correlation ($r^2 > 0.83$).*

Sur les mêmes variables de température, une analyse multivariée de classification hiérarchique ascendante est ensuite effectuée afin de regrouper les parcelles soumises

à des conditions thermiques similaires (figure 17). Les résultats indiquent que 55,3 % de la variance totale est expliquée par la partition en trois classes. La classe constituée par Plot 1 est caractérisée par des conditions thermiques moins extrêmes, avec une influence du Río de la Plata sur la température. C'est la classe avec les températures maximales les moins élevées (Température maximale du cycle = 24,7 ºC), les minimales les plus élevées (TN du cycle = 15,2 ºC) et l'amplitude thermique la plus faible (Moyenne pendant janvier et février de 10,7 ºC). Une autre classe est composée par les parcelles les plus éloignées de la mer (Plot 7, 8, 9 et 10) et celles avec une exposition au nord (Plot 2 et 3). L'influence du Río y est moins marquée, donc les conditions thermiques sont plus contrastées : températures maximales élevées (TX du cycle = 25,9 ºC), minimales plus basses (TN du cycle = 13,5 ºC) et amplitude thermique plus forte (Moyenne de 13 ºC en janvier). Avec des conditions thermiques intermédiaires, la dernière classe comprend les parcelles dont les altitudes sont les plus élevées de la région (Plot 5 et 6), à une distance du fleuve intermédiaire et donc, avec une modeste influence du Río de la Plata sur les températures.

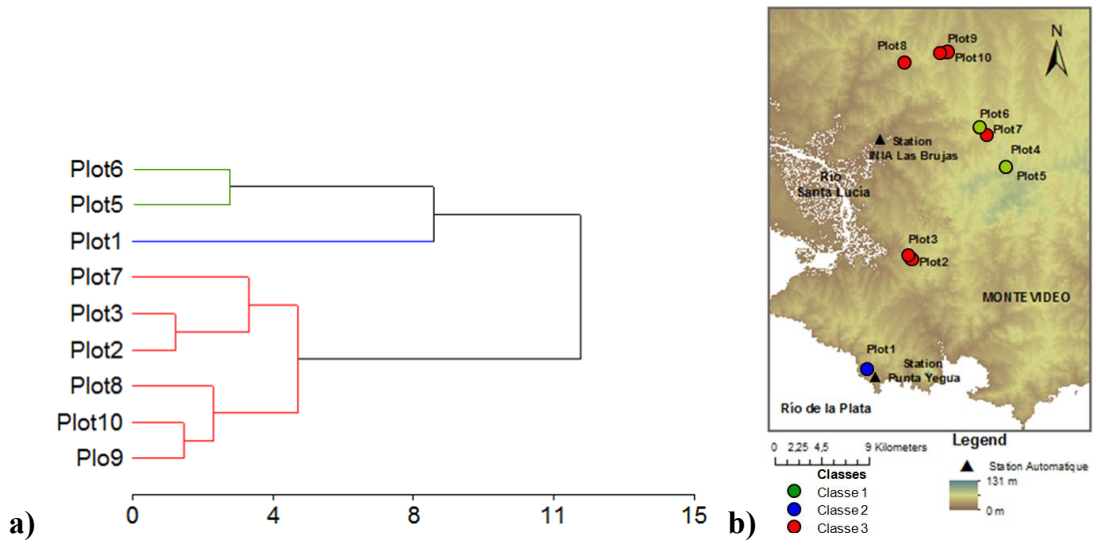


Figure 17 : Dendrogramme d'une classification hiérarchique ascendante (selon méthode de Ward) appliquée aux indices thermiques calculés à partir des données mesurées sur les 10 parcelles sur la période allant de septembre à mars pour les années 2012, 2013 et 2014 (a) et résultats cartographiés du classement (b).

Hierarchical Ascendant Classification Dendrogram (Ward Method) applied to thermal indices calculated from the observed data for the period between September and March of 2012, 2013 and 2014 (a) and spatialized results of the classification (b).

2.6. CONCLUSION

La brise de mer peut être considérée comme un élément climatique très pertinent pour aider à l'identification des terroirs viticoles côtiers, car les techniques de gestion du vignoble peuvent être influencées par ses impacts dont la variabilité spatio-temporelle est forte.

Le réseau de capteurs thermiques installé dans le vignoble de Montevideo et Canelones s'est avéré être un bon outil de mesure pour enregistrer les impacts thermiques de la brise de mer à l'échelle fine de ce vignoble. Cette étude des variations spatio-temporelles de la température observée a permis, en parallèle des données de stations météorologiques automatiques, de caractériser la pénétration de la brise de mer jusqu'à au moins 30 km sur la plus importante région viticole en Uruguay. L'étude a bien montré la chute de température au moment du maximum diurne (environ -4°C) associée à l'arrivée de la brise. Dans des conditions thermiques extrêmes au cœur de la période de maturation des raisins, l'impact de la brise sur la température pourrait donc réduire le stress thermique pour l'activité photosynthétique et ainsi, être bénéfique au développement des composantes primaires et secondaires des raisins.

Cette étude a mis l'accent sur les impacts thermiques mais il faudra dans le futur également développer l'analyse des impacts du vent et de l'humidité relative. En effet, comme cela a été montré, la variabilité saisonnière des vents supérieurs à 4 $m.s^{-1}$ pourrait également contribuer à la différence entre les millésimes. Une modélisation atmosphérique méso-échelle incluant différentes conditions synoptiques est donc envisagée sur la région pour améliorer les connaissances des processus atmosphériques régionaux et locaux auxquels est soumis ce vignoble.

2.7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BERRI G., SRAIBMAN L., TANCO R.A. & BERTOSSA G., 2010 : Low-level wind field climatology over the La Plata River region obtained with a mesoscale atmospheric boundary layer model forced with local weather observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49, 1293-1305.

BETTIGA L.J., DOKOOZLIAN N. & WILLIAMS L.E., 1996 : Windbreaks improve the growth and yield of Chardonnay grapevines grown in a cool climate. In: Proceedings of the Fourth International Symposium on Cool Climate Viticulture and Enology, Rochester, New York, 43-46.

BONNARDOT V., PLANCHON O., CAREY V.A. & CAUTENET S., 2002 : Diurnal wind, relative humidity and temperature variation in the Stellenbosch-Groot Drakenstein winegrowing area. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 23 (2), 62-71.

BONNARDOT V., CAREY V., MADELIN M., CAUTENET S., COETZEE Z. & QUENOL 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, 1-13.

BONNARDOT V., PLANCHON O. & CAUTENET S., 2005 : The sea breeze development under an offshore synoptic wind in the South Western Cape and implications for the Stellenbosch wine producing area. *Theoretical and Applied Climatology*, 81, 203-218.

BONNEFOY C., QUÉNOL H., BONNARDOT V., BARBEAU G., MADELIN M., PLANCHON O. & NEETHLING E., 2013 : Temporal and Spatial Analyses of Temperature in a French Wine-Producing Area: the Loire Valley. *International Journal of Climatology*, 33 (8), 1849-1862.

BORNE K., CHEN D., NUNEZ M., 1998 : A method for finding sea breeze days under stable synoptic conditions and its application to the Swedish west coast. *Int. J. Climatol.*, 18, 901-914.

CALAME F., ROCHAIX M. & SIMON J.L., 1977 : Observations phénologiques et mesures bioclimatiques dans plusieurs sites valaisans à différentes altitudes en vue de la délimitation de l'aire viticole. *Bulletin OIV*, 601-616.

CAMPBELL-CLAUSE J.M., 1998 : Stomatal response of grapevines to wind. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 38, 77-82.

CAREY V.A., ARCHER E. & SAAYMAN D., 2002 : Natural terroir units: What are they? How can they help the wine farmer? *South African Wineland magazine*, 151, 86-88.

CAREY V.A., BONNARDOT V., SCHMIDT A. & THERON J.C.D., 2003 : The interaction between vintage, vineyard site (mesoclimate) and wine aroma of Vitis vinifera L. cvs. Sauvignon blanc, Chardonnay and Cabernet Sauvignon in the Stellenbosch-Klein Drakenstein wine producing area. *Bulletin OIV*, 76, 4-29.

CAUTENET S., 1988 : *Interaction d'une circulation méso-échelle de brise de mer avec un cisaillement de vent synoptique. Application au golfe de Guinée*. Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 204 p.

CAUTENET S. & ROSSET R., 1989 : Numerical simulation of sea breezes with vertical wind shear during dry season at Cape of Three Points, West Africa. *Monthly Weather Review*, 117, 329-339.

CPTEC, 2013 : Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. In: http://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/20981 (visité le 23 janvier 2014).

DELOIRE A., VAUDOUR E., CAREY V.A., BONNARDOT V. & VAN LEEUWEN C., 2005 : Grapevine responses to terroir: a global approach. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 39 (4), 149-162.

ESTOQUE M.A., 1962 : The sea breeze as a function of the prevailing synoptic situation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 19, 244-250.

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'écophysiologie des systèmes de conduite Espalier et Lyre sur Merlot*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 360 pages.

FOURMENT M., FERRER M., GONZÁLEZ-NÉVES G., BARBEAU G., BONNARDOT V. & QUÉNOL H., 2013 : Spatial variability of temperature and grape berry compostion at terroir scale in Uruguay. In: *Proceedings of 18th International Simposium GiESCO*. 7th to 11th July, Porto (Portugal).

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

FREEMAN B.M., KLIEWER W.M. & STERN P., 1982 : Influence of windbreaks and climatic region on diurnal fluctuation of leaf water potential, stomatal conductance, and leaf temperature of grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 33 (4), 233-236.

GLADSTONES J., 1992 : *Viticulture and environment*. Winetitles, Adelaïde, 310 pages.

HUGLIN P. & SCHNEIDER C., 1998 : *Biologie et écologie de la vigne.* Editions Tec & Doc / Lavoisier, 2ième édition augmentée, 370 p.

HUMÁNTICO-CISNEROS M.A. & PICCOLO M.C., 2011 : Caractertización de la brisa marina en el balneario de Monte Hermoso, Argentina. *Estudios Geográficos*, 271, 461-475.

INAVI, 2013 : Instituto Nacional de Vitivinicultura. In: www.inavi.com.uy (visité le 18 janvier 2014).

INIA, 2013 : Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. In: www.inia.org.uy (visité le 11 janvier 2014).

JACKSON D.I. & LOMBARD P.B., 1993 : Environmental and management practices affecting grape composition and wine quality: a review. *American Journal of Enology and Viticulture*, 44, 409-430.

JACKSON R.S., 2008 : *Wine Science principles and applications.* Third edition, Elsevier, Oxford, England, 789 pages.

KLIEWER W.M., 1977 : Influence of temperature, solar radiation, and nitrogen on coloration and composition of Emperor grapes. *American Journal of Enology and Viticulture*, 23, 71-77.

KLIEWER W.M. & GATES D., 1987 : Wind effects on grapevine growth, yield and fruit composition. *Australian and New Zealand Wine industry Journal*, 2, 30-37.

MORI K., GOTO-YAMAMOTO N., KITAYAMAM M. & HASHIZUME H., 2007 : Loss of anthocyanins in red-wine grape under high temperature. *Journal of Experimental Botany*, 58, 1935-1945.

NICHOLAS K.A., MATHEWS M.A., LOBELL D.B., WILLITS N.H. & FIELD C.B., 2011 : Effect of vineyard-scale climate variability on Pinot noir phenolic composition. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 1556-1567.

OKOOLA R.E.A., 1978 : Spatial distribution of precipitation in the Mombasa area of Kenya, Kenya Meteorological Department, *IMTR Research Report*, 1/78.

PROHASKA F., 1976 : The climate of Argentina, Paraguay and Uruguay. Climates of Central and South America, *World Survey of Climatology*, Elsevier Scientific Publishing Company, 12, 13-112.

QUÉNOL H., MACIEL A., MONTEIRO A. & BELTRANDO G., 2007 : Variabilidade espacial do gelo primaveril nos vinhedos do Vinho Verde (Portugal). *Geografía*, 32, 5-27.

QUÉNOL H. & BONNARDOT V., 2014 : A multi-scale climatic analysis of viticultural terroirs in the context of climate change: the "TERADCLIM" project. *International Journal of Vine and Wine Sciences*, LACCAVE; Vigne et Vin Publications Internationales, Special issue, 23-32.

QUÉNOL H., 2014 : *Changement climatique et terroirs viticoles*. Ed. Lavoisier, coll. Tech. & Doc, 444 pages.

REY P., 1967 : *Étude biogéographique du vent sur le littoral Languedoc-Roussillon*. Service de la carte de la végétation, CNRS, Fasc II, 143 + 86 pages.

SADRAS V.O., PETRIE P.R. & MORAN M.A., 2012 : Effects of elevated temperature in grapevine. II juice pH, titrable acidity and wine sensory attributes. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 19, 107-115.

SAVIJÄRVI H. & ALESTALO M., 1988 : The sea breeze over a lake of gulf as the function of the prevailing flow. *Beiträge zur Physik der Atmosphäre*, 61, 98-104.

SIMIONATO C.G., LUZ CLARA TEJEDOR M., MOREIRA D. & CAMPETELLA C., 2009 : Sea surface temperature variability at the Argentinean and Uruguayan Coast off the Rio De La Plata estuary: evidence of upwelling. *Journal of Coastal Research, Special Issue,* 56, 1424-1428.

SRAIBMAN L., 2009: *Modelado numérico atmosférico de capas bajas sobre el Río de la Plata y zonas de influencia y su empleo en estudios de variabilidad*

climática. Thèse de doctorat, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 144 pages.

TARARA J.M., LEE J., SPAYD S.E. & SCAGEL C.F., 2008 : Berry temperature and solar radiation alter acyclation, proportion, and concentration of anthocyanin in Merlot Grapes. *American Journal of Enology and Viticulture*, 59, 235-247.

TONIETTO J. & CARBONNEAU A., 2004 : A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124 (1-2), 81-97.

3. ¿ES EL COMPORTAMIENTO FENOLÓGICO DE TANNAT (*VITIS VINIFERA* L.) AFECTADO POR LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA REGIÓN COSTERA DEL SUR DE URUGUAY?

3.1. RESUMEN

Para aportar herramientas de adaptación de la vid a la variabilidad y cambio climático, se necesita conocer como los factores locales del clima impactan en su comportamiento. El objetivo de este trabajo fue analizar la variabilidad espacial y temporal de la temperatura a meso-escala y su relación con la fenología de la vid cv. Tannat en una región vitícola. Diez sensores de temperatura fueron instalados en viñedos comerciales en la región vitícola del sur de Uruguay. Un monitoreo fenológico fue realizado en 100 pámpanos por parcela en cuatro estados fenológicos: floración, cuajado, cierre de racimo y envero. Los datos de temperatura observada en los viñedos durante tres ciclos vegetativos (2012, 2013 y 2014) fueron analizados a través de índices bioclimáticos adaptados al cultivo. Se observó una marcada variabilidad espacial y temporal de la temperatura en la región, en función de la distancia al Río de la Plata y de la topografía. Las parcelas con mayor acumulación térmica (a mayor distancia del mar) no derivaron en la precocidad de los diferentes estados fenológicos.

Palabras clave: vid, fenología, temperatura, Tannat, sur de Uruguay.

3.2. SUMMARY

Is phenological behavior of Tannat (*Vitis vinifera* L.) affected by temperature variability in a coastal wine region of southern Uruguay?

To improve tools for vinegrape adaptability to climate change and variability, we need to know how local climatic factors impact its behavior. The aim of this work was to assess temperature spatial and temporal variability at meso-scale and its relation with Tannat phenology. Ten temperature sensors were installed in Tannat commercial vineyards in southern Uruguay wine region. A phenological monitoring was done in 100 bunches per plot in four phenological phases: flowering, fruitset, bunch closure and veraison. Temperature database of three growth seasons (2012, 2013 and 2014) were analyzed through bio climatic indices adapted to viticulture. The region showed a high spatial variability of temperature, explained by the distance to the river (estuary of Río de la Plata) and topography. The hottest plots did not impact on the precocity of the different phenological stages.

Key words: vinegrape, phenology, temperature, Tannat, southern Uruguay**.**

3.3. INTRODUCCIÓN

Dentro de una determinada región vitícola, existe una gran variabilidad climática (meso-clima). En la región costera del sur de Uruguay, la variabilidad espacial de la temperatura puede llegar a ser mayor a la variabilidad temporal, debido a la influencia del Río de la Plata y a diferentes situaciones topográficas en la región (Fourment *et al.,* 2014). Durante la estación calurosa, cuando ocurre la maduración de la uva, la temperatura promedio de viñedos separados a una distancia de 31 km, puede variar en 2,0 ºC (Fourment *et al*., 2014). A una escala local, en situaciones de calor extremo, Fourment *et al.* (2013) han constatado una diferencia de estrés térmico (Temperatura>30 ºC) que fue tres veces superior entre dos viñedos a 58 metros de distancia, debido a su situación topográfica.

La fenología concierne al tiempo de estados específicos de crecimiento y desarrollo en el ciclo anual. El momento y la duración de estas fases están influenciados sobre todo por la temperatura del aire (Jones y Davis, 2000; Keller, 2010), como también por las diferentes prácticas de cultivo (por ejemplo, el equilibrio fuente-fosa) (Keller, 2010). Los viticultores, conocedores de la variabilidad local del clima, tienen presente los estados fenológicos del ciclo del cultivo para gestionar las prácticas culturales tales como el momento de poda, el raleo de racimos, el roñado o las aplicaciones de productos fitosanitarios. En particular, las podredumbres de los racimos, pueden llegar a causar grandes pérdidas de productividad y calidad en la uva que inducen a cambios bioquímicos negativos en el vino (Steel *et al.*, 2013).

En la actualidad, las investigaciones sobre la fenología en la vid se basan en el desarrollo de modelos predictivos de estados fenológicos que ayudan a gestionar viñedos de grandes superficies a corto plazo (Caffarra y Eccel, 2009; Falcao *et al*., 2010; Parker *et al*., 2011; Tomasi *et al*., 2011, Lorenzo *et al*., 2013) o en el largo plazo, para estimar los impactos futuros al cambio climático (Caffarra y Eccel, 2011; García de Cortázar-Atauri *et al.*, 2009; Cuccia *et al.,* 2015; Fraga *et al.,* 2015; Mosedale *et al*., 2015).

A meso-escala, los estudios que relacionan la fenología con la temperatura son menos frecuentes. Jones y Davis (2000) demuestran que la ocurrencia de un

determinado estado fenológico está condicionada por los eventos que aportan frío y humedad durante el periodo precedente. Calò *et al*. (1994) muestran que la temperatura media máxima juega un rol importante en la ocurrencia de la floración, habiendo grupos de variedades que responden acortando o alargando el periodo entre brotación y floración.

Verdugo-Vázquez *et al.* (2015) a una escala más fina (escala parcelaria) determinaron que la variabilidad en la fenología permite diferenciar zonas y estas se definen según el micro-clima, con una magnitud de 4 a 9 días, dependiendo del estado fenológico.

Bonnefoy *et al.* (2014) y Madelin *et al.* (2014) citan una mayor precocidad de la vid en situaciones más cálidas dentro de una región, aunque muchas veces el manejo del viñedo y tipo de suelo enmascara el efecto de la temperatura en esta escala de estudio. Esto es porque además de la temperatura, las relaciones fisiológicas pueden tener un rol preponderante en el comportamiento fenológico de la vid. Barbeau (2008) reporta un atraso en la fenología, más particularmente del envero y la maduración, cuando el vigor de la vid es excesivo, y por lo contrario, cierta precocidad cuando el vigor de la planta es moderado a débil, debido a una mayor eficiencia fotosintética y mejor relación fuente-fosa. De la misma forma, Sadras y Moran (2013) estudian las relaciones entre temperatura y fenología cuando la vid es sometida a diferentes tratamientos de temperatura (medidas directas de efectos), y establecen una interacción entre el crecimiento y el desarrollo de la planta. El efecto de un aumento de temperatura en la maduración de la uva por ejemplo, varía según su relación fuente-fosa.

El objetivo de este trabajo fue analizar la fenología del Tannat en relación a la variabilidad espacial y temporal de la temperatura a meso-escala, en la región costera del sur de Uruguay.

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1. Área de estudio

La zona de estudio fue el sur de Uruguay (Latitud 34º40'S; longitud 56º20'W) (Figura 1), la región vitícola que reúne el 76,3 % de la superficie vitícola total (INAVI, 2015). La región presenta un clima templado subtropical con precipitaciones constantes a lo largo del año (Cfa según la clasificación de Köppen). La temperatura media anual es de 16,4 ºC y las precipitaciones de 1100 mm por año (INIA, 2016). El clima de la región también es clasificado como templado cálido, con noches templadas y sequía moderada, correspondiente al grupo climático $IS_{A1}IH_{A4}IF_{A2}$ según la Clasificación Climática Multi-criterio (Ferrer, 2007; Ferrer *et al.*, 2007).

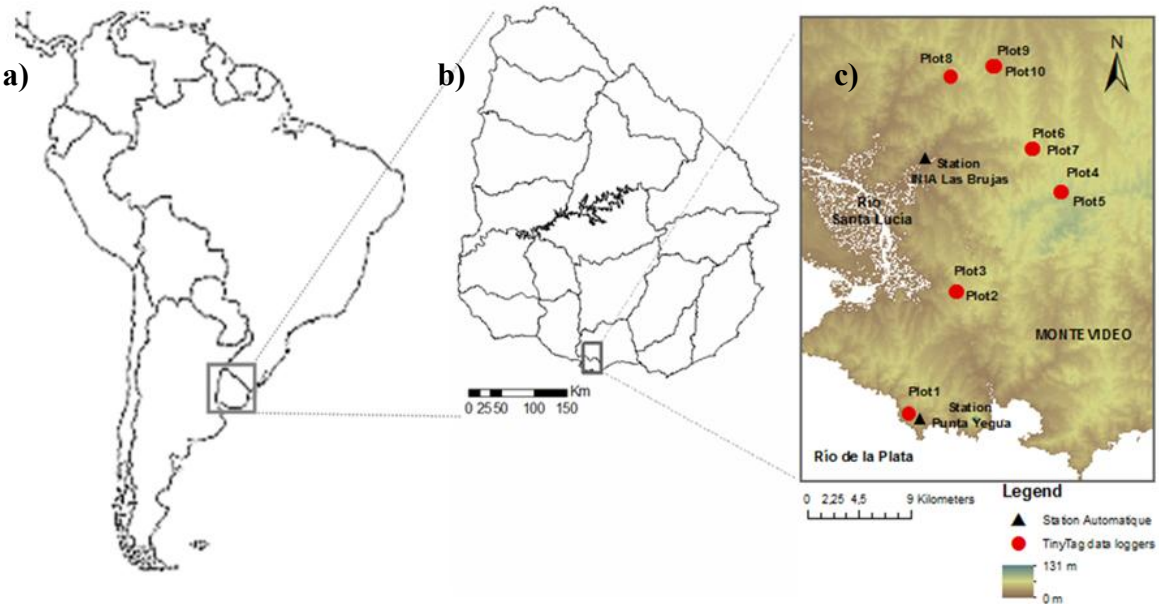


Figura 1. a) América del Sur, b) Uruguay y c) la región vitícola del sur del país con la ubicación de las parcelas en estudio.

En cinco viñedos comerciales de Tannat conducidos en espaldera media, se seleccionaron diez parcelas (P1 a P10) para realizar la fenología del cultivo (Cuadro

1). Los predios fueron escogidos según su distancia al Río de la Plata y situación topográfica.

Cuadra 1. Características de las parcelas de Tannat (P1 a P10) en estudio: tipo de viñedo comercial, porta-injerto, distancia al Río de plata, altitud, pendiente y exposición.

Parcelas	Porta-Injerto	Densidad Plantación (m)	Viñedo comercial	Distancia Río de la Plata (km)	Altitud (m)	Pendiente (%)	Expo-sición
P1	SO4	2,5 x 1	A	0,9	34	3,3	S
P2	3309 C	2,5 x 1	B	11,7	31	1,3	W
P3	3309 C	2,5 x 1	B	11,7	29	0,9	W
P4	Gravesac	2,5 x 1	C	18,3	95	2,3	E
P5	Gravesac	2,5 x 1	C	18,3	83	2,9	E
P6	3309 C	2,3 x 1	D	21,9	65	2,6	S-E
P7	3309 C	2,3 x 1	D	21,9	62	2,6	S
P8	3309 C	2,5 x 1	D	28,0	53	4,4	S-E
P9	SO4	2,5 x 1,2	E	28,6	49	1,6	N
P10	3309 C	2,5 x 1,2	E	28,6	46	3,6	S-E

Tannat presenta un ciclo fenológico intermedio, con brotación y periodo de maduración intermedio en relación a otras variedades (PlantGrape, 2013). En Uruguay, el promedio de la serie de los años 1994-2009 de datos fenológicos muestra que el comienzo del periodo de maduración es el 31 de enero (50 % de las uvas en estado de envero) y la madurez tecnológica el 15 de marzo (Fourment *et al.,* 2013). Esta variedad representa la variedad insignia de Uruguay y se considera que está adaptada a la región de estudio (Ferrer, 2007).

3.4.2. Mediciones en la planta

Sobre 100 pámpanos por parcela se registraron los estados fenológicos usando la escala de Eichhorn y Lorenz (Coombe, 1995), expresado en porcentaje según Día Juliano (DJ) luego del 1° de julio (día 1). Los estados fenológicos claves para el viticultor de la región fueron: floración (E-L 25), cuajado (E-L 27), cierre de racimo

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

(E-L 33) y envero (E-L 35). Las fechas de cosecha en las parcelas fueron diferentes cada año, siendo determinada por el viticultor. Se mapearon los estados fenológicos para mostrar las diferencias espaciales en el comportamiento del Tannat según las fechas promedio de estos estados.

En cada parcela de estudio, se estimó el vigor a partir del cálculo de la Superficie Foliar Expuesta Potencial (SFEp), según la metodología de Carbonneau (1995). Se realizaron las mediciones en 5 centros representativos de cada parcela, al comienzo del estado fenológico de envero, momento en el que teóricamente, se establece la mayor superficie foliar. En el momento de cosecha tecnológica, se midió el rendimiento por planta sobre 30 plantas individuales. Luego, con los valores de rendimiento y SFEp se calculó la relación fuente-fosa por planta, para evaluar el equilibrio de las plantas.

3.4.3. Análisis climático

Los datos climáticos fueron obtenidos por sensores TinyTag instalados sobre la espaldera en cada parcela de Tannat. Tomando 10 ºC como temperatura base de desarrollo de la vid (Pouget, 1963), se calcularon dos índices bioclimáticos adaptados al cultivo: Grados Día (Winkler et al., 1974) y el Índice Heliotérmico de Huglin (Huglin, 1978). GD10 e IH fueron calculados para cada uno de los 4 estados fenológicos registrados durante los tres años de estudio (2012, 2013 y 2014).

3.4.4. Análisis estadístico

Se realizaron análisis de varianza (ANAVA) de medias por el test de Tukey (α=0,05) para diferenciar parcelas según índices bioclimáticos, desarrollo vegetativo y rendimiento. El efecto año (2012, 2013 y 2014) fue considerado como co-variable dentro del ANAVA.

Para analizar la evolución de los estados fenológicos de manera global entre las parcelas, se estimó un modelo lineal generalizado en el cual se asumió que la variable (estado fenológico), tiene una distribución multinomial ordinal. De esta

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

forma, se evaluó la evolución de cada estado en cada sitio a través del tiempo. El estado fenológico promedio del modelo, se calculó como una media ponderada de cada estado, multiplicado por su probabilidad de ocurrencia. El contraste global entre las parcelas, fue el análisis que determinó una mayor o menor precocidad entre sitios. Debido al desequilibrio de fechas en la fenología de la parcela 1 en el primer año de estudio (2012), la misma fue eliminada del modelo general del 2012.

Para establecer diferencias entre parcelas según cuatro estados fenológicos puntuales: floración, cuajado, cierre de racimo y envero, se realizó un análisis binomial de frecuencias por el test de LSD de Fisher (α=0,05), suponiendo que la distribución de frecuencias por estado es de un modelo lineal generalizado mixto.

Se realizaron correlaciones entre los estados fenológicos y los índices bio-climáticos para determinar el posible efecto de la temperatura en el crecimiento y desarrollo de la vid, mediante análisis de componentes principales (multi-variado). Se utilizó el paquete estadístico InfoStat con la aplicación de R (Di Rienzo *et al.*, 2012).

3.5. RESULTADOS

3.5.1. Variabilidad temporal y espacial de la temperatura en la región (meso-escala)

Los índices bio-climáticos adaptados a la vid de Grados día base 10 (GD10) e índice Heliotérmico de Huglin (IH) mostraron diferencias entre años (variabilidad temporal) y entre parcelas (variabilidad espacial) (Cuadro 2). 2012 se caracterizó por un verano caluroso, mientras que el 2013 tuvo una primavera calurosa. El año 2014 fue intermedio en cuanto a la temperatura, sin estaciones más cálidas o frescas. Los valores de GD e IH no mostraron diferencias entre años, aunque 2013 mostró ser el más cálido al final de la temporada con, por ejemplo, 54 GD por encima de 2012 y solamente 6 GD más que 2014.

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

Cuadro 2. Indices bio-climáticos por parcela: Grados día (GD10) e Índice Heliotérmico (IH) acumulados durante los ciclos vegetativos de 2012, 2013 y 2014. La sombra rosa significa diferencias estadísticas con mayor acumulación y la sombra celeste menor acumulación.

Parcela	GD10*				IH**			
	2012	2013	2014	*Promedio*	2012	2013	2014	*Promedio*
P1	1776	1829	1804	*1803*	2327	2351	2328	*2335*
P2	1729	1757	1757	*1748*	2400	2400	2367	*2389*
P3	-[a]	1767	1748	*1758*	-[a]	2412	2366	*2389*
P4	1692	1741	-[b]	*1717*	2344	2366	-[b]	*2355*
P5	1617	1667	1659	*1648*	2260	2267	2261	*2263*
P6	1671	1733	1727	*1710*	2325	2361	2344	*2343*
P7	1649	1693	1710	*1684*	2341	2365	2355	*2354*
P8	1759	1822	1802	*1794*	2451	2464	2430	*2448*
P9	1743	1813	1796	*1784*	2474	2498	2452	*2475*
P10	1713	1771	1772	*1752*	2431	2457	2432	*2440*
Promedio	*1705*	*1759*	*1753*	***1740***	*2373*	*2394*	*2371*	***2379***

*Diferencias estadísticas entre parcelas (R^2=0,90; P<0,0001) **Diferencias estadísticas entre parcelas (R^2=0,95; P<0,0001). [a] Sensor sin instalar [b] 40 % de datos perdidos.

Para los tres años estudiados, la variabilidad espacial en promedio mostró que ambos índices registraron diferencias estadísticas entre parcelas: la parcela 5 (P5) fue la que acumuló la menor cantidad de unidades térmicas (expresado tanto en GD10 como en IH), mientras que las parcelas con mayor acumulación fueron la P1 (mayores valores de GD10) y las P8, 9 y 10 (mayores valores de IH).

Al analizarse la acumulación térmica según estado fenológico, se observa que hubo diferencias estadísticas entre parcelas solamente cuando es medido como GD10 (Cuadro 3). Las parcelas 1, 8 y 9 fueron estadísticamente diferentes a las restantes parcelas durante el estado de floración, acumulando mayor cantidad de calor para las temporadas estudiadas (GD10>383), mientras que las parcelas 7 y 5 acumularon la menor cantidad de calor (GD10<379). Para el estado de cierre de racimo, las parcelas estadísticamente diferentes fueron la 1 y la 5, siendo la primera la que acumuló mayor cantidad de calor (GD10>747), y la P5 la que acumuló menor cantidad de

calor (GD10<727).

Los estados de cuajado y envero no mostraron diferencias estadísticas entre parcelas, aunque para ambos casos, los valores más extremos resultaron ser la P1 con mayor acumulación y la P5 con la menor acumulación térmica.

Cuadro 3. Acumulación de Grados día (GD10) según estados fenológicos de Floración, Cuajado, Cierre de Racimo y Envero, para las temporadas 2012, 2013 y 2014 por parcela. La sombra rosa significa diferencias estadísticas con mayor acumulación y la sombra celeste menor acumulación.

Parcela	Floración*			Cuajado			Cierre de Racimo**			Envero		
	2012	2013	2014	2012	2013	2014	2012	2013	2014	2012	2013	2014
P1	401	386	417	509	477	620	747	746	808	1392	1284	1327
P2	366	379	389	467	460	588	701	712	774	1346	1228	1304
P3	-[a]	390	387	-[a]	473	586	-[a]	735	765	-[a]	1244	1289
P4	365	382	-[b]	467	438	-[b]	701	697	-[b]	1320	1238	-[b]
P5	343	355	365	439	434	549	658	679	727	1257	1165	1228
P6	371	374	390	471	457	584	695	712	766	1304	1216	1280
P7	359	370	379	457	450	573	677	696	752	1284	1190	1265
P8	388	398	412	492	484	614	729	753	808	1384	1277	1348
P9	383	397	413	489	483	612	723	754	805	1375	1276	1341
P10	374	387	405	476	472	603	708	738	795	1348	1245	1324

*Diferencias estadísticas entre parcelas (R^2=0,93; P<0,0001).**Diferencias estadísticas entre parcelas (R^2=0,93; P<0,0001). [a] Sensor sin instalar [b] 40 % de datos perdidos.

Para el período de cálculo de acumulación (del 1º de setiembre al 28 de febrero), las parcelas más extremas acumularon en promedio de 9,10 grados por día (P5) a 9,96 grados por día (P1) durante el ciclo. En años más contrastantes, la diferencia de acumulación alcanzó a ser de 0,9 grados por día (año 2013). Esta acumulación diaria de GD promedio también varía según estado: de floración a cuajado fue de 10º, entre cuajado y cierre de racimo 11,4º y entre cierre de racimo y envero 13,4 ºC. El máximo se alcanzó el año 2014 en la P8 (15,4 ºC) y el mínimo también ese año (2014) en la P5 (9,6 ºC).

3.5.2. Variabilidad espacial de la fenología de Tannat

Los modelos estimados para todos los estados fenológicos del Tannat en las 10 parcelas de estudio, resultaron ser contrastantes entre los sitios (Figura 2). Estas diferencias varían entre los años analizados. El 2012 fue la temporada en la cual las parcelas de estudio (menos las P1 por falta de estados en tres fechas y la P3 que no estaba aún instalada) presentaron menores diferencias en la evolución de su desarrollo. Por el contrario, en los siguientes años de estudio la P2 mostró mayor precocidad en el principio de la temporada, mientras que la P4 mostró mayor atraso, separándose del resto por más de 50 días (entre el día 40 a partir de la primera observación, hasta el 95).

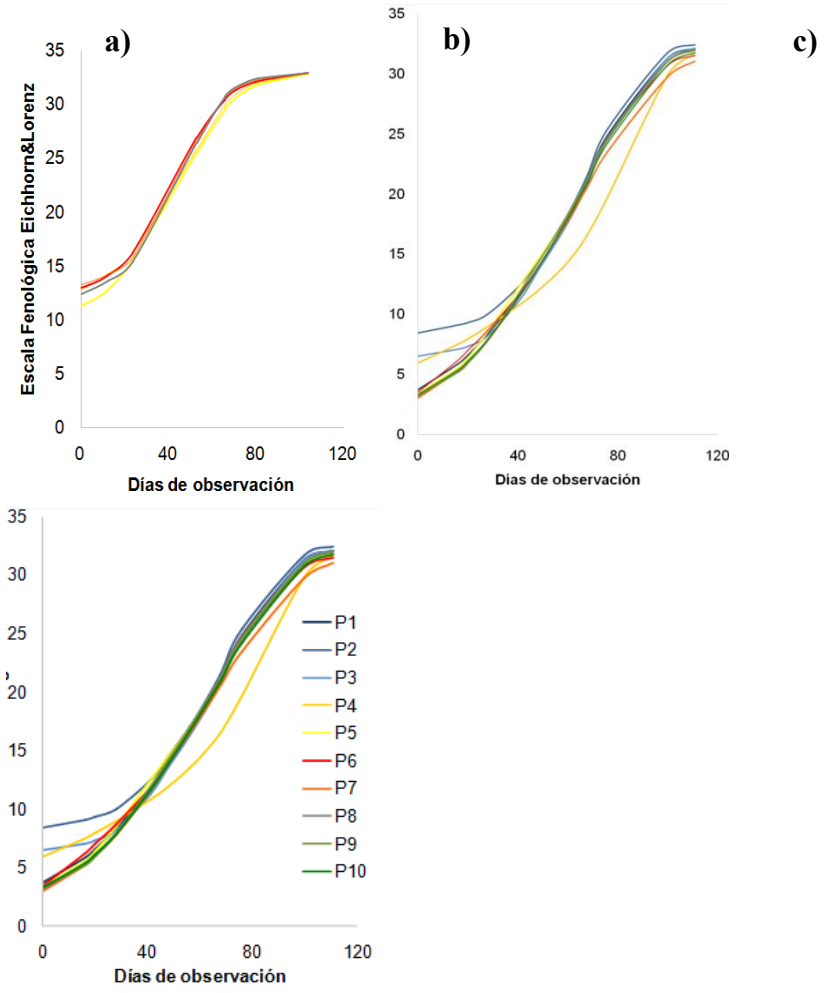


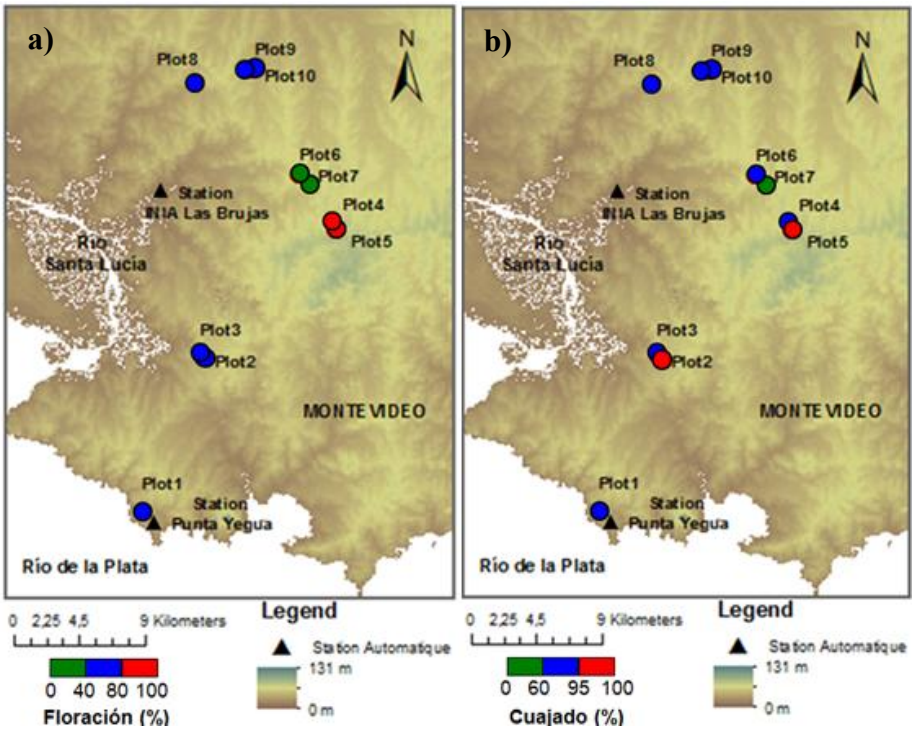
Figura 2. Evolución de los modelos fenológicos durante los días de observación en las parcelas durante la temporada para los tres años estudiados: a) 2012, b) 2013 y c) 2014.

El análisis de la fenología promedio para las tres temporadas analizadas, mostró que los cuatro estados fenológicos de floración, cuajado, cierre de racimo y envero, fueron estadísticamente diferentes entre parcelas (P<0,0001) (Figura 2). En la figura 3 se muestra la variabilidad espacial promedio de los estados, resultando las diferencias estadísticas entre parcelas en diferentes porcentajes de la escala en la región.

Según el estado fenológico de floración, las parcelas 6 y 7 mostraron ser las más atrasadas, mientras que las 4 y 5 fueron las más adelantadas (más de 81 % de los pámpanos con racimos en 50 % de floración) (Figura 3 a). En cuajado, la parcela 7 fue la más atrasada (menos del 60 % de los pámpanos con racimos cuajados) y las parcelas 2 y 5 mostraron ser las más avanzadas (más del 96 % en ese estado) (Figura 3 b). Para los estados de cierre de racimo, las parcelas más atrasadas fueron las 6 y 7 (menos del 70 %), mientras que las más adelantadas fueron la 1 y 2 (más del 90 % de sus pámpanos en ese estado) (Figura 3 c). Para la fase de envero, las parcelas que mostraron menor precocidad en los tres años estudiados, fueron la 3 y 7 (menos del 65 % de sus pámpanos en ese estado), mientras que las más adelantadas, fueron las parcelas 2 y 4 (más del 89 % de los pámpanos con racimos enverados) (Figura 3 d).

La parcela que mostró mayor atraso en promedio fue la P7 para todos los estados fenológicos, mientras que las parcelas con mayor precocidad fueron la P4 (para el estado de floración y envero) y la P5 al inicio del desarrollo (floración y cuajado).

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016


a)
Plot8
Plot9
Plot10
N
Plot6
Plot7
Station
INIA Las Brujas
Plot4
Plot5
Río
Santa Lucia
Plot3
Plot2
MONTEVIDEO
Plot1
Station
Punta Yegua
Río de la Plata
0 2,25 4,5 9 Kilometers
0 40 80 100
Floración (%)
Legend
Station Automatique
131 m
0 m
b)
Plot8
Plot9
Plot10
N
Plot6
Plot7
Station
INIA Las Brujas
Plot4
Plot5
Río
Santa Lucia
Plot3
Plot2
MONTEVIDEO
Plot1
Station
Punta Yegua
Río de la Plata
0 2,25 4,5 9 Kilometers
0 60 95 100
Cuajado (%)
Legend
Station Automatique
131 m
0 m

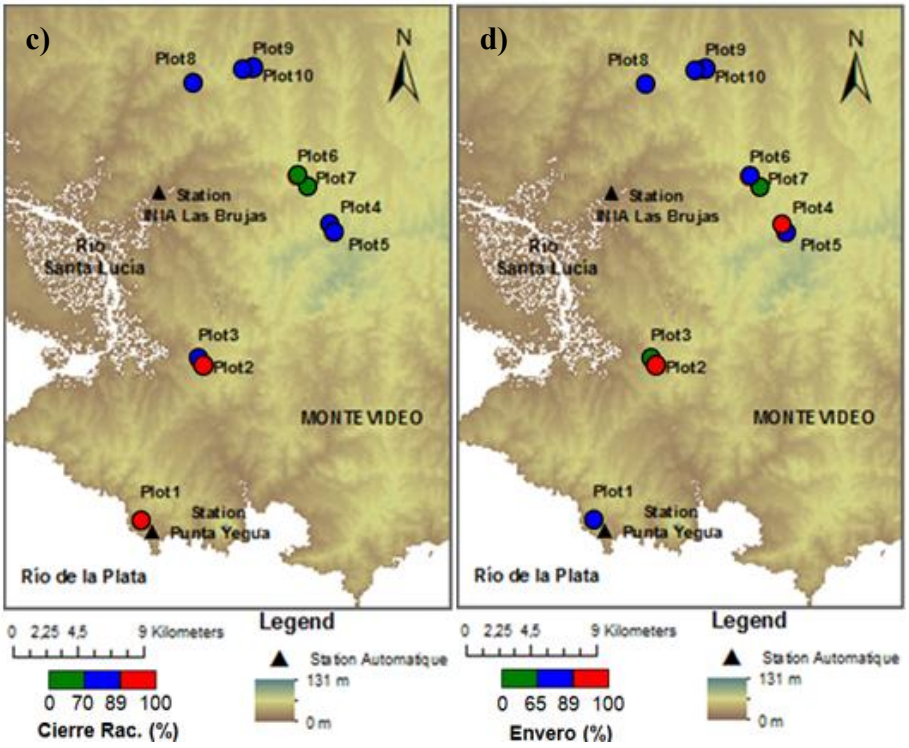


Figura 3. Variabilidad espacial de cuatro estados fenológicos (porcentaje de floración (a), cuajado (b), cierre de racimo (c) y envero (d)) de las parcelas para las tres temporadas de estudio. Colores diferentes en los porcentajes de los estados, significan diferencias estadísticas según LSD Fisher (α<0,05).

3.5.3. Relaciones entre la fenología del Tannat y la acumulación térmica en las parcelas

El análisis de componentes principales (ACP) con todas las variables estudiadas (figura 4), representó el 84,1 % de la variabilidad total. Las variables de acumulación térmica por estado (IH y GD), se agrupan sobre el primer componente (*R*>0,88, cuadro 4), mientras que los estados fenológicos se agrupan sobre el segundo eje principal (*R*>0,71). Las variables de estados fenológicos se correlacionan significativamente entre sí, en particular floración con cuajado (R=0,90, *p*<0,01) y envero (R=0,82, *p*<0,01) (Cuadro 5). Las sumas térmicas también se correlacionan entre sí. Los Grados día acumulados en cada estado se correlacionan significativamente (R>0,97, *p*<0,01) al igual que el Índice heliotérmico alcanzado en

cada fase fenológica (R>0,96, p<0,01). Ambos índices dentro de cada estado, también presentaron alta correlación (R>0,65, p<0,04).

La ubicación de las parcelas en el ACP mostró que las parcelas más cercanas a los estados fenológicos fueron las P1 y 2, mientras que la P7 se ubicó en el lugar opuesto (Figura 4). Las parcelas más continentales (P8, 9 y 10) se encontraron cercanas a los índices térmicos según los estados fenológicos y en el lugar opuesto, las parcelas 4 y 5 (figura 4).

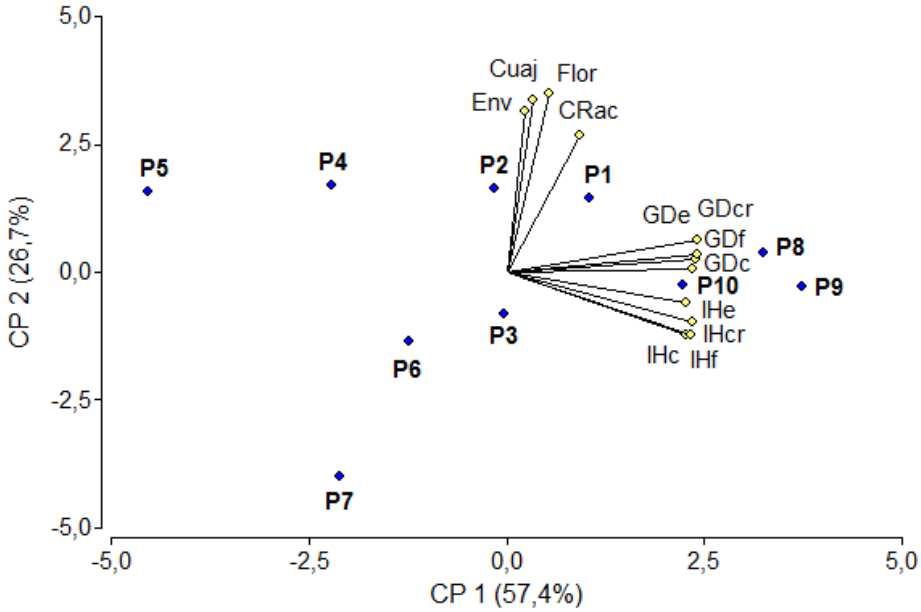


Figura 4. Análisis de componentes principales de las variables estudiadas (círculos amarillos) y las parcelas (vectores – círculos azules)

Cuadro 4. Correlaciones de los componentes con las variables originales

Variables	CP 1	CP 2
Flor	0,21	**0,93**
Cuaj	0,13	**0,89**
C.Racimo	0,36	**0,71**
Envero	0,09	**0,84**
GDf	**0,93**	0,07
IHf	**0,88**	-0,33
GDc	**0,92**	0,02
IHc	**0,91**	-0,33
GDcr	**0,94**	0,09

IHcr	**0,91**	-0,26
GDe	**0,94**	0,17
IHe	**0,88**	-0,16

Cuadro 5. Correlaciones y probabilidades entre variables del Análisis de Componentes Principales. Correlaciones significativas se presentan en negro.

	Flor	Cuaj	C.Rac.	Env	GDf	IHf	GDc	IHc	GDcr	IHcr	GDe	IHe
Flor	1	<0,01	0,03	<0,01	0,64	0,93	0,77	0,89	0,58	0,93	0,44	0,67
Cuaj	**0,90**	1	0,11	0,02	0,71	0,71	0,77	0,71	0,63	0,84	0,53	0,95
C.Rac.	0,69	0,53	1	0,20	0,29	0,96	0,33	0,90	0,24	0,76	0,13	0,59
Env	**0,82**	0,71	0,44	1	0,77	0,78	0,91	0,71	0,76	0,83	0,65	0,99
GDf	0,17	0,14	0,37	0,11	1	0,02	<0,01	0,01	<0,01	0,01	<0,01	0,04
IHf	-,03	-0,14	-0,02	-0,10	0,70	1	0,03	<0,01	0,03	<0,01	0,03	<0,01
GDc	0,11	0,10	0,34	0,04	**0,99**	0,67	1	0,02	<0,01	0,02	<0,01	0,05
IHc	-,05	-0,13	0,05	-0,14	0,74	**0,99**	0,74	1	0,01	<0,01	0,02	<0,01
GDcr	0,20	0,17	0,41	0,11	**0,99**	0,69	**0,99**	0,74	1	0,02	<0,01	0,03
IHcr	0,03	-0,07	0,11	-0,08	0,73	**0,99**	0,71	**0,99**	0,73	1	0,02	<0,01
GDe	0,27	0,23	0,51	0,16	**0,98**	0,69	**0,97**	0,73	**0,99**	0,74	1	0.02
IHe	0,16	0,02	0,19	<0,01	0,65	**0,96**	0,64	**0,96**	0,67	**0,98**	0,69	1

En la figura 5 se encuentran los resultados de la variabilidad espacial de la fenología en conjunto con la acumulación térmica, para los dos estados que mostraron diferencias estadísticas. Allí se aprecia que en floración (Figura 5 A), las parcelas con mayor acumulación térmica (más de 391 GD, en cuadro blanco) no presentan siempre el mayor avance de estado fenológico. En forma similar, en cierre de racimo, la parcela con menor acumulación (menos de 700 GD, con cuadro negro), no fue la más atrasada.

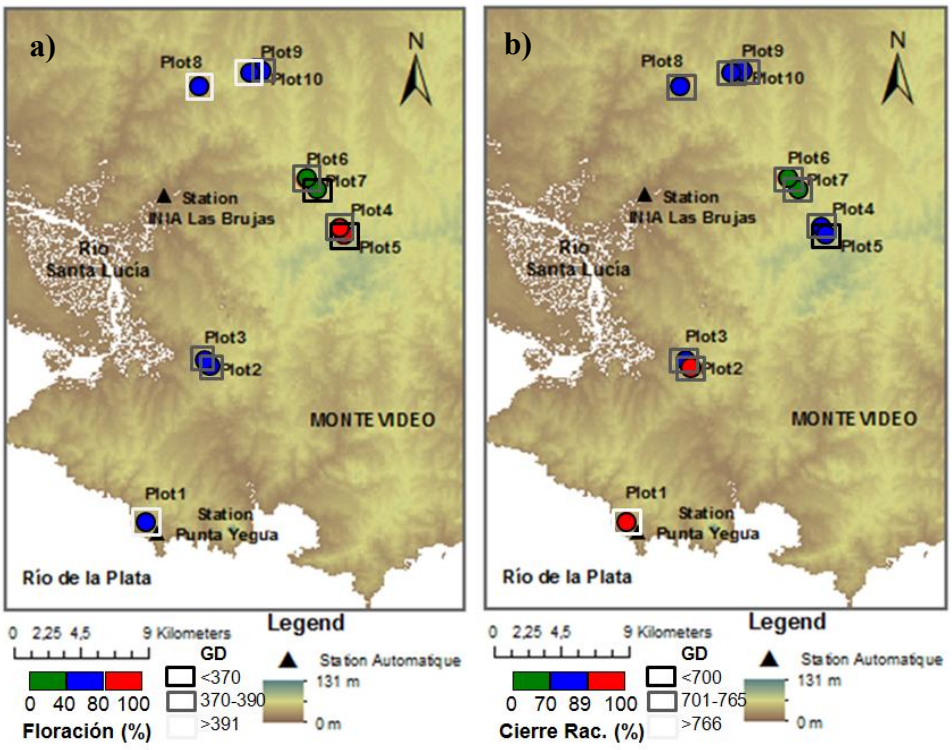


Figura 5. Variabilidad espacial de dos estados fenológicos (porcentaje de floración (a) y cierre de racimo (b)) y su acumulación de Grados día (GD10) para cada estado en las parcelas en estudio. Colores diferentes en los porcentajes de los estados (círculos), significan diferencias estadísticas según LSD Fisher ($\alpha<0,05$). Colores diferentes en la acumulación térmica (cuadrados), significan diferencias estadísticas según Tukey ($\alpha<0,05$).

El análisis de varianza entre las temperaturas medias, máximas y mínimas de los meses anteriores a cada estado mostraron significancia para los mismos dos estados analizados en la figura 5: floración y cierre de racimo. En floración, la temperatura máxima de setiembre (antes que ocurre el estado) fue la que presentó una alta correlación ($F=6,44$; $p=0,018$) mientras que en cierre de racimo fueron las temperaturas media, máxima y mínima de noviembre (mes precedente al estado de cierre de racimo) ($F=20,47$; $p<0,001$; $F=13,89$; $p<0,001$; $F=6,71$; $p=0,02$ respectivamente).

3.6. DISCUSIÓN

3.6.1. Clima

Los GD10 muestran mayores diferencias estadísticas entre parcelas que IH debido a que el primer índice considera temperaturas máximas y mínimas, mientras que IH considera las máximas y medias. La temperatura mínima presenta mayor variabilidad espacial que la máxima, debido a que es más afectada por factores locales (distancia al cuerpo de agua, topografía, tipo de suelo). Fourment *et al.* (2014) establecen en la región que el efecto de la cercanía (o lejanía) al Río de la Plata y su efecto en la temperatura determina la amplitud térmica de la región. La temperatura mínima de las parcelas y por tanto la amplitud térmica (expresada en GD) son determinantes en diferenciar el comportamiento térmico ente sitios.

La acumulación térmica en las parcelas según estado fenológico, muestra que la P5 es la que menor acumulación logra en todos los momentos, debido a que es la parcela más elevada de la región y su situación topográfica provoca que sea la más templada (Fourment et al., 2014). A la inversa, la P1 es quien acumula la menor cantidad de GD10, debido a su menor amplitud térmica (temperaturas mínimas más elevadas) por la cercanía al Río de la Plata. Tomando como referencia la distancia al Río de la Plata entre parcelas, en 17,4 km (distancia entre P1 y P5) se registró una diferencia de 0,86 grados de acumulación diaria en promedio. En la medida que avanza la temporada, la acumulación térmica por día es superior por la propia temperatura ambiente que aumenta en verano. La diferencia de la acumulación de GD entre cierre de racimo y envero es de 1,3º en la misma distancia (17,4 km entre P1 y P5).

Los GD acumulados según estado expresan los requerimientos que tiene la variedad Tannat para alcanzar un estadio de desarrollo. Van Leewuen *et al.* (2008) analizaron los requerimientos de calor que tienen 32 variedades, entre ellas Tannat, para cuatro estados fenológicos (brotación, floración, envero y madurez). Los requerimientos térmicos por estado alcanzados en este trabajo no se corresponden a los comunicados por van Leewuen *et al.* (2008). En floración, los requerimientos alcanzados en la región están en el 80 % de los casos por debajo de los requerimientos calculados por

Van Leewuen *et al.* (2008) (menos de 401 GD), mientras que, en forma inversa, los valores de envero alcanzados están por encima (1153 GD). La discrepancia en la confrontación de resultados podría explicarse por la metodología de medición de las temperaturas. En el artículo citado, las referencias de acumulación térmica se tomaron de estaciones meteorológicas. Para el caso de este estudio, los valores de temperatura provienen de sensores instalados en los viñedos, que son superiores por lo general, a la temperatura medida por una estación (sobreestimación de la temperatura ambiente). Es por ello, que un valor de acumulación en el viñedo será superior al valor de acumulación de una estación.

3.6.2. Fenología

Para las temporadas analizadas, la parcela 7 fue la que mostró mayor atraso en promedio en todos los estados fenológicos. Esta parcela presentó este comportamiento debido al manejo de viñedo: el viticultor la poda 4 semanas más tarde que el resto de sus parcelas debido al riesgo de heladas al comienzo de la primavera. Con esa práctica, disminuye el riesgo de daño por bajas temperaturas al provocar una brotación más tardía, fuera del período con mayor exposición al daño.

A la inversa, las parcelas con mayor precocidad fueron la P4 (para el estado de floración y envero) y la P5 al inicio del desarrollo (floración y cuajado). Estas dos parcelas, pertenecen al mismo viñedo comercial (viñedo C, cuadro 1), con un manejo del viñedo muy particular de control de carga (raleo de racimos) y deshojados previos al período de maduración. La característica que diferencia estas parcelas de las restantes en estudio, fue el porta-injerto (Gravesac) que podría estar imprimiendo mayor precocidad.

Las diferencias estadísticas entre las parcelas dentro de cada estado, muestran una gran variabilidad espacial. En floración y cierre de racimo, las diferencias parecen asociarse al tipo de viñedo (parcelas contiguas con los mismos colores en la figura 3), sugiriendo un posible efecto del manejo del viñedo y porta-injerto en la fenología en la región.

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

Tal como reporta Barbeau (2008) puede ocurrir cierta precocidad en los estados fenológicos cuando el vigor de la planta es moderado a débil, debido a una mayor eficiencia fotosintética y mejor relación fuente-fosa. Los resultados de los tres años de estudio (Cuadro 6), muestran una gran variación de los valores de SFEp, Rendimiento y SFEp/rend entre parcelas, siendo estadísticamente significativa las diferencias del indicador de equilibrio (SFEp/Rend). La P8 mostró tener siempre los valores más bajos de equilibrio (<0,3), mientras que la P3 presentó los valores más elevados (>0,71) (R^2=0,59; *P*=0,02).

Cuadro 6. Superficie Foliar Expuesta Potencial (SFEp) (m^2/ha), Rendimiento (Kg/ha) y SFEp/Rend según parcela (P1 a P10) y año.

Parcelas	SFEp			Rend			SFEp/rend*		
	2012	2013	2014	2012	2013	2014	2012	2013	2014
P1	8580	8685	5887	18522	6086	30691	0,46	1,43	0,19
P2	7051	4282[a]	5810	9952	3454	6594	0,88	1,24	0,71
P3	8939	4929[a]	7529	12044	3380	6428	**1,31**	**1,46**	0,74
P4	6067	7002	6190	12960	14108	10114	0,47	0,50	0,61
P5	6193	6942	6962	10397	11003	11556	0,60	0,63	0,60
P6	7031	4422[a]	6912	16351	9800	18739	0,41	0,45	0,43
P7	6975	6033	7673	18354	23546	16542	0,36	0,26	0,38
P8	4503	6322	5792	16678	21195	21883	**0,28**	**0,30**	**0,27**
P9	7571	5658[a]	6258	16760	25990	11113	0,45	0,22	0,56
P10	6921	5105[a]	6446	11662	19616	16651	0,59	0,26	0,39

***** Significancia estadística (R^2=0,59; *P*=0,02). [a] Parcelas dañas por el granizo en enero 2013.

Las valoraciones de equilibrio (SFEp/Rendimiento) determinan el funcionamiento de la planta en su arquitectura (espaldera). Para este indicador, Ferrer (2007) determina un rango para el Tannat de 0,30 a 0,80. Por encima de 0,8 se produce la superposición de follaje con el consiguiente sombreado (P3 en 2012 y 2013), y por debajo de 0,3 (P8 en todos los años de estudio) no se alcanzan niveles de azúcares adecuados. Esto muestra que no todos los viñedos parecen tener un balance entre el follaje y la producción de uva, lo cual puede incidir en el correcto desarrollo y crecimiento de las estructuras reproductivas.

Esto puede hacer suponer, que las parcelas con un desequilibrio hacia un exceso de vigor como la P3 podrían estar más atrasadas en su fenología en comparación con

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

aquellas que tienen un adecuado desarrollo foliar para la carga final. Sin embargo los resultados de los estados no marcan a la P3 con mayor atraso, a pesar de su desbalance fuente-fosa. Si se compara la P3 (mayor vigor) y la P8 (mayor carga), no presentan diferencias estadísticas en los estados, a excepción del envero. Esto concuerda con Barbeau (2008) que asume que las diferencias de vigor y equilibrio afectan los estados más avanzados del ciclo.

3.6.3. Fenología y Temperatura

El ACP sitúa a las parcelas en función de su correlación con múltiples variables: las parcelas más continentales (P8, 9 y 10) más cercanas a los índices térmicos porque son las que acumulan mayor cantidad de calor y la P5 ubicada en el plano opuesto porque acumula menor cantidad. Cercanas a los estados fenológicos están las parcelas que mostraron mayor adelanto de alguno de los estados fenológicos (P1, 2 y 3), y en el extremo opuesto del CP 2 la P7, la más atrasada. Las parcelas más precoces de la región de estudio (P5 y 4) se encuentran en la parte positiva del CP 2, pero no tan cercanas a los estados fenológicos como se encuentran la P1, 2 y 3. Esto hace suponer que la correlación negativa con los índices térmicos es más fuerte que la correlación positiva con la fenología.

Para los estados fenológicos estudiados, la parcela que acumula mayor cantidad de calor (P1) muestra mayor precocidad solamente en cierre de racimo. Sin embargo, la parcela que menor acumulación térmica tiene, muestra mayor precocidad (P5) en los estados iniciales de desarrollo, lo que demuestra que los diferentes estados fenológicos tienen requerimientos o influencias diferentes con la temperatura.

La variación espacial de la fenología en la región no es tan marcada como la variabilidad espacial de la temperatura, debido seguramente al efecto de diferencias es las técnicas culturales del viñedo entre parcelas, que amortigua el efecto del clima (van Leeuwen *et al.,* 2013). Esto puede explicar el primer caso (P1), donde la elevada carga en uva y SFEp provocan atraso de los estados (a excepción de cierre de racimo). Para el caso de la P5, el poco vigor que le imprime el porta-injerto (Gravesac) puedo haber provicado que fenológicamente se encuentre más

adelantada, aunque los estudios de Barbeau y Blin (2010) muestran que no hay efecto de precocidad entre diferentes porta-injertos analizados (entre ellos el Gravesac).

Sadras y Moran (2013) reportan que el efecto térmico en la fenología parece estar modulado por la interacción entre la fuente y la temperatura. Los autores encuentran que existe un efecto del aumento de la temperatura en la maduración de la uva, cuando hay una elevada relación fuente-fosa. Para el caso de estudio, el efecto de la temperatura sobre la fenología, medido en forma indirecta (Sadras y Moran, 2013), muestra que cuando hay valores mayores de SFEp/Rend (relación fuente-fosa mayor), como en el caso de la P3, no hay mayor precocidad, pero si la hay cuando las parcelas parecen estar en equilibrio como la P5 (valores de SFEp/Rend cercanos a 0,6). Esto podría estar marcando la pauta que no es una mayor relación fuente-fosa, sino la adecuada cantidad de fuente en relación a la uva producida.

Madelin *et al.* (2014), también citan que en los estudios de fenología a meso-escala, la influencia de otros factores (prácticas culturales, edad de la parcela, portainjerto, clon, etc.) compensan o atenúan el efecto térmico sobre la fenología de la vid.

Tal como discuten Sadras y Moran (2013), los estudios de efectos indirectos de temperatura sobre el desarrollo de la vid, puede llevar a generalizaciones inciertas de efectos que se solapan. Para la región de estudio, el análisis multivariado realizado (ACP) representa el 81,2 % de la variabilidad total de las parcelas, lo que da la pauta de la complejidad de los estudios de fenología y acumulación térmica. No se encontraron patrones claros de precocidad en parcelas con mayor acumulación térmica, como tampoco en las que se encontraban con mejor equilibrio fuente-fosa para su crecimiento y desarrollo. Es evidente, que existen otros factores no considerados en este estudio, que estarían afectando el desarrollo del Tannat en el sur de Uruguay, o que la diferencia térmica entre parcelas no es suficiente para marcar una diferencia en la fenología.

Se debería continuar los estudios de interacción fenotipo – ambiente, para poder evaluar cuales son los factores determinantes del crecimiento y desarrollo de esta variedad en la región. Las propiedades del suelo (profundidad, textura, capacidad de retención de agua) como también las precipitaciones, podrían ser dos

atributos/variables de importancia para continuar aportando medidas de manejo adaptadas a las condiciones meso-climáticas.

AGRADECIMIENTOS: Se agradece en forma muy especial a los establecimientos que han permitido trabajar en las parcelas de Tannat: Establecimiento La Estancia, Bodega Bouza, Pizzorno Wines Family States, Bodega Pisano y Establecimiento Juanicó. Este trabajo fue realizado gracias a las becas CAP-UdelaR (2012-2014) y ANII POS_NAC_2014_1_102864 (2015).

3.7. BIBLIOGRAFÍA

Barbeau G, Blin A. 2010. Influence du porte-greffe sur le comportement agronomique de la vigne (var. Cabernet franc) en moyenne vallée de la Loire. Techniloire, 15 p. En: http://www.techniloire.com/documents/124963587/Essai%20porte-greffe%20CF_vf.pdf (última visita el 20 de mayo de 2016).

Barbeau G. 2008. Influence du fonctionnement de la vigne sur la qualité du vin. Proceedings of VI Foro Mundial del Vino Logroño España 24 abril 2008.

Bonnefoy C, Neethling E, Sicard S, Barbeau G, Bonnardot V, Planchon O, Madelin M, Quénol H. 2014. Approche régionale des climats des terroirs viticoles du Val de Loire. In : Quénol, H. (2014) Changement climatique et terroirs viticoles. Lavoisier, Paris, p. 161-188.

Caffarra A, Eccel E. 2011. Porjecting the impacts of climate change on the phenology of grapevine in a mountain area. Australian Journal of Grape and Wine Research, 17: 52-61.

Caffarra A, Eccel E. 2009. Increasing the robustness of phenological models for *Vitis vinifera* cv Chardonnay. International Journal of Biometeorology, 54: 255–267.

Calò A, Tomasi D, Costacurta A, Biscaro S, Aldighieri R. 1994. The effect of temperature thresholds on grapevine (*Vitis* sp.) bloom: An interpretive model. Rivista di Viticoltora e di Enologia, 1: 3-14.

Carbonneau A. 1995. La surface foliaire exposée – guide pour sa mesure. Le Progrès Agricole Viticole, 9: 204-212.

Coombe BG. 1995. Adopting of a system for identifying grapevine growth stages. Australian Journal of Grape and Wine Research, 1: 100-110.

Cuccia C, Bois B, Richard Y, Parker AK, Gracía de Cortázar-Atauri I, van Leeuwen C, Castel T. 2015. Phenological model performance to warmer conditions: application to Pinot Noir in Burgundy. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 48: 169-178.

Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, González L, Tablada M, Robledo CW. 2012. InfoStat versión 2012. Grupo InfoStat. Córdoba, Argentina. FCA, Universidad Nacional de Córdoba.

Falcao LD, Burin VM, Sidinei-Chaves E, Vieira HJ, Brighenti E, Rosier JP, Bordignon-Luiz MT. 2010. Vineyard altitude and mesoclimate influences on the phenology and maturation of Cabernet-sauvignon grapes from Santa Catarina State. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 44(3): 135-150.

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'écophysiologie des systèmes de conduite Espalier et Lyre sur Merlot ». Tesis de doctorado. Montpellier, Francia. École Nationale Supérieure Agronomique, Université de Montpellier II. 385p.

Ferrer M, Pedocchi R, Michelazzo M, González-Néves G, Carbonneau A. 2007. 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: 47-56.

Fourment M, Bonnardot V, Planchon O, Ferrer M, Quénol H. 2014. Circulation atmosphérique locale et impacts thermiques dans un vignoble côtier : observations dans le sud de l'Uruguay. Climatologie, 11: 47-64.

Fourment M, Ferrer M, González-Néves G, Barbeau, Bonnardot V, Quénol H. 2013. Spatial variability of temperature and grape berry compostion at terroir scale in Uruguay. En: Proceedings of 18th International Simposium GiESCO. 7 al 11 de Julio de 2013, Porto (Portugal).

Fraga H, Santos JA, Moutinho-Pereira J, Carlos C, Silvestre J, Eiras-Dias J, Mota T, Malheiro AC. 2015. Statistical modelling of grapevine phenology in Portguese wine regions: observed trends and climate change projections. Journal of Agricultural Science, 1-17.

García de Cortázar-Atauri I, Brisson N, Gaudilliere JP. 2009. Performance of several models for predicting budburst date of grapevine (*Vitis vinifera* L.). International Journal of Biometeorology, 53: 317–326.

Huglin P. 1978. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture, 1117-1126.

INAVI 2015. Instituto Nacional de Vitivinicultura. Estadísticas de los viñedos. En: http://www.inavi.com.uy/categoria/102-datos-nacionales-2015.html (última visita el 20 de abril de 2016).

INIA 2016. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Registros climáticos del portal GRAS de la estación de Las brujas. En: http://www.inia.uy/investigaci%C3%B3n-e-innovaci%C3%B3n/unidades/GRAS/Clima/Banco-datos-agroclimatico (última visita el 20 de abril de 2016).

Jones GV, Davis RE. 2000. Using a synoptic climatological approach to understand climate–viticulture relationships. International Journal of Climatology, 20: 813–837.

Keller M. 2010. The science of grapevine: anatomy and physiology. Amsterdam, Holanda. Academic press, 522p.

Lorenzo MN, Taboada JJ, Lorenzo JF, Ramos AM. 2013. Influence of climate on grape production and wine quality in the Rías Baixas, north-western Spain. Regional Enviornmental Change, 13(4): 887-896.

Madelin M, Bois B, Quénol H. 2014. Variabilité topoclimatique et phénologique des terroirs de la montagne de Corton (Bourgogne). En : Quénol H. 2014. Changement climatique et terroirs viticoles. Paris, Francia. Lavoisier, pp. 215-227.

Mosedale JR, Wilson RJ, Maclean IMD. 2015. Climate change and crop exposure to adverse weather: changes to frost risk and grapevine flowering conditions. PLOS ONE 10(10):e0141218.

Parker AK, De Cortázar-Atauri I, van Leeuwen C, Chuine I. 2011. General phenological model to characterize the timing of flowering and veraison of Vitis vinifera L. Australian Journal of Grape and Wine Research, 17: 206–16.

PlantGrape. 2013. Le catalogue de vignes cultivées en France. In: http://plantgrape.plantnet-project.org/ (última visita el 1º de octubre de 2013).

Pouget R. 1963. Recherches physiologiques sur le repos végétatifs de la vigne (*Vitis vinifera* L.) : la dormance de bourgeons et le mécanisme de sa disparition. Annales d'amélioration des plantes, 13: 1-247.

Sadras VO, Moran MA. 2013. Nonlinear effects of elevated temperature on grapevine phenology. Agricultural and Forest Meteorology, 173: 107-115.

Steel CC, Blackman JW, Schmidtke LM. 2013. Grapevine Bunch Rots: Impacts on Wine Composition, Quality, and Potential Procedures for the Removal of Wine Faults. Journal of Agricultural and Food Chemestry, 61: 5189−5206.

Tomasi D, Jones GV, Giust M, Lovat L, Gaiotti F. 2011. Grapevine Phenology and Climate Change: Relationships and Trends in the Veneto Region of ltaly for 1964-2009. Amercian Journal of Enology and Viticulture, 62(3): 329-339.

van Leeuwen C, Schultz HR, García de Cortázar-Atauri I, Duchêne E, Ollat N, Pieri P, Bois B, Goutouly JP, Quénol H, Touzard JM, Malheiro AC, Bavaresco L, Delrot S. 2013. Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine-producing areas by 2050. En:

Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America 110 (33).

van Leeuwen C, Garnier C, Agut C, Baculat B, Barbeau G, Besnard E, Bois B, Boursiquot JM, Chuine I, Dessup T, Dufourcq T, García de Cortazar-Atauri I, Marguerit E, Monamy C, Koundouras S, Payan JC, Parker A, Renouf V, Rodriguez-Lovelle B, Roby JP, Tonietto J, Trambouze W. 2008. Heat requirements for grapevine varieties are essential information to adapt plant material in a changing climate. En: Proceedings of the 7th International Terroir Congress. Nyon, Switzerland, pp. 222–227.

Verdugo-Vásquez N, Acevedo-Opazo C, Valdés-Gómez H, Araya-Alman M, Ingram B, García de Cortázar-Atauri I, Tissyere B. 2015. Spatial variability of phenology in two irrigated grapevine cultivar growing under semi-arid conditions. Precision Agriculture, 17: 218-245.

Winkler AJ, Cook JA, Kliewer WM, Lider LA (1974) General viticulture. University of California Press, Berkeley, USA 710p.

4. TANNAT GRAPE BERRY COMPOSITION RESPONSES TO SPATIAL VARIABILITY OF TEMPERATURE IN A COASTAL WINE REGION

4.1. SUMMARY

Spatial temperature variability was studied in relation to the berry basic composition and secondary compounds of the Tannat cultivar at harvest from vineyards located in the most important wine region of Uruguay. Monitoring of berries and recording of temperature were performed in ten commercial vineyards of Tannat situated in the southern coastal wine region of the country over three seasons (2012, 2013 and 2014). Statistical results from a multi-variate correlation analysis between berry composition at harvest and temperature over the three vintages showed that : (1) Tannat responses to spatial temperature were different over the vintages, (2) correlations between secondary metabolites and temperature were higher than those between primary metabolites and temperature, in particular potential in extractable anthocyanins and phenolic richness, and (3) correlations values between berry composition and temperature variables increased when ripening occurred under dry conditions. For a particular studied year (2013), temperatures explained 82.5 % of the spatial variability of the berry composition at harvest within the region. Thermal amplitude was found to be the most important spatial mode of variability with lower values recorded at plots nearest to the sea and more exposed to La Plata River. The highest levels in secondary compounds were found in berries issued from plots situated as far as 18.3 km from La Plata River. The increasing knowledge of temperature spatial variability and its impact on grape berry composition contributes to providing possible issues to adapt grapevine to climate change**.**

Key Words Berry Composition, Meso-climate, Tannat, Temperature Variability, grapevine.

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

La composición de la uva de Tannat responde a la variabilidad espacial de la temperatura en una región vitícola costera

4.2. RESUMEN

La variabilidad especial de la temperature fue estudiada en relación a la composición primaria y secundaria en cosecha de la variedad Tannat de viñedos localizados en la región vitícola más importante de Uruguay. El muestreo de uvas y el registro de temperaturas fueron realizados en diez viñedos comerciales en la región costera del sur durante tres temporadas (2012, 2013 y 2014). Los análisis de temperatura mostraron diferencias significativas de variabilidad espacial debido al efecto moderador del Río de la Plata en las temperaturas. Los resultados estadísticos del análisis de correlación multivariado entre la composición de la uva y temperatura en las tres temporadas mostraron que: (1) la respuesta del Tannat a la variabilidad espacial de la temperatura fue diferente en cada año, (2) las correlaciones entre metabolitos secundarios de la uva y temperatura fueron mayores que los metabolitos primarios, y (3) los valores de correlaciones entre la composición de la uva y la temperatura aumentaban cuando las condiciones de maduración eran secas. La amplitud térmica fue el componente térmico que determinó mayor variabilidad con valores bajos en las parcelas cercanas al mar y con mayor exposición al Río de la Plata y con mayores valores en las parcelas más lejanas. Los valores más elevados en metabolitos secundarios fueron alcanzados en las uvas provenientes de las parcelas situadas a 18,3 km del Río de la Plata. El conocimiento de la variabilidad espacial de la temperatura y sus impactos en la composición de la uva contribuyen al aporte de medidas de adaptación de la vid al cambio climático.

Palabras Clave Composición de la uva, Meso-clima, Tannat, Variabilidad de la Temperatura, Vid.

4.3. INTRODUCTION

Increase in issues related to grapevine adaptability to climate change involves the development of the understanding of local environmental factors and their impacts on grapevine physiological functioning as well as berry and wine composition.

Studies on spatial distribution of bioclimatic indices adapted to viticulture have been used to assess temperature variability within wine regions at macro-scales (Tonietto and Carbonneau 2004; Ferrer 2007; Anderson et al. 2012) and meso-scales (Blanco-Ward et al. 2007; Bonnefoy et al. 2013; Hall and Jones 2010; Jones et al. 2010). At the scale of a wine region (meso-climate), the spatial distribution of bioclimatic indices such as the Growing Degree Days index (Winkler *et al.* 1974), the Heliothermic index (Huglin 1978) and the Average growing season temperature (Jones et al. 2010), is affected by distances from rivers (Blanco-Ward et al. 2007; Hall and Jones 2010) and topography (Bonnefoy et al. 2013; Jones et al. 2010). Considering coastal wine regions, studies in South Africa's wine regions showed that the physical contrast between sea and land generated sea- and land-breeze local air circulations of importance for the climatic conditions over the coastal vineyards (Bonnardot et al. 2005).

Regarding meso-scale interactions between temperature and grapevine functioning in addition to crop suitability, occurrences of extreme climate conditions and grapevine responses to them are of importance for the final product and quality of the wine. Occurrences of extremes climate events such as spring frost (Madelin 2004; Quénol et al. 2007; Bonnefoy et al 2013) and heat weaves (Bonnefoy et al 2013; Fourment et al. 2014) in vineyards revealed significant temperature variability between plots within a region. Studies combining climate and grapevine response in terms of phenology stages showed advanced phenological stages under hot situations (Bonnefoy et al. 2013) and a diversity of responses in terms of grape berry composition and wine (Nicholas et al. 2011; Barnuud et al. 2014).

The direct or indirect responses of primary and secondary berry metabolites to temperature are known (Sadras et al. 2012; Bonada and Sadras 2015). High temperatures during the ripening period in warm sites cause high sugar accumulation

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

and degradation of acid contents (Kliewer 1973), due to a consumption of malic acid (Jackson and Lombard 1993) and alter poliphenols synthesis (Bergqvist et al. 2001; Mori et al. 2007; Nicholas et al. 2011). Thermal stress during ripening period causes degradation and inhibition of anthocyans accumulation (Mori et al. 2007). Nevertheless, Sadras et al. (2012) reported that the grape berry composition is a result of the interaction within the soil-plant-atmosphere system.

Vineyards of Southern Uruguay are characterized by gentle topographical features bordered by La Plata River estuary (Fourment et al. 2014). In this country, Tannat is considered as the best suited grapevine variety to the local environmental conditions. This variety is characterized by a high oenological potential due to high level contents of anthocyanins, tannins and acidity (González-Neves et al. 2010) producing wines with strong originality and typicity.

The aim of the study is to assess the Tannat's response to the climate spatial variability. Indeed, the study focuses on spatial variability of temperature at meso-scale in relation to the grape berry composition at harvest, in the Southern coastal wine region of Uruguay.

4.4. MATERIALS AND METHODS

Site selection and description

The study was carried out in the southern coastal wine region of Uruguay in the Canelones and Montevideo districts. These districts represent 76.4 % of the total vineyard surface of the country (INAVI 2013) (Figure 1). The climate of the region was classified as warm temperate, with temperate nights and moderated drought, corresponding to the $IS_{A1}IH_{A4}IF_{A2}$ climatic group, according to the "Multicriteria Climatic Classification" method for vineyards (Ferrer 2007, Tonietto and Carbonneau, 2004).

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

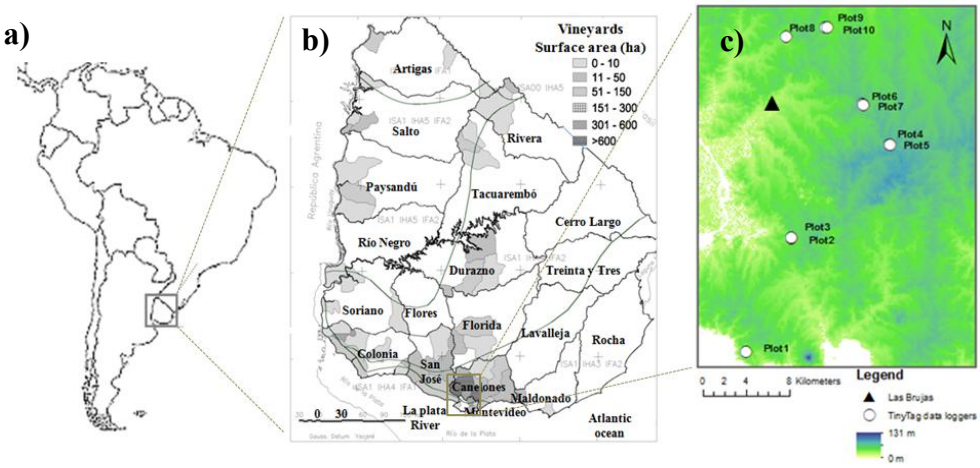


Fig. 1 Location of the studied area at the scale of : a) South America; b) Uruguayan wine producing regions and c) Montevideo and Canelones wine districts with location of local data loggers and the automatic meteorological station of INIA Las Brujas (Map source: ArcGIS)

A network of ten experimental plots was selected in five commercial vineyards of Tannat. These vineyards were chosen in order to investigate the influence of the La Plata River, soils and topography. In three cases, two contiguous plots were selected, yet at different elevations and heterogeneous soil properties (depth, temperature, water-holding capacity) in order to assess how various environmental factors at the plot scale may lead to significant differences in local temperature and berry composition (Table 1). At all plots, the training system was the vertical shoot position (VSP) and canopy was managed for producing quality red wine (V.C.P. *Vino de calidad preferencial*). However, five winegrowers were involved and thus wine grape management may have differed.

Data

Climatic and grapevine data were analyzed over three seasons: 2011-2012, 2012-2013 and 2013-2014. Temperature and rainfall from INIA Las Brujas station (INIA 2015) were used to analyze the climatic conditions of the three studied seasons compared to the 1972-2015 long-term average.

Hourly temperature data for the three seasons obtained from ten "TinyTag Talk 2" thermal sensors (Gemini Data Loggers Ltd. UK) installed in the selected commercial

vineyards and situated in the training system at 1.5 m above the ground. Thus, temperature data from the fine scale network in the vineyards is not comparable to that originating from the national weather station as environmental conditions differ (Madelin et al. 2014).

Table 1 Geographical characteristics of the 10-plot network: commercial vineyard (letters A to E represent 5 owners), distance from La Plata River (in km), altitude (meters above sea level), slope (%) and aspect as well as for the automatic climatic station of INIA Las Brujas

Plots	Commercial vineyard	La Plata River distance (km)	Altitude (m.a.s.l.)	Slope (%)	Aspect
Plot1	A	0.9	34	3.3	South
Plot2	B	11.7	31	1.3	West
Plot3	B	11.7	29	0.9	West
Plot4	C	18.3	95	2.3	Est
Plot5	C	18.3	83	2.9	Est
Plot6	D	21.9	65	2.6	South-est
Plot7	D	21.9	62	2.6	South
Plot8	D	28.0	53	4.4	South-est
Plot9	E	28.6	49	1.6	North
Plot10	E	28.6	46	3.6	South-est
INIA Las Brujas Station		18.6	32	3.3	South-west

Calculation of daily and monthly data (minimum and maximum temperature) as well as bio-climatic indices for viticulture for the 3 growing seasons were used in order to assess temperature spatial and seasonal variation in the vineyards. The Growing Degree Day (GDD) was calculated using the mean daily temperature above 10°C (Winkler et al. 1974) and the Heliothermic or Huglin Index (HI) (Huglin 1978) was calculated using the daily mean and maximum temperatures from the 1st of September to the 28th February. The k coefficient for day length was null for the latitude of Uruguay. February mean minimum temperature was used to characterize

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

nighttime climatic conditions during the ripening period. This corresponds to the "Cool Night Index" (CNI) (Tonietto and Carbonneau 2004), adapted for Uruguay in the South Hemisphere (Ferrer 2007).

January and February temperatures were analyzed to assess spatial variability of temperature at fine scale during ripening of grapevine, particularly with the calculation of the number of days and hours with temperature above 30 °C and 35 ºC, which represent thermal thresholds for vinegrape physiological functionning (Hunter and Bonnardot 2011). A specific heat wave event was studied using hourly temperature of the warmest day of the study period (15th of February 2012) in order to show variability at fine scale under extreme thermal conditions for grapevines as well as to identify the potential effect of La Plata River on temperature.

Berry samples were collected at harvest (end of February, beginning of March) using the method suggested by Carbonneau et al. (1991). For each plot, two double samples of 250 berries were collected from thirty plants within two rows in each vineyard. Grape berry composition including sugar concentration (g/l) by refractometry, titratable acidity (g H_2SO_4/l) by titration, pH by potentiometry, was analyzed according to the OIV protocol (1990). Phenolic potential, such as total potential in anthocyanins, the potential in extractable anthocyanins and phenolic richness of grapes, was analyzed following the protocol of Glories and Agustin (1993). All the measurements related to phenolic potentials were carried out by duplication with a Shimadzu UV-1240 Mini (Shimadzu, Japan) spectrophotometer. Total and extractable potential in anthocyanins and polyphenol richness are indices that provide value to enology of grape and improve vinification management (González-Néves et al. 2010).

Statistical analyses

A univariate procedure (ANOVA) was used to determine significant differences in climate data and berry composition between plots (Tukey grouping; $\alpha = 5$ %) and a multivariate method (PCA) was performed to determine significant correlations between temperature and berry composition. PCA analyses demonstrate relationships

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

between data obtained. Using highly correlated variables, a cluster analysis was performed to group plots of similar profiles. Differences in berry composition were also georeferenced by ArcGIS mapsource with the results of the Tukey grouping.

4.5. RESULTS

Seasonal climate variability

The grapevine growing season in Uruguay begins in September and finishes middle of March. On average for the 1972-2015 period, bioclimatic indices for viticulture at INIA Las Brujas reach a value of 1651 and 2207 respectively for GDD and HI. No statistical differences were found in heat accumulation at the end of the season between the studied seasons. However, the three seasons were above average and 2013 was the warmest season of the 3 studied seasons (+ 100 units in terms of GDD).

Using monthly data for each studied season from September to March, it could be found that the 2012 season was characterized by a hot summer (23.7°C in February), while 2013 was characterized by a hot spring (16.9°C in October) and 2014 was very wet (469 mm in total over January-February). These climatic conditions across the growing season may have influenced grape berry compositions.

Looking at the ripening period (January and February), the 2012 season was the warmest ripening period of the three studied seasons with maximum temperatures 1.2 ºC and 1.3 °C above the 1972-2015 long-term average respectively in January and February, and February minimum temperature (cool night index) 1.5 °C above average (Table 2). In opposition, the 2014 season was cooler, especially in February with maximum temperature 1.6 ºC below average and particularly wet. Thus, the main climatic characteristic of the 2014 ripening period was its large amount of rainfall with a total of 469 mm over January and February; i.e. twice more than the long-term average and around 300 mm more than the other two seasons. The particularity of the 2013 season compared to the other two seasons lied in drier conditions during (more than 80 mm less than the long-term average and 330 mm

less than the 2014 ripening period). Despite being the warmest growing season of the 3 studied seasons, thermal conditions during the 2013 ripening period were close to the long-term average in terms of maximum temperature and cooler at night as shown with a cool night index (February minimum temperature) of about 0.5°C below average.

Table 2 Maximum (MaxT) and minimum (MinT) temperature (ºC) and Rainfall (R in mm) during the ripening period of 2012, 2013 and 2014 in comparison to the 1972-2015 long-term average at Las Brujas weather station (INIA 2015)

	MaxT (°C)				*MinT (°C)*				*R (mm)*			
	2012	2013	2014	1972-2015	2012	2013	2014	1972-2015	2012	2013	2014	1972-2015
January	30.3	29.2	28.9	29.1	16.6	16.4	17.8	16.8	60.7	50.3	281.2	06.3
February	29.3	27.8	26.4	28.0	18.2	16.2	17.6	16.7	109.7	88.9	187.4	16.7
Total									170.4	139.2	468.6	23.0

Spatial Variability of temperature

Considering bioclimatic indices as calculated using temperature data recorded in the commercial vineyards, statistical differences between plots could be found (Table 3). Indeed, Plot 5 appeared to be the coolest in terms of heat accumulation expressed in GDD and HI (R^2=0.81; *P*=0.0001 and R^2=0.95; *P*<0.0001 respectively) (1648 mean value of GDD at P5), while Plots 1, 2, 3, 8, 9 and 10 showed the highest values (i.e. more than 1750 units for GDD). Thus, the greatest spatial difference in terms of GDD was of 156 units on average between Plot 1 (the warmest plot) and Plot 5 (the coolest plot), reaching 162 units during the warm season of 2013. Considering the Huglin index, the greatest difference was obtained between Plot 9 and Plot 5 and was of 212 units, reaching 231 units using the data of 2013. Moreover, differences between plots were greater than the differences between seasons. Indeed, the seasonal difference reached only 70 units in terms of GDD at Plot 9 (28.6 km inland) and 36 units in terms of HI at Plot 6 (21.9 km inland) between the warmest season (2013) and the coolest season (2012). On average, the difference between the seasons was of 53 units and 19.6 units in terms of GDD and HI respectively.

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

Table 3 Bioclimatic indices: Growing Degree Days (GDD), Huglin Index (HI) and Cool Night Index (CNI) calculated at the local scale (plots) for three seasons (2012, 2013 and 2014) and average for the 3 seasons

Plot	*GDD*				*HI*				*CNI*			
	2012	2013	2014	Mean	2012	2013	2014	Mean	2012	2013	2014	Mean
Plot1	1776	1829	1804	1803	2327	2351	2328	2335	19.5	17.6	18.8	18.6
Plot2	1729	1757	1757	1748	2400	2400	2367	2389	17.9	16.0	17.4	17.1
Plot3	-[a]	1767	1748	1758	-[a]	2412	2366	2389	17.4	15.8	17.4	16.9
Plot4	1692	1741	-[b]	1717	2344	2366	-[b]	2355	18.0	15.8	-[b]	16.9[*]
Plot5	1617	1667	1659	1648	2260	2267	2261	2263	17.6	15.5	17.0	16.7
Plot6	1671	1733	1727	1710	2325	2361	2344	2343	17.9	15.7	14.0	15.9
Plot7	1649	1693	1710	1684	2341	2365	2355	2354	17.2	15.0	16.7	16.3
Plot8	1759	1822	1802	1794	2451	2464	2430	2448	17.8	16.0	17.5	17.1
Plot9	1743	1813	1796	1784	2474	2498	2452	2475	17.3	15.6	17.3	16.7
Plot10	1713	1771	1772	1752	2431	2457	2432	2444	17.4	15.4	17.2	16.7
Mean	1705	1759	1753	1740	2373	2394	2363	2380	17.8	15.8	17.0	16.9

Statistical differences between plots (R^2=0.81; P<0.0001) **Statistical differences between plots (R^2=0.95; P<0.0001). [a] The sensor was not installed early enough to calculate the indices. [b] 40 % of missing data.[*] Mean of two seasons.

Considering the Cool Night Index (CNI) results, no statistical differences between plots were found (Table 3). The CNI ranged between 16 °C and 18 °C on average over the 3 seasons with Plot 1 experiencing the warmest and Plot 6 the coolest night conditions during the ripening period. Plot 1 and 4 reached 19.5 °C and 18 °C in February 2012 and experienced warm nights (>18 °C), while in February 2013 all plots, except Plot 1, experienced cool night conditions (<16 ºC).

The difference in thermal stress for the development of berry aromas and color between plots was assessed using the numbers of days and hours with temperature above 35 ºC during the ripening period. Results showed significant differences between plots (Table 4). Plot 8 and 9 experienced 8 days on average with a maximum temperature above 35 °C leading to a total of 25.7 and 27 hours of thermal stress for the grapevine respectively, while Plot 1 experienced 2 days with temperature above 35 ºC and 7 hours of extreme thermal conditions only.

Because of warmer night conditions (Table 3) and lower thermal stress during the day (Table 4), Plot 1 were the plot with the smallest daily thermal amplitude.

Table 4 Numbers of days and hours with temperature above 35 ºC (NDT35 and NHT35) between the 1st of January and the 15th of March in 2012, 2013 and 2014.

Plot	*NDT35*				*NHT35*			
	2012	2013	2014	Mean	2012	2013	2014	Mean
Plot1	4	0	2	2.0	17	0	5	7.3
Plot2	13	3	3	6.3	46	4	18	22.7
Plot3	9	2	5	5.3	35	3	14	17.3
Plot4	9	4	-	-	26	3	-	-
Plot5	7	0	2	3.0	23	0	6	9.7
Plot6	8	0	4	4.0	23	0	14	12.3
Plot7	13	4	4	7.0	37	5	15	19.0
Plot8	14	6	4	8.0	48	10	19	25.7
Plot9	14	5	5	8.0	49	12	20	27.0
Plot10	12	5	4	7.0	37	15	18	23.3
Mean	10.3	2.9	3.7	5.6	34.1	5.2	14.3	17.9

Temperature spatial variability during a specific heat event during ripening

Despite the relative flat terrain of the study area (92 m is the highest elevation at Plot 4), hourly temperature differences between two contiguous plots (for instance Plot 6 at 65 m and Plot 7 at 62 m) may be of importance for grapevine. This is usually experienced during specific heat events. To illustrate the significant temperature variability over short distances, results for the 15th of February 2012, the hottest day of the season are presented (Figure 4). Maximum temperatures for this particular day reached between 31.9 ºC at Plot 1 and 38.9 ºC at Plot 7. While the plot near the river (Plot 1) under the moderating influence of the La Plata River experienced temperature below 32 ºC, Plot 6 and 7 recorded between 2 and 6 hours

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

with temperature above 35 ºC respectively during which grapevine may have experienced extreme thermal stress.

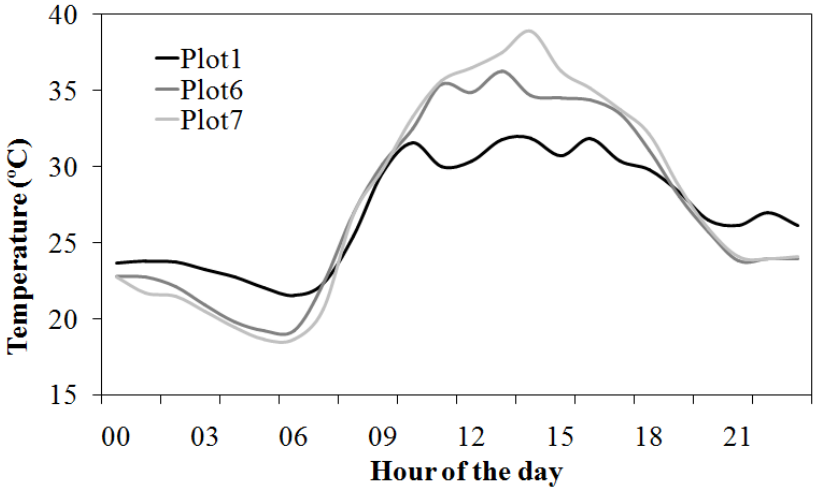


Fig. 4 Hourly temperatures (ºC) for the 15th of February 2012 in Plot1, Plot6 and Plot7

Tannat grape berry composition at harvest

In 2012, grapes were harvested late in 5 days (between the 2nd and 7th of March). In 2013, harvest took place early (between 19th to 28th February) and in 2014, it took 16 days to harvest the grapes (between 18th February and 6th March). Grape health status and berry composition at harvest were different in these three years. In the first vintage, because of rainfall close to harvest at some places and consequently *Botrytis* spp. infections there was a decrease in yield (Plot1, 9 and 10). For 2014, the large amount of rainfall during summer in the entire region caused several infections of *Botrytis* spp. in the berries, causing different levels of incidence within all plots.

The averages for the Tannat compounds showed that Plot 1 was the most variable under those three vintages, in terms of sugar content (SC), acidity (TA) and polyphenols (potential in extractable anthocyanins - ApH3.2 and phenol richness - A280), while the plots with balanced composition for red wine elaboration were Plots 2, 4, 5 and 6 with the highest values in SC (R^2=0.62; P<0.0001), ApH3.2 (R^2=0.35; P=0.0008), A280 (R^2=0.34; P<0.01) and lowest TA (R^2=0.77; P<0.0001)

(Figure 5). In the same way, Plot 5 was the steadiest in terms of vintage variability (standard deviation values), followed by Plots 7 and 8.

Analyses partitioned by year, showed that Plot 5 was the plot with balanced values, reaching the higher sugar content and lower acidity in the grapes in the three vintages. Plot 8 and 10 showed also lowest values in acidity in 2012, 2013 and 2014. In terms of secondary metabolites in berries, Plot 2 and 3 showed the highest values in ApH1 (in 2012 and 2014), and Plot 3 and 4 reached the highest values in A280 all the years.

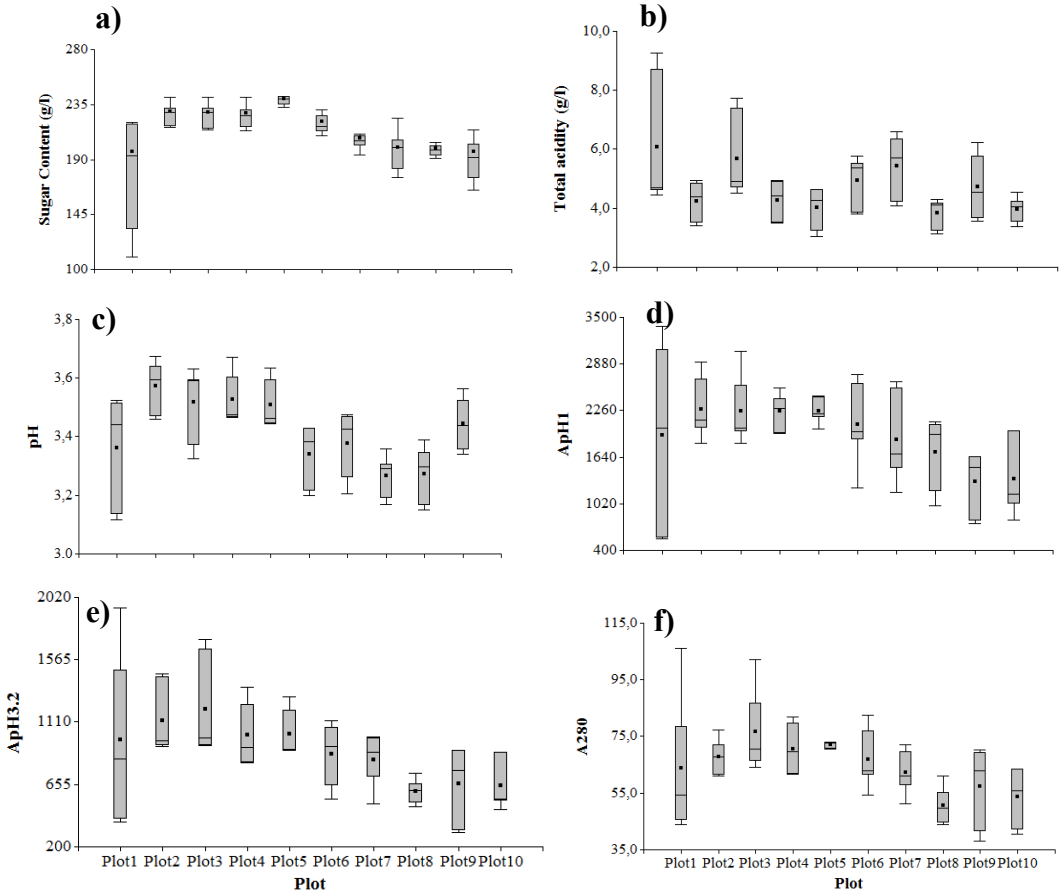


Fig. 5 Compounds 3-year average from Tannat grapes at harvest between plots: sugar content (a), total acidity (b), pH (c), total potential in anthocyanins (d), potential in extractable anthocyanins (e), phenols richness (f)

The representation of the spatial variability on grape berry composition at meso-scale for the three studied seasons displayed the differences under the region and among

winegrowers (Figure 6). For all the composition parameters, two components were analyzed due to their spatial and temporal variability. Plots situated between 18 and 22 km inland showed the maximal values of SC (in red, Figure 6), even when variability was important under the region and within winegrowers. For those plots, SC was at least 211 g/l (the poorest value, in 2014). Tannat grapes reached the maximum values of ApH3.2 also in the plots situated in the middle of the studied region (in red, Figure 6). 941 mg/l was the maximal value reached the poorest year (2012).

Under the same management practices (within winegrowers/vineyards), ApH3.2 and the other polyphenols indices seemed to be more stable than SC, with no statistical differences between contiguous plots.

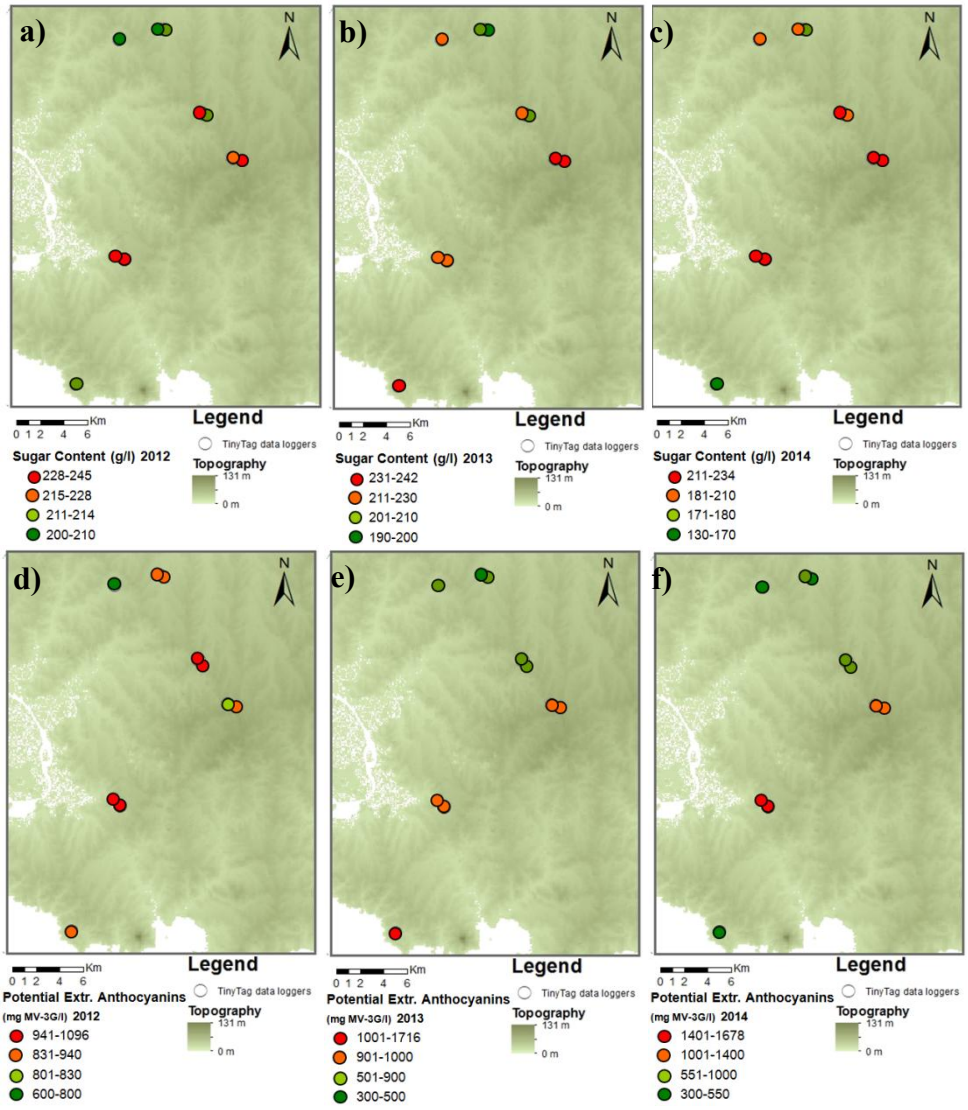


Fig. 6 Tannat grape berry composition at harvest in the plots: Sugar content in 2012 (a), 2013 (b) and 2014 (c) and Potential in extractable anthocyanins in 2012 (d), 2013 (e) and 2014 (f). Colors display results from the Tukey grouping (α = 5 %)

Sensitivity of the grape berry composition to temperature

Given the reduced dataset for statistic analyses (3 seasons), correlations between temperature and berry composition showed weak relationship between variables (Table 8), even if the principal component analysis (PCA) represented 77.1 % of the total variability. Temperature over the growing season was found to be the prevailing indicator for berry composition with significant correlations between the HI and SC

(r=-0.62, *P*=0.05), ApH1 (r=-0.69, *P*=0.03) and A280 (r=-0.60, *P*=0.07). Extreme temperature was also a significant indicator for berry composition as shown with correlations between the numbers of hours with a temperature above 35 ºC and secondary metabolites of grape: ApH1 (r=-0.58, *P*=0.08) and A280 (r=-0.56, *P*=0.09).

Table 8 Correlations and p-value of the PCA between temperature and Tannat composition at harvest in the three studied seasons. Significant correlations are represented in bold. (SC = Sugar content; TA = Total Acidity; ApH1 = Total Potential in Anthocyanins; ApH3.2 = Potential in Extractable Anthocyanins; A280 = Phenolic Richness; jMaxT = January maximum temperature; fMaxT = February maximum temperature; jMinT = January minimal temperature; fMinT = February minimal temperature; TAm = Thermal amplitude during the ripening period; HI = Huglin Index; CNI = Cool Night Index; NH30 = Number of Hours with a temperature over 30ºC during the ripening period; NH35 = Number of Hours with a temperature over 35ºC during the ripening period)

Climate variables	*Primary Metabolites*						*Secondary Metabolites*					
	SC		pH		TA		ApH1		ApH3.2		A280	
	corr	*p*	corr	*p*	corr	*p*	corr	*p*	corr	*P*	Corr	*p*
jMaxT	-0.24	0.51	-0.12	0.74	-0.47	0.17	-0.50	0.14	-0.43	0.21	-0.42	0.22
jMinT	-0.25	0.48	-0.16	0.65	0.45	0.19	0.15	0.69	-0.20	0.58	0.01	0.97
fMaxT	-0.14	0.69	0.04	0.91	-0.25	0.48	-0.24	0.51	-0.17	0.65	-0.20	0.58
fMinT	-0.28	0.43	-0.14	0.69	0.40	0.25	0.10	0.78	0.17	0.64	-0.01	0.99
HI	**-0.62**	0.05	-0.45	0.19	-0.19	0.60	**-0.69**	0.03	-0.54	0.11	**-0.60**	0.07
TAm	-0.10	0.79	-0.05	0.89	-0.38	0.28	-0.40	0.25	-0.36	0.31	-0.27	0.46
NH30	-0.13	0.72	-0.08	0.83	-0.49	0.15	-0.40	0.25	-0.36	0.31	-0.36	0.30
NH35	-0.39	0.27	-0.27	0.45	-0.41	0.24	**-0.58**	0.08	-0.51	0.13	**-0.56**	0.09
CNI	-0.30	0.40	0.01	0.98	0.31	0.38	-0.04	0.91	0.17	0.63	-0.04	0.91

Tannat grape berry composition showed a significant variability that could be associated with temperature when it was analyzed year by year. The PCA performed for 2013 reached the highest value in total variability (82.5 %) in comparison to 2012 (75.7 %) and 2014 (73.6 %). Heat during veraison to harvest (jMaxT, jMinT, TAm, NH30 and NH35) and secondary metabolites in the grape (ApH1, ApH3.2 and A280) were the major contributing variables to component 1 (66.1 %). HI, CNI and primary metabolites as pH and TA were the contributing variables to component 2 (16.4 %).

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

The climate components in the first principal component were strongly correlated with anthocyanins and phenols (correlations above r=0.70), in a positive way with the variables concerned to minimal temperatures i.e. night conditions (jMinT, fMinT and CNI) and in a negatively way with maximal temperatures (jMaxT and fMaxT), TAm and NH30. Figure 7 represents plots locations under the PCA in 2013. Plot1 was located near the minimal temperatures while Plots 8, 9 and 10 were situated near the maximum temperatures.

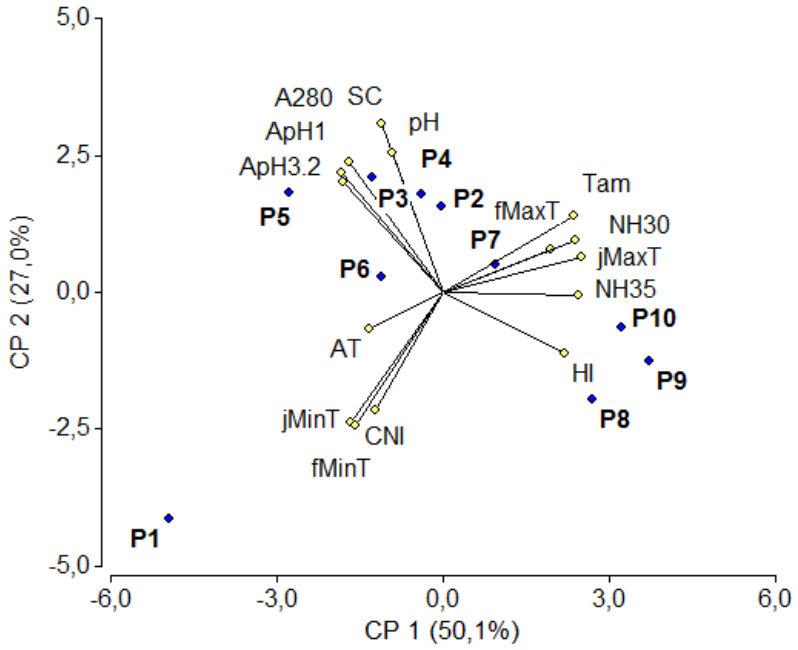


Fig. 7 Principal Component Analysis. Eigen vectors of temperature and grape berry composition (yellow) and medium scores for each plot (blue). (SC = Sugar content; TA = Total Acidity; ApH1 = Total Potential in Anthocyanins; ApH3.2 = Potential in Extractable Anthocyanins; A280 = Phenolic Richness; jTmaxT = January maximum temperature; fMaxT = February maximum temperature; jMinT = January minimal temperature; fMinT = February minimal temperature; TAm = Thermal amplitude during the ripening period; HI = Huglin Index; CNI = Cool Night Index; NH30 = Number of Hours with a temperature over 30ºC during the ripening period; NH35 = Number of Hours with a temperature over 35ºC during the ripening period)

The cluster hierarchical classification using the highest correlated variables from the PCA displayed three classes (0.971 of cophenetic correlation coefficient) (Figure 8).

The first cluster was composed of the Plot1, the second one of Plot 8, 9 and 10 and the third class the remaining plots (2 to 7).

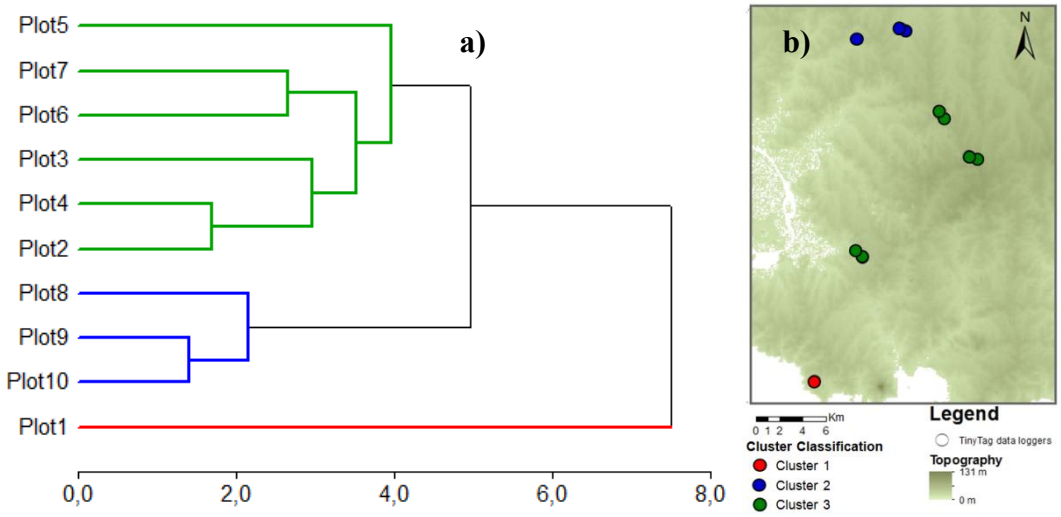


Fig. 8 Cluster classification (Ward method) of the plots (a) and corresponding location in the region (b)

4.6. DISCUSSION

Climate spatial variation

The results obtained during the ripening period showed a significant spatial variability of temperature over short distances in the region, with a clear La Plata River effect on temperatures. That is crucial in the sense that Barnuud et al. (2014) proved that the ripening period climate is more influential in determining berry composition at maturity than early growing season climate.

Temperature was moderate in a group of plots strongly influenced by the river (Plots 1, 4, 5, 6 and 7) and increased in the plots situated 23 km away from the river (Plots 8, 9 and 10) or facing to the west (Plots 2 and 3). It was shown over these three seasons that the influence of the La Plata River stopped rapidly 6 km inland (distance difference between plot 7 and 8) although the breeze may reach a distance of 28 km over the wine region under hot conditions (Fourment et al. 2014).

Although the study was carried out using 3 seasons only, results displayed a greater spatial variability of temperatures than temporal variability even in a flat terrain. Similar results were obtained in South Africa (Bonnardot et al. 2005; 2014) and France (Bonnefoy et al. 2013) in more complex terrains with fine scale variability as great as or even greater than the regional scale variability.

Even if there are differences in the ripening period over those seasons, the same features in spatial distribution of temperatures are retrieved. When summer was warmer, the differences between plots were more important, i.e. during the hottest days of summer and during the day (maximum temperatures). Looking at hourly temperature data and assuming that grapevine experiences high temperature stress above 35°C (Coombe 1987; Hunter and Bonnardot 2011), results evidenced high differences in temperature during the ripening period in the plots. For those plots influenced by the river, the thermal stress was half of those experienced inland, especially when summer conditions were extreme. That suggests that over hot situations, La Plata River could play an important role to moderate stress situations for vine grape functioning.

On the other hand, local variations in temperature exist within short distance near the river. Plot 2 and 3 are located at 11.7 km from La Plata River. However, the topography features (narrow basin) and exposure (to the West) protect those plots from sea estuary effects compared to Plot 1. They record higher maximum temperature and thus increased thermal amplitude during ripening period, which may have impacted berry composition significantly. Local effects were stronger than meso-climate effects as it was found in the Loire Valley in France (Bonnefoy et al. 2013).

Beside the fact that thermal stress was experienced inland in the day of study (15th February 2012), the duration with extreme temperature for grapevine was three times higher at Plot 7 than at Plot 6. Although these two sites are 58 m apart only, the steeper slope (5.1 %) at Plot 7 than at Plot6 (flat) displayed topo-climate differences that could have hold implications on grapevine development. Sugar accumulation, malic acid content, skin colour and phenolic content on berries could have been

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

altered by these conditions during grape maturation (Coombe 1987; Mori et al. 2007).

Tannat composition at harvest

Spatial variability of Tannat composition at harvest (between plots) was greater than temporal variability (between seasons). Berries from the plot near the river (Plot 1) and from plots 23 km away from the river (Plot 8, 9 and 10), proved to have the most unbalanced composition in all the vintages and in average, specifically in primary metabolites. Total acidity is a component that is partially degraded (acid malic) and consumed during the ripening period (Kliewer 1973; Sweetman et al. 2014). Acidity is lessened under extreme hot summer conditions. Jackson and Lombard (1993) reported that cool nights associated with warm day temperatures i.e. great thermal amplitude were able to increase acid levels in grapes compared to cooler daytime and warmer nighttime conditions. That could be the case of Plot 8 to 10. Those plots, far away from the river and with more heat accumulation, have had the least acid Tannat berries at harvest, showing a possible effect on malic acid degradation by high temperatures (Sweetman et al. 2014).

In the same way, it is known that temperatures and in particular high thermal conditions during ripening, seem to be the most limiting climatic factor for the biosynthesis of anthocyanins, causing inhibition of this process (Mori et al. 2007; Cohen et al. 2008; Goto-Yamamoto et al. 2009; Barnuud et al. 2014) and a decrease of this compound by degradation (Mori et al. 2007; González-Neves et al. 2010). Barnuud et al. (2014) reported that berry anthocyanins concentrations were significantly and inversely related to temperature experienced between véraison and maturity over a 700 km sampling transect in Western Australia wine region. At a finer scale, with a similar temperature gradient over a shorter distance is likely to differentiate plots situated away from the river with high summer temperatures affecting final polyphenolic composition in the grapes and shaping lower content in anthocyanins compared to plots near the river.

For the studied period, berries harvested at plots situated between 11 and 22 km from La Plata River (Plot 5 and in other order Plot 2, 3 and 4) showed less variability in SC, ApH1 and A280 over the three vintages. This characteristic of stability is essential to wine producing and potential quality in wines. Under the Uruguayan conditions for Tannat winemaking, González-Neves et al. (2010) studied optimum levels of polyphenols index related to quality. They showed the importance of those indices for the oenological assessment of the grapes and for the winemaking conditions. The extractability of anthocyanins proposed by Glories and Augustin (1993) was greater in berries harvested at Plot1 in all the studied vintages. Despite the fact that it was the poorest plot in anthocyanins potential, their extractability was as easy as for the berries from other plots, even when extraction of anthocyanins is difficult in this variety.

Berries from adjacent plots (i.e. Plot 2 and 3, or Plot 4 and 5) showed more significant variability in SC and TA than in potential in extractable anthocyanins and phenolic richness.

Tannat response to temperature

For all the three vintages, multivariate analyses of Tannat berry composition at harvest and temperature variables have discerned at least three features: (1) Tannat sensitivity to spatial temperature varied over the vintages, (2) correlations between berry composition and temperature variables increased (in value and number) under dry ripening conditions, and (3) correlations between secondary metabolites of Tannat and spatial temperature were greater than those between primary metabolites of Tannat and spatial temperature.

This is likely because complex vintages, e.g. rainy summers, could promote major winegrower interventions (soil practices, canopy management and intensive phytosanitary use) to obtain quality in vinegrapes. Consequently, final composition of grapes is a complex response of several factors, in addition to temperature. Clingeleffer (2009) reported that vineyard practices could minimize the impact of variability in climatic conditions from season to season. Canopy management for an

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

optimum plant balance (source/sink ratio) and success in phytosanitary treatments for good fruit quality could be determinant to final Tannat composition for Uruguay conditions.

Across all three seasons, the correlations between temperature and primary metabolites of Tannat grapes were lower than those between the secondary metabolites. Tannat secondary metabolites were more correlated to the climate variables as HI (r>-0.6) and NHT35 (r>-0.56) demonstrating more sensitiveness. Analyzing correlations by season, similar results were found with stronger relationship between temperatures and Tannat secondary metabolites, as in the PCA of 2013. For that year, thermal amplitude was the component more correlated to berry final composition in those vineyards: with SC (r=-0.76), ApH1 (r=-0.9), ApH3.2 (r=-0.94) and A280 (r=-0.92). Those results are in agreement with the discussion above, regarding secondary metabolites of Tannat being likely more affected by meso-scale temperatures in the region of the study. Tannat anthocyanins at harvest were higher in berries from cooler plots at night (as far as 18.3 km for La Plata River) than those from the warmer plots at night. This corroborates results of Mori et al. (2007) and Barnuud et al. (2014). Indeed, the higher levels in phenols richness were found in the berries harvested at plots situated as far as 18.3 km from the river.

Even if vintage quality was not our focus, quality varied from one year to another. The highest levels in SC and ApH1 in berries of Tannat over the region were reached in 2012, the coolest vintage of the study in terms of heat accumulation (GDD and HI). That contrast with the results found by Baciocco et al. (2014) in Bordeaux (France). This work looked for the climatic factors that are critical to differentiating overall vintage quality. In this region, the best red wine vintages are associated with higher temperatures, large heat accumulations (HI and GDD) and low precipitation (especially during ripening), due to the balance between sugar accumulation and acid loss. Contrasting results could be explained possibly because the climate of Bordeaux do not belong to the same Köppen-Geiger class that in Uruguay (Temperate summer in Bordeaux vs. hot summer in Uruguay; *Cfb* and *Cfa* respectively) and in this class heat accumulation is critical for wine quality.

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

Using the cluster analysis, plots were divided into three groups that revealed the temperature gradient over the region. The same grouping was observable in the PCA analysis (Figure 7). The first group, shaped by Plot 1, was associated with high minimal temperatures, while the second group (Plot 8 to 10) was related to high maximal temperatures and large thermal amplitude, demonstrating the decreasing influence of the river inland. The last group (Plot 2 to 7) was the most related to berry composition, confirming they are the most balanced vineyards for wine producing.

Limits of the study

The use of thermal sensors installed in the canopy helped to study the grapevine response to temperature at fine scale. It is relevant as Matese et al. (2014) discussed in their work, because temperature results translate the real thermal conditions in the vineyards. However, there is an indirect method to investigate temperature effects on viticulture as defined by Bonada and Sadras (2015). For the authors, the indirect methods rely on natural gradients from variations in space or time and results are inferred from comparisons between thermally contrasting regions or vintages. In consequence, the results could be misinterpreted and may overlook secondary effects. In the case of our study, different cultural practices were performed over the region. The selection of contiguous plots was used to minimize the vinegrower management effect, as well as the different soil types (similar over the region and different on contiguous plots). Nevertheless, results of Tannat composition at harvest was assessed at the time during which grapevine is the more sensitive to temperature; this is the ripening period especially.

4.7. CONCLUSIONS

The fine scale network of temperature loggers installed in the vineyards of Canelones and Montevideo departments contributed to increase the knowledge on climate in the coastal wine producing region of Uruguay. It is an interesting approach to

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

understanding how the real temperatures in the vineyard have an impact on the vine functioning at that scale.

This research details the spatial variability in temperature over the most important wine region of Uruguay. Results showed significant spatial variability in temperature, stronger than temporal variability in southern Uruguay. Sea and topography effects were identified at fine scale using differences in daily thermal amplitude and maximum temperatures during the growing season and ripening period of grapevines. Analysis of extreme maximum temperatures helped in identifying how high temperatures could affect grapevine physiological functioning and hence, final grape composition.

Even if berry final composition at harvest is the result of several factors that have an effect on vinegrape physiology and development, our study has allowed the development of knowledge on the relationships between Tannat berry compounds and temperature over the region. It appeared that berry composition responded to temperature and its relation is year dependant and stronger in secondary metabolites. For our conditions of study, we found that Tannat response to temperature is more determinant when climate conditions are dry than if they are hot or cold. For Uruguay with an important seasonal climate variability, especially rainfall variability, it is important to determine when grapevine behavior is strongly influenced by climate and how winegrower, through their cultural practices, would have the possibility to intervene in order to improve fruit quality.

The increasing knowledge of spatial temperature variability and its relationships with grape berry composition contributes to improving vineyard management during ripening period. These results lead to further investigation on adaptability of vineyards of southern Uruguay to climate variability in the changing climate context.

Acknowledgements: We are grateful to the following grapevine-growers and wine-producers for providing limitless access to their vineyards: Luis Púa, Gustavo Blumetto and Néstor Merino of Establecimiento Juanicó, Eduardo Pisano of Bodega Pisano, Carlos Pizzorno of Pizzorno Wine States, Fernando Scalabrini of Bodega Bouza and Pablo Rodríguez from Bodega La Estancia.

4.8. REFERENCES

Anderson JD, Jones GV, Tait A, Hall A, Trought MCT (2012) Analysis of viticulture region climate structure and suitability in New Zealand. J Int Sci Vigne Vin 46:149-165

Baciocco KA, Davis RE, Jones GV (2014) Climate and Bordeaux wine quality: identifying the key factors that differentiate vintages based on consensus rankings. J Wine Res 25(2):75-90

Barnuud NN, Zerihun A, Gibberd M, Bates B (2014) Berry composition and climate: responses and empirical models. Int J Biometeorol 58:1207-1223

Blanco-Ward D, García Quejeiro JM, Jones GV (2007) Spatial climate variability and viticulture in the Miño River Valley of Spain. Vitis 46:63-70

Bonada M, Sadras VO (2015) Review: critical appraisal of methods to investigate the effect of temperature on grapevine berry composition. Aust J Grape Wine Res 21:1-17

Bonnardot V, Carey V, Cautenet S, Madelin M, Coetzee Z, Quénol H (2014) Changement climatique et variabilité spatiale des températures à fine échelle dans les vignobles de Stellenbosch (Afrique du Sud). In: Quénol H (ed) Changement climatique et terroirs viticoles. Lavoisier, Paris, pp 247-266

Bonnardot V, Planchon O, Cautenet S (2005) The 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

Bonnefoy C, Quénol H, Bonnardot V, Barbeau G, Madelin M, Planchon O, Neethling E (2013) Temporal and Spatial Analyses of Temperature in a French Wine-Producing Area: the Loire Valley. Int J Climatol 33:1849-1862

Carbonneau A, Moueix A, Leclair N, Renoux J (1991) Proposition d'une mèthode de prélèvement de raisin à partir de l'analyse de l'hétérogenité de maturation sur un cep. Bulletin OIV 64:679-690

Cohen S, Tarara J, Kennedy J (2008) Assessing the impact of temperature on grape phenolic metabolism. Anal Chim Acta 621:57-67

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

Coombe BG (1987) Influence of temperature on composition and quality of grapes. Acta Horticulturae 206:23-36

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'écophysiologie des systèmes de conduite Espalier et Lyre sur Merlot. PhD Thesis Université SupAgro Montpellier, France

Fourment M, Bonnardot V, Planchon O, Ferrer M, Quénol H (2014) Circulation atmosphérique locale et impacts thermiques dans un vignoble côtier : observations dans le sud de l'Uruguay. Climatologie 11:47- 64

Glories Y, Augustin M (1993) Maturité phénolique du raisin, conséquences technologiques: application aux millésimes 1991 et 1992. Proceedings of the Compte Rendu Colloque Journée Techn. CIVB, Bordeaux, France

González-Néves G, Ferrer M, Gil G, Charamelo D, Balado J, Barreiro L, Bochicchio R, Gatto G, Tessore A (2010) Estudio plurianual del potencial polifenólico de uvas Tannat. Agrociencia Uruguay 14:10-21

Goto-Yamamoto N, Mori K, Numata M, Koyama K, Kitayama M (2009) Effects of temperature and water regimes on flavonoid contents and composition in the skin of red-wine grapes. J Int Sci Vigne Vin, special issue Macrowine 75-80

Hall A, Jones GV (2010) Spatial analysis of climate in winegrape growing regions in Australia. Aust J Grape Wine Res 16:389-404

Huglin P (1978) Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. In: Proceeding Symposium International sur l'ecologie de la Vigne. Ministère de l'Agriculture et de l'Industrie Alimentaire, Contança

Hunter JJ, Bonnardot V (2011) Suitability of some climatic parameters for grapevine cultivation in South Africa, with focus on key physiological processes. S Afr J Enol Vitic 32:137-154

INAVI (2013) Instituto Nacional de Vitivinicultura. Estadísticas de los viñedos en http://www.inavi.com.uy/categoria/102-datos-nacionales-2015.html Accessed 11 March 2016

INIA (2015) Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. In: http://www.inia.uy/investigaci%C3%B3n-e-

innovaci%C3%B3n/unidades/GRAS/Clima/Banco-datos-agroclimatico Accessed 20 April 2016

Jackson DI, Lombard PB (1993) Environmental and management practices affecting grape composition and wine quality: a review. Am J Enol Vitic 44:409–430

Jones GV, Duff AA, Hall A, Myers JW (2010) Spatial analysis of climate in winegrape growing regions in the Western United States. Am J Enol Vitic 61:313–326

Kliewer WM (1973) Berry composition of Vitis vinifera cultivars as influenced by photo-temperatures and nycto-temperatures during maturation. J Am Soc Hortic Sci 98:153–159

Madelin M (2004) L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne : modélisation spatiale aux échelles fines des températures minimales et des écoulements de l'air. PhD Thesis. Université Paris 7, France

Madelin M, Bois B, Quénol H (2014) Variabilité topoclimatique et phénologique des terroirs de la montagne de Corton (Bourgogne). In: Quénol H (ed) Changement climatique et terroirs viticoles. Lavoisier, Paris, pp 215-227

Matese A, Crisci A, Di Gennaro SF, Primicerio J, Tomasi D, Marcuzzo P, Guidoni S (2014) Spatial variability of meteorological conditions at different scales in viticulture. Agr Forest Meteorol 189-190:159-167

Mori K, Goto-Yamamoto N, Kitayamam M, Hashizume H (2007) Loss of anthocyanins in red-wine grape under high 877 temperature. J Exp Bot 58:1935–1945

Nicholas KA, Matthews MA, Lobell DB, Willits NH, Field CB (2011) Effect of vineyard-scale climate variability on Pinot noir phenolic composition. Agr Forest Meteorol 151:1556-1567

OIV (1990) Recueil des méthodes internationales d'analyse des vins et des moûts. Office International de la Vigne et du Vin, Paris

Quénol H, Maciel A, Monteiro A, Beltrando G (2007) Variabilidade espacial do gelo primaveril nos vinhedos do Vinho Verde (Portugal). Geografia 32:5-27

Sadras VO, Petrie PR, Moran MA (2012) Effects of elevated temperature in grapevine. II juice pH, titrable acidity and wine sensory attributes. Aust J Grape Wine Res 19:107-115

Sweetman C, Sadras VO, Hancock RD, Soole KL, Ford CM (2014) Metabolic effects of elevated temperature on organic acid degradation in ripening *Vitis vinifera* fruit. J Exp Bot 65:5975-5988

Tonietto J, Carbonneau A (2004) A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. Agr Forest Meteorol 124:81-97

Winkler AJ, Cook JA, Kliewer WM, Lider LA (1974) General viticulture. University of California Press, Berkeley

5. PERCEPCIONES Y RESPUESTAS A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN UNA REGIÓN VITÍCOLA DE URUGUAY

5.1. RESUMEN

En una región vitícola, el conocimiento de la variabilidad climática es primordial para aportar respuestas de adaptación al cambio climático (CC). A partir de entrevistas semi-directas a los actores del sector según la metodología desarrollada en el proyecto TERADCLIM (France), se evaluó su percepción del CC y sus respuestas de adaptación. Los principales resultados mostraron la percepción que tienen los productores de la región de la variabilidad inter-anual local del clima. Los eventos extremos ocurridos en los últimos años (lluvias con fuertes rachas de viento, granizos) fueron destacados en las entrevistas, de los cuales el 71 % consideró un aumento en la frecuencia de estos fenómenos, aunque no fueron asociados al CC en la región. El 43 % de los entrevistados coincidió que la evolución de algunas prácticas pudo deberse al clima, especialmente aquellas sobre el uso preventivo de productos fitosanitarios. Los entrevistados identificaron los factores del clima que causan "años malos" en rendimiento y calidad de la uva. Ellos fueron el aumento de eventos extremos, la disminución de acumulación de horas de frío, el aumento de horas con temperaturas superiores a 35 ºC, el aumento de las precipitaciones durante el ciclo vegetativo y durante el periodo de maduración como sus impactos en sus viñedos. A partir del conocimiento local de las técnicas de cultivo que realizan los viticultores, surge la matriz de adaptación como respuesta a la variabilidad del clima. Dicho conocimiento puede ser de gran valor para los decisores de políticas públicas de adaptación al CC en la región.

Palabras clave: Percepción, Vulnerabilidad, Adaptación, Vid, Variabilidad Climática, Uruguay.

5.2. SUMMARY

Perceptions and responses of climate variability in a wine region of Uruguay

Over a wine region, the knowledge of climate variability is primordial to contribute to adaptation issues to climate change (CC). Interviews were carried out using the method developed in TERADCLIM Project to evaluate wine growers perception of CC and ways of adaptation. The main results showed a clear perception of climate annual variability for the winegrowers. Extreme climate events occurred the last years were highlighted, from which 71 % considered an increase of frequency of those events. Even when there was a perception of the increase of climate variability, it was not associated with CC in the region. 43 % of the cases coincided that the evolution of some viticulture practices in the last years could be due to climate, especially those related to the preventive use of phytosanitary products. The interviewed identified climate risks that caused "*bad years*" in terms of yield and quality. They were: increase in extreme events, decrease in cold units in winter, increase in hours with temperatures above 35 ºC, precipitation increase during the vegetative cycle and during the ripening period as well as its impacts in their vineyards. From the local knowledge of the vineyards operations that winegrowers realize, it arise the adaptation matrix as climate variability response. This knowledge could be of great value for the stakeholders and public policies regarding adaptation to CC in the region.

Key words: Perception, Vulnerability, Adaptation, Climate Variability, Wine Region, Uruguay.

5.3. INTRODUCCIÓN

La determinación de la adaptación de un agro-ecosistema al ambiente y particularmente a la variabilidad climática, se ha estudiado a lo largo de la historia. En el presente, los posibles impactos del cambio climático (CC) han llevado a estudios más específicos de la adaptación de varios cultivos. La vid, como planta indicadora del clima según Chuine et al. (2004), ha sido objeto de estudio en varias regiones vitícolas. Los trabajos de adaptación de la vid pueden ser aplicados a otros sistemas de producción perennes. Sin embargo, la vulnerabilidad de los sistemas cambia considerablemente de un sitio a otro.

La definición de vulnerabilidad al cambio climático fue realizada por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC). La vulnerabilidad de un agro-ecosistema se definió como la sumatoria entre su exposición física, su sensibilidad y su capacidad adaptativa, es decir, el impacto que provoca una exposición o amenaza a un sistema en particular (IPCC 2007).

La exposición física (o vulnerabilidad física) refiere a las condiciones climáticas, muchas veces adversas, a la que un agro-ecosistema es sometido: temperaturas adversas para su correcto desarrollo y crecimiento, precipitaciones deficitarias o en exceso, intensidad y velocidad de viento elevadas, entre otras variables. El cultivo de la vid es un cultivo perenne (más de 30 años de producción); su ciclo de crecimiento anual comienza en el Hemisferio Sur en setiembre con la brotación y culmina en abril con la caída de las hojas. Durante el invierno (mayo a agosto) la planta se mantiene en dormición. Las temperaturas óptimas para la vid varían a lo largo del ciclo, siendo los 25 ºC el óptimo para la fotosíntesis (Champagnol 1984; Hunter y Bonnardot 2011). En el mismo sentido, las precipitaciones necesarias para el crecimiento y desarrollo de la planta son de 500 a 750 mm distribuidos durante todo el ciclo (Jackson 2008).

La vulnerabilidad de la vid es analizada sobre una exposición física adversa: temperaturas extremas (ejemplo de olas de calor con temperaturas ambiente mayores a 35 ºC y enfriamiento por bajas temperaturas), precipitaciones deficitarias (estrés hídrico durante la maduración de la uva), precipitaciones extremas, radiaciones

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

directas (Baló et al. 1986; Schultz 2000; van Leeuwen y Vivin 2008) o combinaciones como puede ser el efecto de temperaturas extremas y la radiación directa, temperaturas extremas y diferentes regímenes hídricos (Bergqvist et al. 2001; Spayd et al. 2002; Goto-Yakamoto et al. 2011).

La sensibilidad de un agro-ecosistema se estudia según el impacto de determinadas condiciones ambientales. Para el caso de la vid, existen varios trabajos que analizan la sensibilidad del cultivo en función de variables climáticas (Barbeau et al. 2014). La sensibilidad es determinada por indicadores de crecimiento y desarrollo (estados fenológicos), producción y calidad de la uva y del vino. La vid presenta una plasticidad que es conocida en el reino vegetal. Sadras et al. (2009) muestran las plasticidades fenotípicas de tres cultivos (trigo, cebada y vid) medidas según su productividad y fenología, encontrando a la vid con una elevada plasticidad fenotípica.

La capacidad adaptativa de un agro-ecosistema abarca el análisis de las capacidades de los productores para afrontar la exposición física como amenaza. Su componente es mayormente humano y depende de varios factores como, por ejemplo, el tipo de productor (familiar o empresarial), su capacidad de informarse, el acceso a recursos, el conocimiento del cultivo que explota, entre otros (Grothmann y Pratt 2005; Yaro 2013). Según van Leeuwen et al. (2013) la capacidad de adaptar las medidas de manejo por parte de los viticultores ha hecho que los impactos de CC en la vid hayan sido amortiguados.

La percepción del CC por parte de los productores y asesores del sector productivo, es parte de la capacidad adaptativa del sistema (Grothmann y Pratt 2005). A una escala global, la percepción del riesgo al CC podría ayudar a una efectiva adaptación al cambio y variabilidad climática (CyVC) (Battaglini et al. 2009; Yaro 2013). A una escala local, la percepción de los viticultores a la variabilidad espacial del clima es primordial para la gestión del viñedo adaptada a esas situaciones locales como, por ejemplo, retrasando la poda en los cuadros que tienen riesgo de heladas tardías (temperaturas inferiores a 0º en los meses de setiembre u octubre). Goulet y Morlat (2011) demuestran la importancia de realizar entrevistas para conocer el *"savoir-*

faire" de los viticultores de modo de evaluar el nivel de adaptación de sus prácticas vitícolas en el manejo del viñedo.

Tal como citan Kelly y Adger (2000), la adaptación no es una actividad que se debe promover en un tiempo futuro, cuando el CC ocurre, sino una actividad inevitable que ya sucede y por tanto debe ser estudiada. En ese sentido, Neethling et al. (2016) han estudiado la evolución de las prácticas como medidas adaptativas al clima en dos regiones vitícolas reguladas de Francia (Anjou y Saumur). Su estudio ha mostrado que existen varios niveles de respuesta de adaptación, como las estrategias tácticas reactivas hasta las anticipatorias.

Las capacidades de adaptar medidas de manejo son mucho más limitadas (por la propia regulación nacional de las AOC) que en Uruguay, dónde no hay restricciones de producción ni de calidad de la uva y del vino (a excepción del contenido mínimo de alcohol), como tampoco de variedades a implantar. El trabajo de Lereboullet et al. (2013) es un ejemplo de respuestas específicas de adaptación entre países, como Francia (país tradicional) y Australia (del "nuevo mundo"). Este último se considera como un sistema más resiliente en el sentido de que las regulaciones de producción son más liberales, tienen débiles tradiciones y acciones colectivas efectivas que permiten implementar cambios importantes a grandes escalas (por ej. Sistemas de reciclaje del agua o alternar variedades).

La elaboración de matrices de sensibilidad y vulnerabilidad son utilizadas en los estudios de cambio climático para evaluar impactos y sistematizar respuestas. Cobon et al. (2009) han aplicado el estudio de las matrices de riesgo para los pastizales en Australia. Los mismos autores describen que, en una matriz que ilustra consecuencias del CyVC, el riesgo aumenta en la medida que la probabilidad de ocurrencia se hace más certera. Una matriz de riesgo puede ayudar a identificar, priorizar y gestionar el riesgo a varios niveles (negocio, industrial, sectorial, nacional, etc.). También se debe tener en cuenta la dinámica de la vulnerabilidad. Según Belliveau et al. (2006) la vulnerabilidad hacia una amenaza y su consecuente adaptación puede hacerlo más vulnerable a otro factor de estrés diferente. La visión global de varias exposiciones a diferentes componentes de la planta (rendimiento,

composición de la uva, sanidad), ayuda a establecer diferentes niveles de vulnerabilidad y por tanto, respuestas a tomar.

Este trabajo tiene el objetivo de determinar la percepción de la variabilidad climática que tienen los viticultores de la región sur de Uruguay, como también la vulnerabilidad de los viñedos mediante el desarrollo de matrices para sistematizar la información. En esta perspectiva, el propio conocimiento de los viticultores y asesores será la base para aportar medidas de adaptación al cambio climático a mediano y largo plazo (Boissière et al. 2013).

5.4. MATERIALES Y MÉTODOS

La región de estudio fue la principal zona vitícola de Uruguay, en los departamentos de Canelones y Montevideo. Esta región está ocupada de 5.317 ha de viñedos, es decir el 76,3 % de la superficie total dedicada al rubro (INAVI, 2016). En 2015, esta región representó el 86,9 % de la producción nacional. La viticultura es sobre todo del tipo familiar empresarial, donde la producción es dedicada tanto para la elaboración de vino de mesa como de vino fino V.C.P. (Vino de Calidad Preferencial). La producción en la región como a nivel nacional se caracteriza por presentar una gran variabilidad anual (Figura 1), explicado en parte por las variaciones inter-anuales del clima (Figura 2).

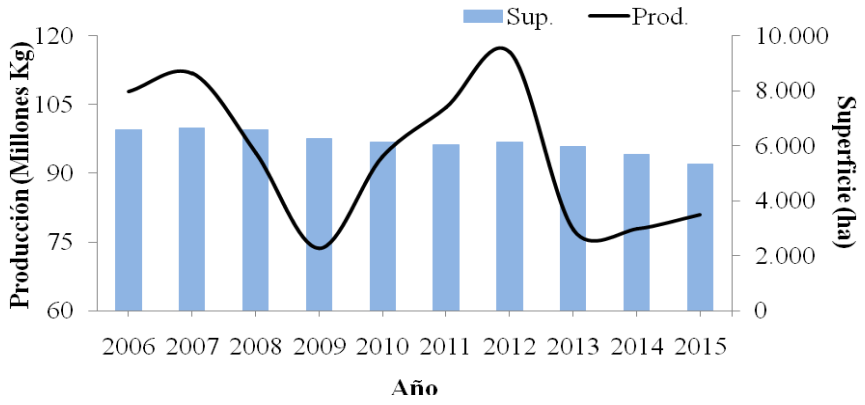


Fig. 1 Evolución de la producción total (millones de kg) y superficie total (ha) de los viñedos de Canelones y Montevideo (INAVI, 2016)

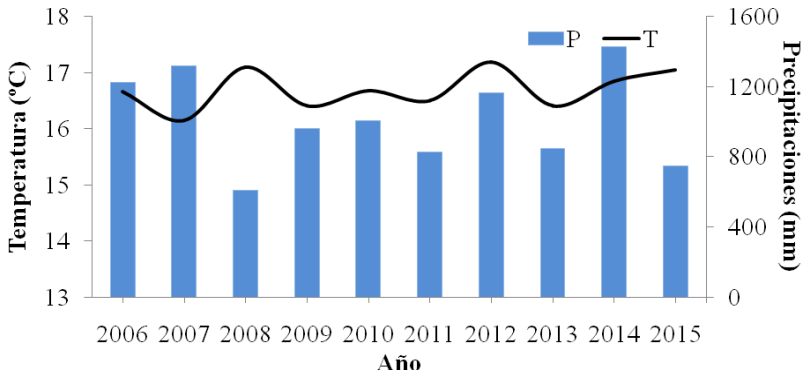


Fig. 2 Evolución de la temperatura promedio anual (ºC) y precipitación anual (mm) en INIA Las Brujas en Canelones, Uruguay (INIA, 2016)

La metodología del trabajo constó de tres pasos que se detallan a continuación: 1) Elaboración y ejecución de entrevistas para evaluar percepción y capacidad adaptativa, 2) Desarrollo de matrices de vulnerabilidad y 3) Descripción de posibles medidas de adaptación a la variabilidad climática en la región.

Paso 1 – Evaluación de la capacidad adaptativa y percepción. Elaboración y ejecución de entrevistas

Para estudiar la dinámica de las prácticas vitícolas en un contexto de cambio climático a meso-escala en la región vitícola del sur de Uruguay, se trabajó mediante entrevistas semi-dirigidas a los actores del sector: ocho vitivinicultores y tres asesores técnicos de la región según el protocolo desarrollado en el proyecto TERADCLIM (Quénol y Bonnardot 2014: Neethling et al. 2016). Esta etapa se basó en tres hipótesis: 1) los viticultores de la región conocen la variabilidad local del clima; 2) las prácticas vitícolas en los últimos 20 años fueron cambiando y parte de ello fue en función de la variabilidad local y temporal del clima y 3) la evolución de las prácticas puede ayudar a determinar la vulnerabilidad de algunos sistemas productivos vitícolas a la variabilidad climática local y regional.

Los vitivinicultores entrevistados son propietarios de viñedos situados en los Departamentos de Canelones y Montevideo y el destino de su producción es variado

(Vino de Calidad Preferencial V.C.P y/o vino de mesa). Ellos representan el 4,7 % del total de productores de la región (193 bodegas en 2015, según INAVI 2016). Los asesores técnicos entrevistados son profesionales que desarrollan su trabajo en la región y tienen una larga trayectoria en asesorías privadas individuales y de grupos de productores.

A partir de las entrevistas, se recabó la información de las prácticas vitícolas realizadas en los predios y su evolución para el período 1994-2014. Se tomaron en cuenta prácticas anuales y perennes. Las primeras se referían a la gestión de la canopia (desbrote, deshoje, roñado), la gestión del rendimiento (poda, raleo), la gestión del suelo (manejo de la vegetación espontánea, uso de herbicidas, fertilización) y el manejo fitosanitario (tipo de manejo, uso de fitosanitarios específicos, etc.). Como prácticas perennes fueron tomadas aquellas decisiones anteriores a la plantación, como las relacionadas a la implantación (topografía, densidad de plantación, orientación de las filas, sistema de conducción) y planificación (sistema de irrigación, lucha contra heladas, seguros climáticos) y por último, elección de la variedad y porta-injerto. A los entrevistados se les preguntaba cómo fue la evolución de las prácticas en los últimos años y el determinante del cambio. Por ejemplo, si el criterio de la poda invernal fue siempre el mismo y en caso contrario, que factor determinó un ajuste de la misma.

Luego se solicitó a los encuestados, que de ese periodo de tiempo, seleccionaran los años "buenos" y "malos" para la elaboración de vino, y que características determinaban dicha clasificación. Por último, se evaluó su percepción a la variabilidad y cambio climático, mediante preguntas dirigidas a la evolución y frecuencia de eventos climáticos extremos y sus impactos en la vid.

Paso 2 – Desarrollo de matrices teóricos de vulnerabilidad

Para determinar la vulnerabilidad de los sistemas de producción vitícolas de la región, se elaboraron matrices en el marco del proyecto FAO TCP/URU/3302 (MGAP-FAO, 2013). Mediante una modificación del sistema de matrices de Cobon

et al. (2009), se diseñaron matrices para las amenazas climáticas de la región que más afectan al cultivo según los entrevistados.

Según Cobon et al. (2009) se deben considerar las amenazas climáticas (que determinan la exposición física) y los factores que más afectan el cultivo (que determinan su sensibilidad). Las amenazas climáticas surgen de las entrevistas. Los entrevistados definieron 5 factores que afectan los viñedos para obtener uvas de calidad para la elaboración de vino fino, que son determinantes de los años "malos" de producción. Estas fueron: aumento de eventos extremos como temporales y granizo, la disminución de horas de frío (menor acumulación de frío en el invierno), aumento del número de días con temperaturas mayores a 35 ºC (Olas de calor que bloquean la actividad fotosintética de la vid), aumento de la intensidad de lluvias durante todo el ciclo y aumento de las lluvias de verano (afectando la maduración de la uva).

Se tomaron en consideración cinco factores claves de crecimiento y desarrollo de la vid que son sensibles al clima: el rendimiento (producción final de uva), su fenología (desarrollo de la planta), composición final de la uva separados por componentes primarios (azúcares, acidez y pH) y secundarios (compuestos fenólicos y aromas) y por último la sanidad (presión de enfermedades y plagas).

Por último, al determinarse con colores los niveles de consecuencias negativas de cada amenaza con los factores de la planta, se obtienen los niveles de vulnerabilidad de la vid. Los resultados surgen de las afirmaciones provenientes de las entrevistas realizadas, como resultados de observaciones locales.

Paso 3 – Propuesta de posibles medidas adaptativas a la variabilidad climática en la región

De los resultados de percepción y vulnerabilidad de los sistemas vitícolas del sur de Uruguay derivan posibles medidas de adaptación a la variabilidad del clima consideradas por los entrevistados que, con su "*savoir-faire*", establecen decisiones en su manejo diario. Las mismas son presentadas en un formato de matriz, con la metodología citada en el paso 2 (Cobon et al. 2009). Dichas medidas presentan

matices de colores que determinan la capacidad adaptativa de determinado manejo y el plazo temporal en el cual esa propuesta puede ser considerada.

5.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evolución de las prácticas vitícolas y el rol de clima como determinante del cambio

Las entrevistas a los actores de la región (productores y asesores), permitieron conocer el manejo de los viticultores de sus viñedos y la evolución en el cambio de decisiones de algunas prácticas. El manejo en verde de la canopia (desbrote, deshojado y roñado) han sido técnicas que los viticultores han modificado en los últimos años.

En el caso del deshojado, en ocho casos se citó la importancia que tiene la intensidad del deshojado dentro del "itinerario técnico" del viñedo en su conjunto. La práctica requiere de una gran dedicación de personal, más o menos capacitado, por un tiempo prolongado. La priorización de los cuadros a deshojar, la intensidad para lograr equilibrio en las plantas y la técnica como tal (del personal más especializado a la técnica mecánica) han sido las modificaciones más claras en los últimos veinte años. Los factores de cambio fueron la calidad de la uva obtenida (sanidad) en relación al precio de la práctica. En muchos casos, el deshoje manual toma 3 meses de personal dedicado a ello, con baja eficiencia, sin resultados de mejor calidad (relación costo/beneficio alta).

En las entrevistas realizadas, la gestión del suelo fue la actividad que en el 100 % de los casos coincidió ser la que mayores cambios ha sufrido en los últimos 20 años. Para su análisis, los entrevistados consideraban un periodo más largo (a partir de los 90') para describir el laboreo más intensivo que se realizaba anteriormente (Figura 3).

A principio de los años 90', se trabajaba el suelo con laboreos profundos durante todo el año para mantener el suelo limpio, sin malezas. Luego se pasó de una fuerte intensidad de laboreo a un manejo de laboreo mínimo, dónde primero se deja el laboreo en la fila y por último (años 2002) en la entre-fila. La causa más

determinante de esta evolución fue el impacto que tuvo el laboreo en las propiedades del suelo. Se comenzaron a constatar graves problemas de compactación y erosión, que limitaba el desarrollo radicular. A partir de los años 1995 se comienza a dejar cobertura vegetal tanto en la fila como la entre-fila. En esta última, se deja vegetación espontánea o abonos verdes (gramíneas sobre todo), según destino de producción y tipo de explotación. Sin embargo, es a partir de los años 2000 a 2001 que comienza a tener importancia la conservación de la biodiversidad.

El uso intensivo de herbicidas se dio en el período de 1990 a 2004, aproximadamente. Antes del comienzo de la década del 00', se comienza a constatar cierta tolerancia o resistencia de algunas hierbas al uso del Glifosato. A partir de allí se cambia la estrategia de control, para el uso combinado de herbicidas selectivos (graminicidas). También comienza a haber cierta sensibilidad sobre la contaminación por residualidad de productos herbicidas de contacto (Gramoxone - Paraquat) y pre-emergentes. Actualmente su uso se está limitando.

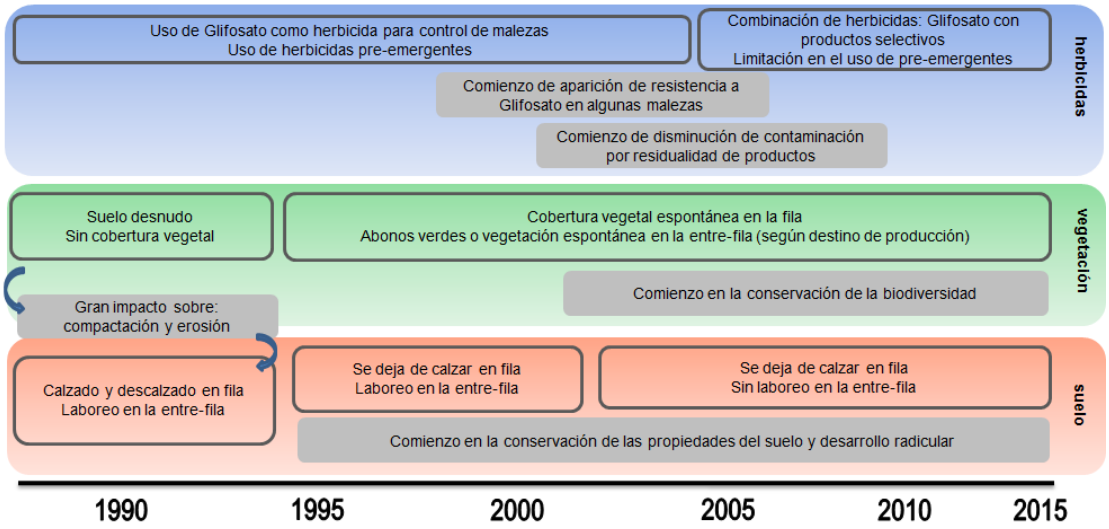


Fig. 3 Evolución del manejo del suelo del 1990 al 2015 en tres niveles: suelo (en naranja), vegetación (en verde) y herbicidas (en azul). Los recuadros en gris detallan algunas de las causas o factores de los cambios en el manejo

Algunos productores han puesto el ejemplo del cambio de sistema de conducción en los últimos años. Con el Plan de Reconversión de Viñedos alentado por el Ministerio de Ganadería (MGAP-Dirección General de la Granja), se estimuló hacia la

elaboración de vinos VCP en el país junto con un paquete de medidas técnicas. Entre ellas, fue alentado el sistema de conducción en dos planos (Lira) para la elaboración de vino fino, ya que permitía una mayor eficiencia fotosíntetica de la planta, en la medida que permitía una mayor carga por planta sin perder los estándares de calidad (Ferrer 2007). Sin embargo, el sistema requiere muchas intervenciones en la canopia para lograr una maduración final y la falta de ajustes de técnicas, el elevado costo de la mano de obra junto con la imposibilidad de mecanizar el viñedo, han hecho que los productores "vuelvan" a establecer el sistema en un plano, la espaldera.

Por último, una actividad técnica que no es despreciable, fue la evolución en los tratamientos fitosanitarios. En parte por la propia evolución de las moléculas de los principios activos, como también del rol del Ministerio de Ganadería y Agricultura y Pesca (MGAP) mediante la implementación de las Normas de Producción Integrada, ha ocurrido una sensibilización de los tratamientos, con objetivos preventivos y específicos para problemas de enfermedades puntuales (como el caso de las podredumbres por *Botrytis* spp.).

Actualmente, el manejo de fitosanitarios apunta al control preventivo de enfermedades, previo a las ocurrencias de lluvias, uso de productos selectivos para podredumbre de racimos (en el 87,5 % de los entrevistados), inexistencia de aplicaciones de insecticidas (se dirigen a casos puntuales) y mayor eficiencia de los tratamientos con adecuados volúmenes de agua y producto según sistemas de conducción y por tanto, área foliar a tratar. Sobre este último punto, los productores refieren a la importancia del asesoramiento técnico en la gestión de enfermedades y plagas.

El 43 % de los entrevistados coincidió que el clima pudo haber sido un factor determinante en la evolución de las prácticas, sobre todo aquellas que concierne el uso preventivo de productos fitosanitarios.

Las actividades anuales que no conciernen al control de enfermedades y plagas en el viñedo (gestión del suelo, de la canopia, raleo de racimos, etc.), han tomado una evolución en función de criterios de producción (control de la carga) y calidad (cambio de estándares de composición final de la uva), disponibilidad de mano de obra y su relación costo/beneficio y por último atención a las exigencias del

Fourment Reissig, Maria Mercedes. Adaptación de la vid (Vitis vinifera L.) a la variabilidad climática a meso-escala en el sur de Uruguay - 2016

consumidor (cambio o mejora de producto final, por ejemplo vino V.C.P.). Resultados similares fueron obtenidos en la Región del Maule en Chile por Hadarits et al. (2010). Las entrevistas mostraron que existe cierta sensibilidad al clima en la región, pero este no es factor crucial de cambio para la toma de decisiones, siendo determinantes para éstas el mercado, acuerdos institucionales y también disponibilidad de mano de obra.

Las estrategias de manejo de los productores durante el ciclo de cultivo se basan en dichos factores, no siendo prioritaria la adaptación de las técnicas en función del clima. Muchos productores atribuyen eso con la falta de confiabilidad en los pronósticos climáticos, que muchas veces anuncian largas sequías que finalmente no son tan extremas, o lluvias torrenciales que terminan en unos pocos milímetros o eventos climáticos extremos que si suceden sin alertas climáticas previas (ejemplo del granizo en enero 2013). Al igual que lo encontrado por Yaro (2013), son factores no climáticos los que influyen en la adaptación de productores a la VC.

Clasificación de años y sus determinantes

Los entrevistados coincidieron en su descripción de años buenos y malos para la elaboración de vino (Tabla 1). Clasificaron a los años "malos" según las condiciones adversas del clima durante todo el ciclo vegetativo y sobre todo, en la fase de la maduración de la uva (lluvias excesivas el mes precedente a cosecha). Por lo que el clima, fue determinante de una cosecha irregular con pérdidas de rendimiento y calidad. Si bien las técnicas de cultivo no son percibidas como adaptación al CC, el 100 % atribuye el resultado productivo al clima.

Los años con algún evento extremo puntual (ej. 2013 con granizo) fueron clasificados en las categorías de bueno y malo, dependiendo el alcance del daño en la región.

De esta clasificación, se destaca la importancia del clima en la calidad final del vino, sobre todo, como factor principal de clasificación cuando las condiciones fueron desfavorables para la maduración de la uva.

Tabla 1 Clasificación de años buenos y malos para la elaboración de vinos según los entrevistados (período de 2000 al 2014)

Clasificación	Años[+]	Características
Muy buenos	2000 2002 2004 2011*	Maduraciones completas, con lluvias escasas durante la maduración. *se caracterizó por su gran déficit hídrico, que en algunos casos bloqueó la maduración final.
Buenos	2006 2009 2013*	*fue bueno para aquellos viñedos que no tuvieron daño por granizo
Neutros	2010	
Malos	2003* 2008[+]	*helada tardía en primavera que limitó brotación [+]lluvia al final del ciclo
Muy malos	2001 2005 2012* 2014	Todos estos años fueron caracterizados por lluvias durante la maduración, que conllevó a problemas sanitarios (pudriciones de uva) *ocurrencia de lluvias durante más de 10 días consecutivos

[+]Los productores y asesores no califican añadas anteriores al 2000, debido a que no lo recuerdan

Varios autores concuerdan con la importancia del clima en la clasificación de añadas. Jones y Davis (2000) analizan la relevancia que tiene la variabilidad interanual en el precio final del vino, por ej., en Bordeaux (Francia). En este estudio, el 62 % de la variabilidad total en el rating de calidad es explicado por cuatro variables climáticas (Nivel de insolación, Nº de días con T>30 ºC entre floración y envero, Nº de días con T>30 ºC en envero y precipitaciones durante la maduración). Baciocco et al. (2014) en la misma región, determinan al clima como un factor fundamental para diferenciar la calidad del vino, siendo la temperatura media máxima un importante discriminador de las añadas buenas y malas, tanto para los vinos blancos dulces como los tintos.

El análisis de la gestión del viñedo durante años "buenos" y "malos" ayuda a determinar las medidas de manejo relacionadas a los riesgos climáticos más que a otros riesgos (económico, marketing, social, etc.) (Belliveau et al. 2006). En la medida que un sistema vitícola es vulnerable a varios riesgos, los vinculados al CC podrán ser respondidos por los manejos que realizan los viticultores adaptándose a la variabilidad inter-anual del clima.

Percepción de la variabilidad local del clima, Vulnerabilidad y Adaptación

Los resultados de las entrevistas mostraron una percepción de los productores de la región a la variabilidad local del clima, pero sobre todo, a la variación anual (variabilidad inter-anual). Como se muestra además en el punto anterior, hubo coincidencias en las descripciones de "añadas", marcando los años buenos y malos según la calidad de uva obtenida y calidad de vino logrado. Otro agente que resaltó en las entrevistas, fueron los eventos extremos ocurridos en los últimos años (lluvias con fuertes rachas de viento, granizos), de los cuales el 71 % consideró un aumento en la frecuencia de fenómenos extremos.

Boissière et al. (2013) define las "percepciones locales" como la manera en que los productores identifican e interpretan las observaciones y conceptos. Si bien el CC puede aportar condiciones más allá de la experiencia previa, el conocimiento local y percepción permanece la fundación de cualquier respuesta local. En las entrevistas, la percepción del CC no fue consistente. A pesar de muchos conocer las informaciones de la comunidad científica sobre el CC en Uruguay, se encontró escepticismo en las respuestas hacia el CC en la región. La mayoría de los productores familiares fueron quienes aseguraban mayor percepción sobre todo con la VC, mientras que los productores más grandes se mostraron más escépticos a los impactos del CC. Según Yaro (2013) los productores pequeños exhiben una percepción de impacto local de los cambios observados porque los relacionan por ejemplo a la productividad, aunque los productores grandes sean quienes tengan un mejor entendimiento de la ciencia del CC.

De las entrevistas surge que existen amenazas externas climáticas en la región que afectan los componentes de la planta y que se traducen como riesgo al momento de producir uva para la elaboración del vino. Dichas amenazas climáticas fueron definidas como las determinantes de los "años malos" de la serie estudiada.

La fenología de la vid fue el componente de la planta más sensible (Figura 4 en matices más rojos), debido a que es conducida por el clima (Coombe 1995). Al afectar el desarrollo del cultivo, se afecta el rendimiento y también la composición final de la uva. Un claro ejemplo, es el efecto que causan las lluvias en verano. La

disponibilidad hídrica en la vid provoca un incremento en el desarrollo y crecimiento vegetativo (vigor). Para esa época, la producción de uva por planta ya está determinada, por lo que se genera una competencia entre el crecimiento y la acumulación de los productos de la fotosíntesis en la uva (fosa). La maduración de la uva se retrasa y puede trastocar la correcta acumulación y síntesis de compuestos primarios y secundarios. En adición, la mayor área foliar modifica el microclima en los racimos, provocando un posible aumento de la incidencia y/o severidad de enfermedades.

De las entrevistas surge que existen amenazas externas no climáticas que afectan los componentes de la planta tal como el costo de la mano de obra, los precios finales de la uva, las restricciones de comercialización de vino en stock en la bodega como la competitividad de determinado producto (muy recurrente en algún vino específico V.C.P.) que también provoca una mayor vulnerabilidad de los sistemas vitícolas estudiados. Existen varios trabajos que establecen que la vulnerabilidad de sistemas vitivinícolas es el resultado de factores climáticos y no climáticos (Belliveau et al. 2006; Hadarits et al. 2010; Pérez-Catalá 2013). Al igual que el caso nacional analizado, Füssel (2010) determina a estos agentes no climáticos, como factores externos al sistema que intervienen en la vulnerabilidad biofísica y social, es decir, actúan fuera de sus límites.

A partir de la matriz de vulnerabilidad, surgen medidas de adaptación de los viñedos que los propios asesores y productores del sur aplican en la región (Figura 5). Las medidas de adaptación son identificadas según el momento de acción (anticipadas o reactivas) y su duración (tácticas o estratégicas) (Belliveau et al. 2006; Neethling et al. 2016). Las medidas tácticas (colores claros en la Figura 5) son de corto plazo y responden a la variabilidad diaria del clima siendo algunas anticipatorias (Belliveau et al. 2006), como por ejemplo, irrigar el viñedo para disminuir el estrés térmico durante el verano y evitar el bloqueo de la maduración (Flexas et al. 2010) y otras reactivas, como aplicar Cianamida Hidrogenada para homogeneizar la brotación en situaciones de inviernos benignos (baja acumulación de horas de frío) (Martin y Dunn 2000).

Las medidas de adaptación estratégicas a largo plazo (medidas más oscuras en la matriz de la figura 5) pueden ser anticipadas como la elección de Porta-Injertos más resistentes a la asfixia radicular y por ende los excesos hídricos, por ejemplo (Koundouras et al. 2008) o elegir otros lugares de implantación, por ejemplo situaciones topográficas elevadas para evitar daños por heladas en aquellos lugares que son susceptibles a estos eventos. Tal como discuten Belliveau et al. (2006) la elección de variedades no está determinada solamente por el clima, por tanto no es una medida única de adaptación al CC, ya que su elección depende también de su competitividad en el mercado nacional y/o internacional.

Una medida estratégica reactiva, sucede cuando existe una oportunidad en determinado año, por ejemplo, cuando en un año "bueno" las finanzas permiten invertir en el sistema para disminuir riesgos (Belliveau et al. 2006). Ejemplos en la matriz de adaptación son el cambio de materiales del sistema de conducción (postes metálicos), que mejoran la resistencia a los vientos si anteriormente existían postes de hormigón. Otro ejemplo es la posibilidad de comprar un mejor equipo de aplicación de fitosanitario (atomizadora) para optimizar el uso de productos y por tanto, mejorar la sanidad del viñedo.

Las medidas de adaptación para disminuir la vulnerabilidad en la composición final de la uva, no son discriminadas según el tipo de metabolito (primario y secundario), debido a que no se encontraron medidas de respuesta específicas para compuestos básicos y polifenoles. La totalidad de los entrevistados citaron como medida esencial las tecnologías en bodega, que les permite modificar el mosto inicial en un vino de mayor calidad.

De las entrevistas surgió un elemento crucial en la disminución de la vulnerabilidad, y fue la distribución de viñedos en la región. Belliveau et al. (2006) destacan esta capacidad como una medida de adaptación como estrategia de disminución del riesgo que permite al vitivinicultor tener diversidad de uvas para obtener vinos de diferente calidad o para realizar cortes. El 67 % de los viticultores entrevistados poseen viñedos en localidades distintas dentro de la región y han sido contundentes en los beneficios para disminuir el riesgo. Los eventos climáticos extremos sufridos en la región han sido un claro ejemplo. El granizo de enero 2013 ha afectado varios

viñedos en la zona pero no perjudicó al 100 % de los viticultores debido a que los mismos también poseen viñedos en los cuales este evento no los afectó. También sucede con eventos como las lluvias, con gran variabilidad espacial, que puede afectar enormemente la calidad final de la uva si estas suceden cercanas al momento de madurez tecnológica.

A mediano y largo plazo, las medidas de adaptación refieren también a la sistematización de los viñedos, sobre todo a lo que implica a la selección de variedades y los objetivos productivos. En este sentido, los productores plantean no arriesgarse a producir una única variedad, ya que en condiciones adversas pueden perder toda la producción. Este ejemplo es típico para aquellos productores que producen Tannat como variedad tinta para VCP. Prefieren tener una parte de la superficie con otra variedad (por ej. Merlot) porque conocen el riesgo de perder la uva por pudriciones. Los productores que tienen una producción menos diversa, mono-varietal, plantean manejar cuadros de manera diferencial para disminuir el riesgo de perder volúmenes de uva dirigidas a un tipo de vino en particular. Al igual que la medida anterior, la diversificación de calidad de uva permite también disminuir los riesgos en la bodega.

Una forma de reducir la vulnerabilidad en los casos de baja capacidad adaptativa que no está contemplado en la matriz de adaptación, es el agrupamiento de productores. Un ejemplo de ello, son los grupos CREA, que el 73 % de los entrevistados forman parte. Esto les aporta el asesoramiento técnico, el intercambio de información y el acceso a maquinaria para utilizar en su predio. Esto último es relevante y cada día más utilizado en la región. Muchos productores se inquietan por el costo cada vez más elevado de la mano de obra y la falta de adaptación de sistemas de mecanización de sus viñedos, por ejemplo, por tener un sistema de conducción en dos planos (lira). Hacen hincapié en la necesidad de mejorar el sistema de manejo mecanizado para adoptarlo en los viñedos de manera adecuada y respetando los momentos de realización de actividades (por ejemplo, momento para el deshoje).

Variables de riesgo percibidas	Rendimiento	Fenología	Composición uva (componentes primarios)	Composición uva (componentes secundarios)	Sanidad - Presión de enfermedades y/o plagas
1. Aumento de eventos extremos como temporales con granizo	Pérdida directa por daño a la uva. Pérdida indirecta por disminución de área foliar	Atraso del ciclo por daño al área foliar, que genera otros puntos de crecimiento (feminelas)	Problemas en la correcta acumulación y síntesis de compuestos. Puede haber bajo contenido de sólidos solubles (SS)	Pérdida de aromas y color	Aumenta incidencia y severidad de enfermedades por rajado de granos
2. Disminución Horas de Frío	Disminuye la diferenciación reproductiva - Nº flores - Nº uvas	Heterogeneidad de la brotación	Heterogeneidad en la maduración		Sin referencias de vulnerabilidad
3. Aumento del Nº de días T>35º	Reduce el tamaño de granos por deshidratación	Puede adelantar y/o acortar los estados fenológicos y la maduración	Aumento SS. Pérdida de acidez. Estrés hídrico severo causa "bloqueo" de la maduración	Pérdida de antocianos	Sin referencias de vulnerabilidad
4. Aumento de la intensidad de lluvias durante todo el ciclo	El rendimiento puede disminuir por problemas de cuajado si ocurren lluvias en floración	Puede favorecer el crecimiento vegetativo y atrasar ciclos fenológicos. Lluvias en primavera afectan floración y cuajado	Dilución de SS. Desequilibrio de componentes primarios	Pérdida de aromas y color	Aumenta incidencia y severidad de enfermedades que afectan hojas y uvas
5. Aumento de lluvias de verano	El rendimiento puede aumentar por la hidratación de los frutos	Puede favorecer el crecimiento vegetativo y atrasar ciclos fenológicos, retrasa maduración	Dilución de SS. Desequilibrio de componentes primarios	Pérdida de aromas y color	Aumenta incidencia y severidad de enfermedades por rajado de granos

Nivel de consecuencias negativas

Menores

Medias

Grandes

Fig. 4 Matriz empírica de vulnerabilidad de los viñedos del sur de Uruguay según amenazas climáticas percibidas por los productores

Variables de riesgo percibidas	Rendimiento	Fenología	Composición uva (componentes primarios)	Composición uva (componentes secundarios)	Sanidad - Presión de enfermedades y/o plagas
1. Aumento de eventos extremos como temporales con granizo	Evitar el manejo en verde (deshojado) severo que no afecte la carga	Evitar el manejo en verde (deshojado) severo	Gestión de la vinificación por ejemplo, chaptalizar en el caso de que las uvas no alcancen su correcta maduración		Adaptar el manejo de enfermedades en forma preventiva para disminuir la presión sanitaria
	Producir uva en viñedos de diferentes localidades en la región para disminuir riesgos				
2. Disminución Horas de Frío	Uso de químicos para adelantar/homgeneizar brotación y aumentar el Nº de brotes por planta	Momento de poda. Uso de químicos para adelantar/homogeneizar brotación	Gestión de la vinificación por ejemplo, chaptalizar en el caso de que las uvas no alcancen su correcta maduración		Adaptar el manejo de enfermedades en forma preventiva para disminuir la presión sanitaria
3. Aumento del Nº de días T>35º	Manejo en verde (deshojadoy roñado) para bajar área foliar	Manejo en verde (deshojado)	Cosecha por la noche para evitar degradación de compuestos y gestión de la vinificación. Mejorar el sistema de transporte hasta la bodega		Adaptar el manejo de fitosanitarios evitando las horas de T extremas para los tratamientos
	Implantar viñedos cerca del mar con temperaturas más templadas				
4. Aumento de la intensidad de lluvias durante todo el ciclo	Raleo y deshojados para favorecer una buena maduración por disminución de fuerza fosa	Cambio de porta-injertos menos sensibles a asfixia radicular o menos vigorosos	Favorecer un gran desarrollo de área foliar para una mejor maduración		Adaptar el manejo de enfermedades en forma preventiva para disminuir el Nº de tratamientos y presión sanitaria
	Producir uva en viñedos de diferentes localidades en la región para diversificar en tipo de suelos y su profundidad. Puede disminuir riesgo por la alta variabilidad espacial de la lluvia				
5. Aumento de lluvias de verano	Raleo para favorecer una buena maduración por disminución de fuerza fosa	Cambio de porta-injertos menos sensibles a asfixia radicular. Cambiar a variedades de maduración temprana, para evitar lluvias de principio de marzo	Gestión de la vinificación por ejemplo, chaptalizar en el caso de que las uvas no alcancen su correcta maduración		Adaptar el manejo de enfermedades en forma preventiva para disminuir la presión sanitaria
	Producir uva en viñedos de diferentes localidades en la región ya que se puede disminuir riesgo por la alta variabilidad espacial de la lluvia				

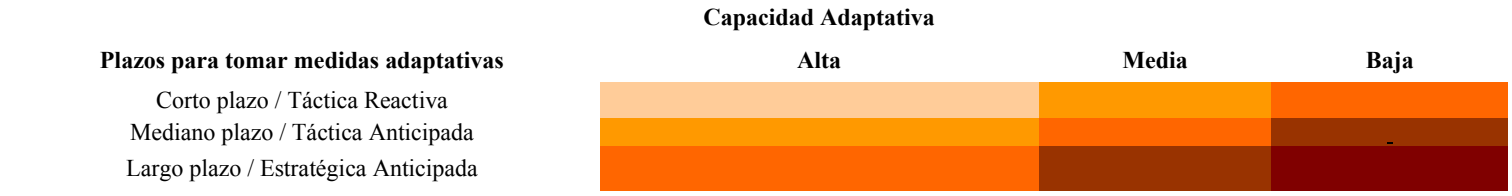


Fig. 5 Matriz empírica de adaptación de los viñedos del sur de Uruguay

5.6. CONCLUSIONES

Los productores vitícolas del sur de Uruguay tienen determinados criterios para tomar decisiones en la gestión del viñedo que es parte del conocimiento local. Estos criterios se ha visto que cambian con el pasar de los años, debido a la necesidad de modificar la calidad de la uva lograda, el control de equilibrio de la planta, atención a las exigencias del consumidor para obtener un vino con determinadas características y hasta la mano de obra disponible puede jugar al momento de decidir deshojar un viñedo. Sin embargo, el clima pocas veces logra ser percibido como un factor en la toma de decisiones durante el ciclo de la viña y en menor medida en las decisiones a mediano plazo, como por ejemplo, la elección de una variedad a implantar. A pesar de ello, los productores conocen la variabilidad inter-anual del clima, como también el rol del clima como determinante de la calidad del vino en años particulares.

La percepción al CC es débil entre los productores, quienes asumen que el mismo es algo futuro y a largo plazo. Sin embargo, siendo sensibles a la variabilidad interanual del clima, muchos de ellos no identifican esta variabilidad en el contexto de CC. Esto se puede deber a que hay poca difusión local de impactos en la región (aumento de variabilidad, los fenómenos ENSO, etc.) y si a nivel internacional (Hemisferio Norte), de aumento de la temperatura, sequías más extremas y prolongadas.

La metodología de matrices, permite obtener respuestas claras y concisas de adaptación dirigidas a amenazas puntuales que sufre la región y son percibidas por los actores como riesgo para producir uva de calidad. Las medidas de adaptación tácticas a corto plazo refieren al equilibrio fuente/fosa de la planta para lograr una composición final de la uva adecuada para la elaboración de vinos finos. Las medidas de adaptación estratégicas a mediano y largo plazo, refieren a la sistematización de los viñedos, selección de variedades y porta-injertos y ubicación de los viñedos en diferentes agro-ecosistemas dentro de la misma región.

Este trabajo aporta herramientas prácticas de manejo dirigidas a amenazas climáticas que son percibidas por los actores de la región. Este conocimiento puede ser de gran valor para los decisores de políticas públicas de adaptación al cambio climático en la región.

Agradecimientos: a cada uno de los viticultores y asesores que participaron de las entrevistas, por brindarnos su desinteresada opinión, su experiencia y su valioso tiempo.

5.7. BIBLIOGRAFÍA

Baciocco KA, Davis RE, Jones GV (2014) Climate and Bordeaux wine quality: Identifying the key factors that differenciate vintages based on consensus rankings. J Wine Res 25:75-90

Baló B, Mustárdy LA, Hideg É, Faludi-Daniel Á (1986) Studies on the effect of chilling on the photosynthesis of grapevine. Vitis 25:1-7

Barbeau C, Barbeau G, Joannon A (2014) Analyzing the sensitivity of viticultural practices to weather variability in a climate change perspective. An application to workable-days modelling. J Int Scien Vigne Vin 48:141-152

Battaglini A, Barbeau G, Bindi M, (2009) European winegrowers' perception to climate change impact and options for adaptation. Reg Env Change 9:61-73

Belliveau S, Smit B, Bradshaw B (2006) Multiple exposures and dynamic vulnerability: Evidence from the grape industry in the Okanagan Valley, Canada. Global Env Change 16:364-378

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. Am J Enol Vitic 52:1-7

Boissière M, Locatelli B, Sheil D, Padmanaba M, Sadjudin E (2013) Local perceptions of climate variability and change in Tropical Fortests of Papua, Indonesia. Ecol Soc 18:13

Champagnol F (1984) Eléments de physiologie de la vigne et viticulture générale. Imp. Dehan, Montpellier

Chuine I, Yiou P, Viovy N, Seguin B, Daux V, Le Roy-Ladurie E (2004) Historical phenology: Grape ripening as a plast climate indicator. Nature 432:289-290

Coombe BG (1995) Growth stages of the grapevine. Aust J Grape Wine Res 1:100-110

Cobon DH, Stone GS, Carter JO, Scanlan JC, Toombs NR, Zhang X, Willcocks J, McKeon GM (2009) The climate change risk management matrix for the grazing industry of northern Australia. Rangeland J 31:31-49

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'écophysiologie des systèmes de conduite Espalier et Lyre sur Merlot. PhD Thesis, École Nationale Supérieure Agronomique Université de Montpellier II, France

Flexas J, Galmés J, Gallé A, Gulías J, Pou A, Ribas-carbo M, Tomàs M, Medrano H (2010) Improving water use efficiency in grapevines: potential physiological targets for iotechnological improvement. Australian Journal of Grape and Wine Research 16:106–121

Füssel HM (2010) Review and quantitative analysis of indices of climate change exposure, adaptive capacity, sensitivity and impacts. Backgroundnote to the World Development Report 2010. Development and climate change. In: http://siteresources.worldbank.org/INTWDR2010/Resources/5287678-255547194560/WDR2010_BG_Note_Fussel.pdf

Goto-Yakamoto N, Mori K, Numata M, Koyama K, Kitiyama M (2011) Effects of temperature and water regimes on flavonoid contents and composition on the skin of red-wine grapes. J Int Sci Vigne Vin Special Issue:75-80

Goulet E, Morlat R (2011) The use of surveys among wine growers in vineyards of the middle-Loire Valley (France), in relation to terrois studies. Land Use Policy 28:770-782

Grothmann T, Pratt A (2005) Adaptive capacity and human cognition: The process of individual adaptation to climate change. Global Env Change 15:199-213

Hadarits M, Smit B, Diaz H (2010) Adaptation in viticulture: A case study of producers in the Maule region of Chile. J Wine Res 21:167–178

Hunter JJ, Bonnardot V (2011) Suitability of some climatic parameters for grapevine cultivation in South Africa, with focus on key physiological processes. S Afr J Enol Vitic 32:137–154

INAVI (2016) Instituto Nacional de Vitivinicultura. In: www.inavi.com.uy (visited 7th juin 2016).

INIA (2016) Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Registros climáticos del portal GRAS de la estación de Las brujas. In: http://www.inia.uy/investigaci%C3%B3n-e-innovaci%C3%B3n/unidades/GRAS/Clima/Banco-datos-agroclimatico (visited 20th april 2016).

IPCC (2007) Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press

Jackson RS (2008) Wine science: principles and applications, 3rd edn. Academic Press, New York

Jones G, Davis R (2000) Using a synoptic climatological approach to understand climate–viticulture relationships. Int J Climatol 20:813–837

Kelly PM, Adger WN (2000) Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation. Clim Change 47:325–352

Koundouras S, Tsialtas IT, Zioziou E, Nikolaou N (2008) Rootstock effects on the adaptive strategies of grapevine (Vitis vinifera L. cv. Cabernet-Sauvignon) under contrasting water status: leaf physiological and structural responses. Agric Ecosys Environ 128:86–96. doi: 10.1016/j.agee.2008.05.006

Lereboullet A, Beltrando G, Bardsley DK (2013) "Socio-ecological adaptation to climate change: A comparative case study from the Mediterranean wine industry in France and Australia". Agric Ecosys Environ 163:273-285

Martin SR, Dunn GM (2000) Effect of pruning time and hydrogen cyanamide on budburst and subsequent phenology of *Vitis vinifera* L. variety Cabernet Sauvignon in central Victoria. Aust J Grape Wine Res 6:31-39

MGAP-FAO (2013) Clima de cambios: Nuevos desafíos de adaptación en Uruguay. Astigarraga, L.; Picasso, V.; Ferrer, M.; Mondelli, M.; Cruz, G.; Camussi, G.; Fourment, M.; Varela, V.; Pereyra, G.; Taks, J.; Contreras, S.; Cobas, P. Resultados del proyecto FAO/TCP/URU 3302, Montevideo, Uruguay

Neethling E, Petitjean T, Quénol H, Barbeau G (2016) Assessing local climate vulnerability and winegrowers' adaptive process in the context of climate change. Mitig Adapt Strat Gl 1-27

Pérez-Catalá A (2013) Viticulture under climate change: understanding vulnerability and adaptive capacity of wineries and growers. A case study in *El Penedès* region, Catalonia. PhD Thesis Universitat Autònoma de Barcelona

Quénol H, Bonnardot V (2014) A multi-scale climatic analysis of viticultural terroirs in the context of climate change: the "TERADCLIM" project. Int J Vine Wine Sci 23-32

Sadras VO, Reynolds MP, de la Vega AJ, Petrie PR, Robinson R (2009) Phenotypic plasticity of yield and phenology in wheat, sunflower and grapevine. Field Crops Res 110:242–250

Schultz H (2000) Climate change and viticulture: An European perspective on climatology, carbon dyoxide, and UV-B effects. Aust J Grape Wine Res 6:2-12

Spayd ES, Tarara JM, Mee DL, Ferguson JC (2002) Separation of sunlight and temperature effects on the composition of *Vitis vinifera* cv. Merlot berries. Am J Enol Vitic 53:171-182

van Leeuwen C, Vivin P (2008) Alimentation hydrique de la vigne et la qualité des raisins. Innovations Agronomiques 2:159-167

van Leeuwen C, Schultz HR, García de Cortázar-Atauri I, Duchêne E, Ollat N, Pieri P, Bois B, Goutouly JP, Quénol H, Touzard JM, Malheiro AC, Bavaresco L, Delrot S (2013) Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine-producing areas by 2050. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America 110 (33). doi: 10.1073/pnas.1307927110

Yaro JA (2013) The perception of and adaptation to climate variability/change in Ghana by small-scale and comercial farmers. Reg Environ Change 13:1259-127

6. CONCLUSIONES GENERALES Y PERSPECTIVAS

A partir de la confirmación del cambio climático (CC) por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), los estudios a nivel científico de los impactos actuales y futuros sobre la agricultura han tomado gran relevancia, así como aquellos que determinan las medidas de adaptación de los cultivos. Dichas medidas surgen del análisis de riesgo que actualmente enfrentan los sistemas de producción, es decir de su propia vulnerabilidad entendida como la sumatoria de la exposición física, la sensibilidad del cultivo y la capacidad adaptativa aportada por el productor (IPCC, 2007). Este estudio tuvo por objetivo definir la variabilidad del clima actual de los viñedos de la región costera del Sur de Uruguay, evaluar los posibles impactos en la vid, y aportar respuestas para la adaptación a las consecuencias del cambio climático.

La tesis contribuye al conocimiento de la principal región vitícola del país.

La influencia que tiene el Río de la Plata en el clima local y su impacto en las vides de Tannat podría ser aplicada como estrategia país, al posicionar el efecto de la brisa en nuestros vinos. La variabilidad espacial de la temperatura está definida por la influencia del Río de la Plata en la zona, la exposición al río por la topografía y la distancia al mar como determinante del comportamiento térmico en la región. A una escala más fina, el fenómeno de la penetración de la brisa marina y su efecto en la evolución térmica durante el día afecta la fisiología de la planta. Es por tanto el Río de la Plata uno de los componentes principales de la región vitícola principal de Uruguay.

La variedad Tannat, *cépage* emblemático de nuestro país, es considerado como adaptado a las condiciones locales de plantación. Su comportamiento en esta región costera es el resultado de múltiples factores, además de la variabilidad local de la temperatura. La sensibilidad que muestran las plantas (medidas indirectamente) a las diferentes temperaturas no parece ser tan evidente, como que al aumentar la

continentalidad las plantas son más precoces o tienen mayor concentración de azúcares.

Al analizar diez viñedos de Tannat en cuatro estados fenológicos (floración, cuajado, cierre de racimo y envero), se constata que la variabilidad espacial de la temperatura puede no ser suficiente para que influya en el comportamiento fenológico. Los porta-injertos utilizados y la gestión de los viñedos comerciales, puede estar contrarrestando el efecto térmico. En forma inversa, estas diferencias de temperatura se correlacionan con los metabolitos secundarios de la uva en cosecha (antocianos y fenoles). La sensibilidad de la vid a la temperatura, explicada en este caso sobre la composición, fue distinta en los tres años de estudio y se vincula a las condiciones climáticas generales durante la maduración (térmicas e hídricas).

La evaluación de percepción y adaptación del estudio aporta una perspectiva complementaria al análisis agronómico y climático. Los principales actores de la región (viticultores y asesores) conocen la variabilidad local del clima y la variabilidad interanual. Tienen identificados claramente aquellos aspectos del clima que son desfavorables para producir uvas de calidad para la elaboración de vino fino. Sin embargo de manera general, el clima no parece tener un rol preponderante en la toma de decisiones. De una manera menos consciente, el clima (y sobre todo las precipitaciones) juega un rol fundamental en la gestión del viñedo por parte del productor. Desde su óptica, la vulnerabilidad de sus viñedos tiene un componente socio-económico que hasta podría ser superior al climático.

La evolución de las prácticas vitícolas en los últimos 20 años, descriptas por los productores, permite identificar el conocimiento local como punto de partida para aportar medidas de adaptación a la variabilidad del clima en la región. Las estrategias más recurrentes en las entrevistas son a corto plazo, el control de enfermedades, clave en situaciones de lluvia. A mediano plazo el manejo en verde de la planta para lograr un adecuado equilibrio en cada sistema productivo, parece ayudar a mejorar el impacto del clima (exceso de vigor o debilitamiento por mucha carga), mientras que

a largo plazo, varios productores analizan la distribución de sus viñedos dentro de la región para disminuir el riesgo de eventos extremos.

La tesis aporta una metodología de estudio interdisciplinaria.

La metodología aplicada en este estudio permitió englobar los tres pilares de la vulnerabilidad de los sistemas productivos: el clima local, su impacto en un cultivo perenne y la capacidad adaptativa de los productores. Esta metodología interdisciplinaria permitió tener una visión global del sistema vitícola de la región.

El *terroir* y la vid son sistemas complejos que son afectados por una multitud de factores, algunos cuantificables y otros no. Nuestro estudio, intentó mostrar la variabilidad que existe en una región (del clima, de la producción, de la calidad) pero los resultados son el producto de este sinnúmero de atributos que están influenciando al sistema (tipo de suelo, capacidad de retención de agua, porta-injerto, clon de la variedad, manejo de suelo, manejo fitosanitario, etc). Es por ello, que los resultados son la "foto" del viñedo que trabaja el viticultor bajo las condiciones naturales de explotación.

A partir de este estudio, surgen varias perspectivas de investigación.

Sobre el clima, sería importante continuar con los estudios de meso-escala, ya que permiten conocer la variabilidad del clima existente dentro de la región.

La modelización de la brisa marina a escala fina sería un enfoque necesario para poder comprender otros factores que explican las temperaturas observadas. De esta manera, se puede asociar la brisa con el tipo de situación sinóptica o tipo de clima. Un ejemplo podría ser el impacto de los fenómenos ENSO en la frecuencia de aparición de brisas del Río de la Plata.
El estudio de la variabilidad espacial y temporal de la lluvia es necesario, ya que se asocia fuertemente al tipo de vino que se elabora cada año. Conocer la variabilidad

espacial de la lluvia a meso-escala podría determinar patrones de distribución, que hasta podrían afectar el desarrollo del cultivo en determinadas localidades del país.
El estudio de la variabilidad espacial y temporal de otros componentes del clima que se observó que son característicos de la región y que también podrían estar afectando el crecimiento y desarrollo de la vid, como el viento, la humedad relativa, la heliofanía.
También podría aplicarse la modelización del clima a meso-escala para conocer los escenarios climáticos futuros. En la región hay conocimiento de las perspectivas climáticas a macro-escala (con mayor o menor incertidumbre), pero en la región costera del sur de Uruguay como en el resto del país a escala más fina, los escenarios climáticos futuros podrían ser diferentes a los analizados a una escala mayor.

Sobre los impactos del clima en el cultivo, es importante profundizar en el análisis de los sistemas vitícolas en la región.

Las técnicas de cultivo que pueden acentuar o apaciguar las condiciones locales del clima sería un aporte para la región. Por ejemplo, evaluar la gestión del viñedo para modificar el micro-clima en los viñedos cercanos a la costa. En estos casos, la alta humedad relativa constante impacta sobre la sanidad, afectando la calidad y cantidad final de la uva en cosecha.
También resulta evidente la necesidad del estudio de otras variedades en la misma región, por ejemplo, aquellas de uvas blancas, en las cuales el impacto de la brisa marina pueda favorecer la calidad final de la uva al disminuir la temperatura máxima diurna. En la misma línea, la evaluación de materiales genéticamente modificados (variedades resistentes y tolerantes a enfermedades) en el país puede ayudar a adaptar la viticultura a condiciones más húmedas y por tanto, de mayor presión sanitaria.
Los resultados actuales del comportamiento de la vid a la diversidad climática de una zona, ya nos aporta el conocimiento de lo que será el cultivo en un futuro. Sin embargo, debemos conocer que será de todo el sistema en el futuro próximo. La

evolución y diversidad de enfermedades y plagas que afectan el cultivo, pueden también modificar las posibles respuestas de adaptación.

El análisis del impacto de los eventos extremos en la vid puede también contribuir al entendimiento de la fisiología de la planta y por lo tanto a las medidas de adaptación al CC. El ejemplo del granizo de enero de 2013 que azotó parte de los viñedos en estudio, fue un ejemplo del impacto que pueden causar estos fenómenos. Cuantificar los niveles de daño y la respuesta de la planta en los años sucesivos (perennidad), pueden ser importantes en la medida que las perspectivas climáticas futuras también citan el aumento de frecuencia de estos eventos.

El estudio de modelos de cultivo resulta interesante en el sentido que permite separar los efectos ambientales (aislar el efecto del clima, por ejemplo). Esto permitiría aportar medidas de adaptación de la vid, por ejemplo, al evaluar el riesgo del cultivo bajo las proyecciones climáticas futuras para la región. Sin embargo en Uruguay no hay antecedentes de estudios con modelos en viticultura, por lo que se necesita su validación para las condiciones locales.

Acerca la percepción y capacidad adaptativa de los viticultores, sería interesante la comparación de los actores del sector en diferentes regiones vitícolas del mundo. El análisis de matrices podría desarrollarse en otras regiones y así ser comparado, por ejemplo, entre países vitícolas tradicionales (Francia, España, Italia) y los no tradicionales como los del Hemisferio Sur. Esto podría aportar un enfoque antropológico sobre las diferencias de conocimiento local, como por ejemplo, al sistematizar las medidas de manejo que realizan productores de diferente origen frente a determinada situación climática.

La metodología aplicada en este estudio podría ser utilizada en otros cultivos perennes, como por ejemplo, frutales de hoja caduca. Observar y cuantificar el impacto de las variaciones espaciales de la temperatura (y/u otros componentes del clima) sobre la fenología y la calidad de la fruta pueden también contribuir al análisis de respuestas de adaptación al cambio y variabilidad climática.

Este trabajo que propone algunas respuestas de adaptación a la variabilidad local del clima aportadas directamente de la experiencia local, lleva a la reflexión sobre las políticas públicas de adaptación al cambio climático a mediano y largo plazo. Este estudio que muestra el riesgo productivo y social de la viticultura en Uruguay podría ser tomado en cuenta como punto de partida para un estudio más global de toma de decisiones de políticas públicas.

Si bien los impactos del cambio climático en la vid son globales, no se presentan de la misma manera en cada región vitícola. Es por ello, que podría ser interesante la implementación de una red internacional de estudios de vulnerabilidad y adaptación de la vid a meso-escala, para poder comparar y discutir las medidas de adaptación al CC. Esta red podría uniformizar la información generada de estudios científicos, sensibilizar a los actores del sector sobre la vulnerabilidad de los sistemas vitícolas frente al CC, planificar correctamente la distribución de los viñedos y el manejo del cultivo de una manera sustentable.

7. BIBLIOGRAFÍA

Anderson JD, Jones GV, Tait A, Hall A, Trought MCT. 2012. Analysis of viticulture region climate structure and suitability in New Zealand. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 46: 149-165.

Baciocco KA, Davis RE, Jones GV. 2014. Climate and Bordeaux wine quality: identifying the key factors that differentiate vintages based on consensus rankings. Journal of Wine Research, 25: 75-90.

Baló B, Mustárdy LA, Hideg É, Faludi-Daniel Á. 1986. Studies on the effect of chilling on the photosynthesis of grapevine. Vitis, 25: 1-7.

Barbeau C, Barbeau G, Joannon A. 2014. Analyzing the sensitivity of viticultural practices to weather variability in a climate change perspective. An application to workable-days modelling. Journal Internationale des Sciences de la Vigne et du Vin, 48: 141-152.

Barbeau G, Blin A. 2010. Influence du porte-greffe sur le comportement agronomique de la vigne (var. Cabernet franc) en moyenne vallée de la Loire. Techniloire, 15 p. En: http://www.techniloire.com/documents/124963587/Essai%20porte-greffe%20CF_vf.pdf (última visita el 20/05/2016).

Barbeau G. 2008. Influence du fonctionnement de la vigne sur la qualité du vin. Proceedings of VI Foro Mundial del Vino. Logroño, España. 24 abril 2008.

Barnuud NN, Zerihun A, Gibberd M, Bates B. 2014. Berry composition and climate: responses and empirical models. International Journal of Biometeorology, 58: 1207-1223.

Battaglini A, Barbeau G, Bindi M. 2009. European winegrowers' perception to climate change impact and options for adaptation. Regional Environmental Change, 9: 61-73.

Belliveau S, Smit B, Bradshaw B. 2006. Multiple exposures and dynamic vulnerability: Evidence from the grape industry in the Okanagan Valley, Canada. Global Environmental Change, 16: 364-378.

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.

Berri G, Sraibman L, Tanco RA, Bertossa G. 2010. Low-level wind field climatology over the La Plata River region obtained with a mesoscale atmospheric boundary layer model forced with local weather observations. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 49: 1293-1305.

Bettiga LJ, Dokoozlian N, Williams LE. 1996. Windbreaks improve the growth and yield of Chardonnay grapevines grown in a cool climate. In: Proceedings of the Fourth International Symposium on Cool Climate Viticulture and Enology, Rochester, New York. 16 al 20 de Julio de 1996.

Blanco-Ward D, García Quejeiro JM, Jones GV. 2007. Spatial climate variability and viticulture in the Miño River Valley of Spain. Vitis, 46: 63-70.

Boissière M, Locatelli B, Sheil D, Padmanaba M, Sadjudin E. 2013. Local perceptions of climate variability and change in Tropical Fortests of Papua, Indonesia. Ecology and Society, 18(4): 13.

Bonada M, Sadras VO. 2015. Review: critical appraisal of methods to investigate the effect of temperature on grapevine berry composition. Australian Journal of Grape and Wine Research, 21: 1-17.

Bonfanti D. 2010. "(Des) Estructurando las regiones vitivinícolas. Un examen comparativo del proceso de formación de las áreas vitivinícolas en la región austral (1870-1930)". En: Beretta Curi, A. (Coord.) *La vitivinicultura uruguaya en la región (1870-2000). Una introducción a estudios y problemas*. Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación. Montevideo, Uruguay, pp. 21-52.

Bonnardot V, Carey V, Cautenet S, Madelin M, Coetzee Z, Quénol H. 2014. Changement climatique et variabilité spatiale des températures à fine échelle dans les vignobles de Stellenbosch (Afrique du Sud). En: Changement climatique et terroirs viticoles. Paris, Francia. Lavoisier, pp 247-266.

Bonnardot V, Carey V, Madelin M, Cautenet S, Coetzee Z, Quénol 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: 1-13.

Bonnardot V, Planchon O, Cautenet S. 2005. The sea breeze development under an offshore synoptic wind in the South Western Cape and implications for the Stellenbosch wine producing area. Theoretical and Applied Climatology, 81: 203-218.

Bonnardot V, Planchon O, Carey VA, Cautenet S. 2002. Diurnal wind, relative humidity and temperature variation in the Stellenbosch-Groot Drakenstein winegrowing area. South African Journal of Enology and Viticulture, 23(2): 62-71.

Bonnefoy C, Neethling E, Sicard S, Barbeau G, Bonnardot V, Planchon O, Madelin M, Quénol H. 2014. Approche régionale des climats des terroirs viticoles du Val de Loire. En: Quénol, H. 2014. Changement climatique et terroirs viticoles. Paris, Francia. Lavoisier, pp. 161-188.

Bonnefoy C, Quénol H, Bonnardot V, Barbeau G, Madelin M, Planchon O, Neethling E. 2013. Temporal and Spatial Analyses of Temperature in a French Wine-Producing Area: the Loire Valley. International Journal of Climatology, 33(8): 1849-1862.

Borne K, Chen D, Nunez M, 1998. A method for finding sea breeze days under stable synoptic conditions and its application to the Swedish west coast. International Journal of Climatology, 18: 901-914.

Caffarra A, Eccel E. 2011. Porjecting the impacts of climate change on the phenology of grapevine in a mountain area. Australian Journal of Grape and Wine Research, 17: 52-61.

Caffarra A, Eccel E. 2009. Increasing the robustness of phenological models for *Vitis vinifera* cv Chardonnay. International Journal of Biometeorology 54: 255–267.

Calame F, Rochaix M, Simon JL. 1977. Observations phénologiques et mesures bioclimatiques dans plusieurs sites valaisans à différentes altitudes en vue de la délimitation de l'aire viticole. Bulletin OIV, pp. 601-616.

Calò A, Tomasi D, Costacurta A, Biscaro S, Aldighieri R. 1994. The effect of temperature thresholds on grapevine (*Vitis* sp.) bloom: An interpretive model. Rivista di Viticoltora e di Enologia, 1: 3-14.

Campbell-Clause JM. 1998. Stomatal response of grapevines to wind. Australian Journal of Experimental Agriculture, 38: 77-82.

Carbonneau A. 2004. Climat du vignoble et raisonnement de l'irrigation et de la conduite. Bordeaux, Francia. Mondiaviti, pp. 109-126.

Carbonneau A. 1995. La surface foliaire exposée – guide pour sa mesure. Le Progrès Agricole Viticole, 9: 204-212.

Carbonneau A, Moueix A, Leclair N, Renoux J. 1991. Proposition d'une mèthode de prélèvement de raisin à partir de l'analyse de l'hétérogenité de maturation sur un cep. Bulletin OIV, 64: 679-690.

Carey VA, Bonnardot V, Schmidt A, Theron JCD. 2003. The interaction between vintage, vineyard site (mesoclimate) and wine aroma of Vitis vinifera L. cvs. Sauvignon blanc, Chardonnay and Cabernet Sauvignon in the Stellenbosch-Klein Drakenstein wine producing area. Bulletin OIV, 76: 4-29.

Carey VA, Archer E, Saayman D. 2002. Natural terroir units: What are they? How can they help the wine farmer? South African Wineland magazine, 151: 86-88.

Castellarin SD, Pfeiffer A, Sivilotti P, Degan M, Peterlunger E, Di Gaspero G. 2007. Transcriptional regulation of anthocyanin biosynthesis in ripening fruits of grapevine under seasonal water deficit. Plant, Cell and Environment, 30: 1381-1399.

Cautenet S, Rosset R. 1989. Numerical simulation of sea breezes with vertical wind shear during dry season at Cape of Three Points, West Africa. Monthly Weather Review, 117: 329-339.

Cautenet S. 1988. Interaction d'une circulation méso-échelle de brise de mer avec un cisaillement de vent synoptique. Application au golfe de Guinée. Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 204p.

Champagnol F. 1984. Eléments de physiologie de la vigne et viticulture générale. Imp. Dehan, Montpellier, 351p.

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. 1995. Adopting of a system for identifying grapevine growth stages. Australian Journal of Grape and Wine Research, 1: 100-110.

Coombe BG. 1987. Influence of temperature on composition and quality of grapes. Acta Horticulturae, 206: 23-36.

Cobon DH, Stone GS, Carter JO, Scanlan JC, Toombs NR, Zhang X, Willcocks J, McKeon GM. 2009. The climate change risk management matrix for the grazing industry of northern Australia. The rangeland Journal, 31: 31-49.

CPTEC 2013. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. En: http://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/20981 (última visita el 23 enero 2014).

Cuccia C, Bois B, Richard Y, Parker AK, Gracía de Cortázar-Atauri I, van Leeuwen C, Castel T. 2015. Phenological model performance to warmer conditions: application to Pinot Noir in Burgundy. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 48: 169-178.

Deloire A, Vaudour E, Carey VA, Bonnardot V, van Leeuwen C. 2005. Grapevine responses to terroir: a global approach. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 39(4): 149-162.

Duchêne E, Schneider C. 2005. Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. Agronomy of Sustainable Developement, 25: 93–99.

Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, González L, Tablada M, Robledo CW. 2012. InfoStat versión 2012. Grupo InfoStat. Córdoba, Argentina. FCA, Universidad Nacional de Córdoba.

Estoque MA. 1962. The sea breeze as a function of the prevailing synoptic situation. Journal of the Atmospheric Sciences, 19: 244-250.

Falcao LD, Burin VM, Sidinei-Chaves E, Vieira HJ, Brighenti E, Rosier JP, Bordignon-Luiz MT. 2010. Vineyard altitude and mesoclimate influences on the phenology and maturation of Cabernet-sauvignon grapes from Santa Catarina State. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, 44(3): 135-150.

FAO. 2011. Proyecto TCP/URU/3302 Fase 1: Adaptación a la variabilidad climática. Informe final. SARAS. Montevideo, Uruguay. FAO publicaciones. 125p.

Ferrer M, González-Néves G, Echeverría G, Camussi G. 2012. Plant Response and Grape Composition of Vitis vinifera L. cv Tannat in Different Climatic Regions. Journal of Agricultural Science and Technology 2: 1252-1261.

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'écophysiologie des systèmes de conduite Espalier et Lyre sur Merlot ». Tesis de doctorado. Montpellier, Francia. École Nationale Supérieure Agronomique, Université de Montpellier II. 385p.

Ferrer M, Pedocchi R, Michelazzo M, González-Néves G, Carbonneau A. 2007. 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: 47-56.

Flexas J, Galmés J, Gallé A, Gulías J, Pou A, Ribas-carbo M, Tomàs M, Medrano H. 2010. Improving water use efficiency in grapevines: potential physiological targets for iotechnological improvement. Australian Journal of Grape and Wine Research, 16: 106–121.

Fourment M, Bonnardot V, Planchon O, Ferrer M, Quénol H. 2014. Circulation atmosphérique locale et impacts thermiques dans un vignoble côtier : observations dans le sud de l'Uruguay. Climatologie, 11: 47-64.

Fourment M, Ferrer M, González-Néves G, Barbeau G, Bonnardot V, Quénol H. 2013. Spatial variability of temperature and grape berry compostion at terroir scale in Uruguay. En: Proceedings of 18th International Simposium GiESCO. Porto, Portugal. 7 al 11 de Julio de 2013.

Fourment M, Ferrer M, Quénol H. 2013. *Vitis vinifera* L cv. Tannat : respuesta del cultivo frente a la variabilidad climática. Agrociencia Uruguay, 17(2): 33-44.

Fraga H, Santos JA, Moutinho-Pereira J, Carlos C, Silvestre J, Eiras-Dias J, Mota T, Malheiro AC. 2015. Statistical modelling of grapevine phenology in Portguese wine regions: observed trends and climate change projections. Journal of Agricultural Science, 1-17.

Freeman BM, Kliewer WM, Stern P. 1982. Influence of windbreaks and climatic region on diurnal fluctuation of leaf water potential, stomatal conductance, and leaf temperature of grapevines. American Journal of Enology and Viticulture, 33(4): 233-236.

Füssel HM. 2010. Review and quantitative analysis of indices of climate change exposure, adaptive capacity, sensitivity and impacts. Backgroundnote to the World Development Report 2010. Development and climate change. En: http://danida.vnu.edu.vn/cpis/files/References/Vulnerability/REVIEW%20AND%20QUANTITATIVE%20ANALYSIS%20OF%20INDICES%20OF%20CLIMATE%20CHANGE%20EXPOSURE,%20ADAPTIVE%20CAPACITY,%20SENSITIVITY,%20AND%20IMPACTS.pdf (última visita el 26 de mayo de 2016)

García de Cortázar-Atauri I, Brisson N, Gaudilliere JP. 2009. Performance of several models for predicting budburst date of grapevine (*Vitis vinifera* L.). International Journal of Biometeorology, 53: 317–326.

García de Cortázar-Atauri I. 2006. Adaptation du modèle STICS à la vigne (*Vitis vinifera* L.). Utilisation dans le cadre d'une étude d'impact sur le changement

climatique à l'échelle de la France. Tesis de doctorado, École Nationale Supérieure Agronomique, Université de Montpellier II, Francia. 349p.

Gladstones J. 1992. *Viticulture and environment*. Adelaïde, Australia. Winetitles, 310p.

Glories Y, Augustin M. 1993. Maturité phénolique du raisin, conséquences technologiques: application aux millésimes 1991 et 1992. En: Proceedings of the Compte Rendu Colloque Journée Techn. CIVB, Bordeaux, France, pp 56-61.

González-Néves G, Ferrer M, Gil G, Charamelo D, Balado J, Barreiro L, Bochicchio R, Gatto G, Tessore A. 2010. Estudio plurianual del potencial polifenólico de uvas Tannat. Agrociencia Uruguay, 14: 10-21.

González-Néves 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 Uruguay, 10(2): 1-14.

Goto-Yakamoto N, Mori K, Numata M, Koyama K, Kitiyama M. 2011. Effects of temperature and water regimes on flavonoid contents and composition on the skin of red-wine grapes. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, Special Issue, 75-80.

Goto-Yamamoto N, Mori K, Numata M, Koyama K, Kitayama M. 2009. Effects of temperature and water regimes on flavonoid contents and composition in the skin of red-wine grapes. Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, special issue Macrowine, 75-80.

Goulet E, Morlat R. 2011. The use of surveys among wine growers in vineyards of the middle-Loire Valley (France), in relation to terrois studies. Land Use Policy, 28: 770-782.

Grothmann T, Pratt A. 2005. Adaptive capacity and human cognition: The process of individual adaptation to climate change. Global Environmental Change, 15: 199-213.

Hadarits M, Smit B, Diaz H. 2010. Adaptation in viticulture: A case study of producers in the Maule region of Chile. Journal of Wine Research, 21: 167–178.

Hall A, Jones GV. 2010. Spatial analysis of climate in winegrape growing regions in Australia. Australian Journal of Grape and Wine Research, 16: 389-404.

Huglin P. 1978. Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture, 1117-1126.

Huglin P, Schneider C. 1998. Biologie et écologie de la vigne. Paris, Francia. Lavoisier, 2ª Edición, 370p.

Humántico-Cisneros MA, Piccolo MC. 2011. Caractertización de la brisa marina en el balneario de Monte Hermoso, Argentina. Estudios Geográficos, 271, 461-475.

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 of Enology and Viticulture, 32: 137-154.

INAVI 2013. Instituto Nacional de Vitivinicultura. Estadísticas de los viñedos. En: http://www.inavi.com.uy/categoria/102-datos-nacionales-2015.html (última visita el 18/01/2014).

INAVI 2015. Instituto Nacional de Vitivinicultura. Estadísticas de los viñedos. En: http://www.inavi.com.uy/categoria/102-datos-nacionales-2015.html (última visita el 20/04/2016).

INIA 2013. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Registros climáticos del portal GRAS de la estación de Las brujas. En: http://www.inia.uy/investigaci%C3%B3n-e-innovaci%C3%B3n/unidades/GRAS/Clima/Banco-datos-agroclimatico (última visita el 11/01/2014).

INIA 2015. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Registros climáticos del portal GRAS de la estación de Las brujas. En: http://www.inia.uy/investigaci%C3%B3n-e-innovaci%C3%B3n/unidades/GRAS/Clima/Banco-datos-agroclimatico (última visita el 20/04/2016).

INIA 2016. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Registros climáticos del portal GRAS de la estación de Las brujas. En: http://www.inia.uy/investigaci%C3%B3n-e-

innovaci%C3%B3n/unidades/GRAS/Clima/Banco-datos-agroclimatico (última visita el 20/04/2016).

IPCC 2007. Intergovernemental Panel on Climate Change. Informe de Síntesis. En: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf (última visita el 21 de abril de 2016).

Jackson DI, Lombard PB. 1993. Environmental management practices affecting grape composition and wine quality – a review. American Journal of Enology and Viticulture, 44: 409-430.

Jackson RS. 2008. Wine Science principles and applications. Oxford, England. Elsevier, 3ª edición, 789p.

Jones GV, Duff AA, Hall A, Myers JW. 2010. Spatial analysis of climate in winegrape growing regions in the Western United States. American Journal of Enology and Viticulture, 61: 313–326.

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: Proceedings of the Vineyard Data Quantification Society's 10th OEonometrics Meeting. Dijon, Francia. Mayo de 2004.

Jones GV, Davis RE. 2000. Grapevine phenology, grape composition, and wine production and quality for Bodeaux, France. American Journal of Enology and Viticulture, 51: 249-261.

Keller M. 2010. The science of grapevine: anatomy and physiology. Amsterdam, Holanda. Academic press, 522p.

Kelly PM, Adger WN. 2000. Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation. Climatic Change, 47: 325–352.

Kliewer WM, Gates D. 1987. Wind effects on grapevine growth, yield and fruit composition. Australian and New Zealand Wine industry Journal, 2: 30-37.

Kliewer WM. 1977. Influence of temperature, solar radiation, and nitrogen on coloration and composition of Emperor grapes. American Journal of Enology and Viticulture, 23: 71-77.

Kliewer WM. 1973. Berry composition of Vitis vinifera cultivars as influenced by photo-temperatures and nycto-temperatures during maturation. Journal of the Amercian Society of Horticultural Science, 98: 153–159.

Koundouras S, Tsialtas IT, Zioziou E, Nikolaou N. 2008. Rootstock effects on the adaptive strategies of grapevine (*Vitis vinifera* L. cv. Cabernet-Sauvignon) under contrasting water status: leaf physiological and structural responses. Agriculture, Ecosystems and Environment, 128: 86–96.

Lereboullet A, Beltrando G, Bardsley DK. 2013. Socio-ecological adaptation to climate change: A comparative case study from the Mediterranean wine industry in France and Australia. Agriculture, Ecosystem and Environment, 163: 273-285

Lorenzo MN, Taboada JJ, Lorenzo JF, Ramos AM. 2013. Influence of climate on grape production and wine quality in the Rías Baixas, north-western Spain. Regional Enviornmental Change, 13(4): 887-896.

Madelin M, Bois B, Quénol H. 2014. Variabilité topoclimatique et phénologique des terroirs de la montagne de Corton (Bourgogne). En: Quénol H. 2014. Changement climatique et terroirs viticoles. Paris, Francia. Lavoisier, pp. 215-227.

Madelin M. 2004. L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne : modélisation spatiale aux échelles fines des températures minimales et des écoulements de l'air. Tesis doctoral. Paris, Francia. Université Paris 7, 353p.

Magrin GO, Marengo JA, Boulanger JP, Buckeridge MS, Castellanos E, Poveda G, Scarano FR, Vicuña S. 2014. Central and South America. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp 1499-1566. En: http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/ (visitado el 05 de julio de 2016).

Matese A, Crisci A, Di Gennaro SF, Primicerio J, Tomasi D, Marcuzzo P, Guidoni S. 2014. Spatial variability of meteorological conditions at different scales in viticulture. Agricultural and Forest Meteorology, 189-190: 159-167.

Martin SR, Dunn GM. 2000. Effect of pruning time and hydrogen cyanamide on budburst and subsequent phenology of *Vitis vinifera* L. variety Cabernet Sauvignon in central Victoria. Australian Journal of Grape and Wine Research, 6: 31-39.

MGAP-FAO. 2013. Clima de cambios: Nuevos desafíos de adaptación en Uruguay. Astigarraga L, Picasso V, Ferrer M, Mondelli M, Cruz G, Camussi G, Fourment M, Varela V, Pereyra G, Taks J, Contreras S, Cobas P. Resultados del proyecto FAO/TCP/URU 3302, Montevideo, Uruguay.

Mira de Orduña R. 2010. Climate change associated effects on grape and wine quality and production. Food Research International, 43: 1844-1855.

Mori K, Goto-yamamoto N, Kitayamam M, Hashizume H. 2007. Loss of anthocyanins in red-wine grape under high temperature. Journal of Experimental Botany, 58: 1935-1945.

Mosedale JR, Wilson RJ, Maclean IMD. 2015. Climate change and crop exposure to adverse weather: changes to frost risk and grapevine flowering conditions. PLOS ONE 10(10):e0141218.

Neethling E, Petitjean T, Quénol H, Barbeau G. 2016. Assessing local climate vulnerability and winegrowers' adaptive process in the context of climate change. Mitigation and Adaptation Strategies of Global Change, 1-27.

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.

Nicholas KA, Mathews MA, Lobell DB, WIllits NH, Field CB. 2011. Effect of vineyard-scale climate variability on Pinot noir phenolic composition. Agricultural and Forest Meteorology, 151: 1556-1567.

OIV (1990) Recueil des méthodes internationales d'analyse des vins et des moûts. Office International de la Vigne et du Vin, Paris, Francia. 368p.

Okoola REA. 1978. Spatial distribution of precipitation in the Mombasa area of Kenya, Kenya Meteorological Department, IMTR Research Report, 1-78.

Parker AK, De Cortázar-Atauri Ig, van Leeuwen C, Chuine I. 2011. General phenological model to characterize the timing of flowering and veraison of Vitis vinifera L. Australian Journal of Grape and Wine Research, 17: 206–16.

PlantGrape. 2013. Le catalogue de vignes cultivées en France. En: http://plantgrape.plantnet-project.org/ (visitado el 1º de octubre de 2013).

Pérez-Catalá A. 2013. Viticulture under climate change: understanding vulnerability and adaptive capacity of wineries and growers. A case study in *El Penedès* region, Catalonia. Tesis doctoral. Barcelona, España. Universitat Autònoma de Barcelona, 34p.

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.

Pouget R. 1963. Recherches physiologiques sur le repos végétatifs de la vigne (*Vitis vinifera* L.) : la dormance de bourgeons et le mécanisme de sa disparition. Annales d'amélioration des plantes, 13: 1-247.

Prohaska F. 1976. The climate of Argentina, Paraguay and Uruguay. Climates of Central and South America, World Survey of Climatology, Elsevier Scientific Publishing Company, 12: 13-112.

Quénol H. 2014. Changement climatique et terroirs viticoles. Paris, Francia. Lavoisier, 444p.

Quénol H, Bonnardot V. 2014. A multi-scale climatic analysis of viticultural terroirs in the context of climate change: the "TERADCLIM" project. *International Journal of Vine and Wine Sciences*, LACCAVE; Vigne et Vin Publications Internationales, Special issue, 23-32.

Quénol H, Maciel A, Monteiro A, Beltrando G. 2007. Variabilidade espacial do gelo primaveril nos vinhedos do Vinho Verde (Portugal). Geografía, 32, 5-27.

Rey P. 1967. Étude biogéographique du vent sur le littoral Languedoc-Roussillon. Service de la carte de la végétation, CNRS, Fasc II, 143p.

Rusticucci M, Renom M. 2008. Variability and trends in indices of quality controlled daily temperature extremes in Uruguay. International Journal of Climatology, 28(8): 1083- 1095.

Sadras VO, Moran MA. 2013. Nonlinear effects of elevated temperature on grapevine phenology. Agricultural and Forest Meteorology, 173: 107-115.

Sadras VO, Petrie PR, Moran MA, 2012. Effects of elevated temperature in grapevine. II juice pH, titrable acidity and wine sensory attributes. Australian Journal of Grape and Wine Research, 19: 107-115.

Sadras VO, Reynolds MP, de la Vega AJ, Petrie PR, Robinson R. 2009. Phenotypic plasticity of yield and phenology in wheat, sunflower and grapevine. Field Crops Research, 110: 242–250.

Savijärvi H, Alestalo M. 1988. The sea breeze over a lake of gulf as the function of the prevailing flow. Beiträge zur Physik der Atmosphäre, 61: 98-104.

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.

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.

Simionato CG, Luz Clara Tejedor M, Moreira D, Campetella C. 2009. Sea surface temperature variability at the Argentinean and Uruguayan Coast off the Rio De La Plata estuary: evidence of upwelling. Journal of Coastal Research, Special Issue, 56: 1424-1428.

Spayd ES, Tarara JM, Mee DL, Ferguson JC. 2002. Separation of sunlight and temperature effects on the composition of *Vitis vinifera* cv. Merlot berries. American Journal of Enology and Viticulture, 53: 171-182.

Sraibman L. 2009. Modelado numérico atmosférico de capas bajas sobre el Río de la Plata y zonas de influencia y su empleo en estudios de variabilidad climática. Tesis de doctorado. Buenos Aires, Argentina. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 144p.

Steel CC, Blackman JW, Schmidtke LM. 2013. Grapevine Bunch Rots: Impacts on Wine Composition, Quality, and Potential Procedures for the Removal of Wine Faults. Journal of Agricultural and Food Chemestry, 61: 5189−5206.

Sweetman C, Sadras VO, Hancock RD, Soole KL, Ford CM. 2014. Metabolic effects of elevated temperature on organic acid degradation in ripening *Vitis vinifera* fruit. Journal of Experimental Botany, 65: 5975-5988.

Tarara JM, Lee J, Spayd SE, Scagel CF. 2008. Berry temperature and solar radiation alter acyclation, proportion, and concentration of anthocyanin in Merlot Grapes. American Journal of Enology and Viticulture, 59: 235-247.

Tomasi D, Jones GV, Giust M, Lovat L, Gaiotti F. 2011. Grapevine Phenology and Climate Change: Relationships and Trends in the Veneto Region of ltaly for 1964-2009. American Journal of Enology and Viticulture, 62(3): 329-339.

Tonietto J, Carbonneau A. 2004. A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. Agricultural and Fortest Meteorology, 124, 81-97.

van Leeuwen C, Schultz HR, García de Cortázar-Atauri I, Duchêne E, Ollat N, Pieri P, Bois B, Goutouly JP, Quénol H, Touzard JM, Malheiro AC, Bavaresco L, Delrot S. 2013. Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine-producing areas by 2050. En: Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America 110 (33).

van Leeuwen C, Bois B, Cellie N, Tregoat 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.

van Leeuwen C, Garnier C, Agut C, Baculat B, Barbeau G, Besnard E, Bois B, Boursiquot JM, Chuine I, Dessup T, Dufourcq T, García de Cortazar-Atauri I, Marguerit E, Monamy C, Koundouras S, Payan JC, Parker A, Renouf V, Rodriguez-Lovelle B, Roby JP, Tonietto J, Trambouze W. 2008. Heat requirements for grapevine varieties are essential information to adapt plant

material in a changing climate. En: Proceedings of the 7th International Terroir Congress, Nyon, Switzerland pp. 222–227.

van Leeuwen C, Vivin P (2008) Alimentation hydrique de la vigne et la qualité des raisins. Innovations Agronomiques, 2: 159-167.

Verdugo-Vásquez N, Acevedo-Opazo C, Valdés-Gómez H, Araya-Alman M, Ingram B, García de Cortázar-Atauri I, Tissyere B. 2015. Spatial variability of phenology in two irrigated grapevine cultivar growing under semi-arid conditions. Precision Agriculture, 17: 218-245.

Webb LB, Whetton PH, Barlow EWR. 2008. Modelled impact of future climate change on the phenology of winegrapes in Australia. Austarlian Journal of Grape and Wine Research, 13: 165-175.

Winkler AJ, Cook JA, Kliewer WM, Lider LA. 1974. General viticulture. Berkeley, USA. University of California Press, 710p.

Yaro JA. 2013. The perception of and adaptation to climate variability/change in Ghana by small-scale and comercial farmers. Regional Environmental Change, 13: 1259-1272.

8. ANEXOS

8.1. VALORIZACIÓN DE LA TESIS

Artículos publicados en revistas arbitradas

Fourment M, Ferrer M, Quénol H. 2013. Vitis vinifera L cv. Tannat : respuesta del cultivo frente a la variabilidad climática. Agrociencia Uruguay 17(2):33-44. http://www.fagro.edu.uy/~agrociencia/index.php/directorio/article/view/820

Fourment M, Bonnardot V, Planchon O, Ferrer M, Quénol H. 2014. Circulation atmosphérique locale et impacts thermiques dans un vignoble côtier : observations dans le sud de l'Uruguay. Climatologie 11:47- 64. http://lodel.irevues.inist.fr/climatologie/index.php?id=589

Artículos publicados en congresos con comité de lectura

Fourment M, Ferrer M, González-Néves G, Barbeau G, Bonnardot V, Quénol H. 2013. Spatial variability of temperature and grape berry compostion at terroir scale in Uruguay. En: *Proceedings of 18th International Simposium GiESCO*. 7-11 de Julio. Porto, Portugal.

Fourment M, Bonnardot V, Ferrer M, Quénol H. 2014. Température et circulation atmosphérique locale : observations dans le vignoble du sud de l'Uruguay. En : Actes du XXVIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie *AIC*. 2-5 de Julio. Dijon, France.

Quénol H, Neethling E, Leroux R, Grassin M, **Fourment M**, van Leeuwen C, De Resseguier L, Barbeau G. 2015. Characterisation and perception of climate change at viticultural terroir scale. En: *Proceedings of 19th International Simposium GiESCO*. 31 de Mayo al 3 de Junio. Gruissan and Montpellier, France.

Resúmenes publicados en congresos

Fourment M, Ferrer M, Quénol H. 2013. Variabilidad espacial de la temperatura y la fenología de Tannat en una región vitícola de Uruguay. En: Actas del XIV Congreso Latinoamericano de Viticultura y Enología. 20-22 de Noviembre. Tarija, Bolivia.

Fourment M, Ferrer M, Bonnardot V, Quénol H. 2014. Preliminary results of fine scale temperature variability in a wine region of Uruguay. En: Proceedings of the World Climate Research Programme *WCRP* Conference for Latin America and Caribbean: developing, linking and applying climate knowledge. 17-21 de Marzo. Montevideo, Uruguay. (Premio al mejor poster)
http://pampero.cima.fcen.uba.ar/wcrp/posters/AE11_Fourment.pdf

Fourment M, Ferrer M, Barbeau G, Quénol H. 2015. Percepción de la variabilidad climática en la región sur de Uruguay. En: Actas del XV Congreso Latinoamericano de Viticultura y Enología. 3-7 de Noviembre. Bento Gonçalves, Brasil.

Fourment M, Ferrer M, Quénol H. 2015. Sensibilidad y capacidad adaptativa de la vid al cambio climático en Uruguay: enfoque de matrices. En: Actas del XV Congreso Latinoamericano de Viticultura y Enología. 3-7 de Noviembre. Bento Gonçalves, Brasil.

Fourment M, Ferrer M, Barbeau G, Quénol H. 2016. Perception of climate variability and vineyards vulnerability in a coastal wine region in South America. En: Proceedings of the Sustainable grape and wine production in the context of climate change. 10 -13 de Abril. Bordeaux, France.

Capítulos de libros

Ferrer M, Camussi G, **Fourment M**, Varela V, Pereyra G, Taks J, Contreras S, Cobas P, Mondelli M, Cruz G, Astigarraga L, Picasso V. 2013. Clima de cambios. Nuevos desafíos de adaptación en Uruguay. Volumen VI. Sensibilidad y capacidad adaptativa de la viticultura y la fruticultura frente al cambio climático. En: Oyhantçabal W, Sancho D, Galván M. Clima de cambios. Nuevos desafíos de adaptación en Uruguay. Uruguay, FAO y MGAP. Project FAO/TCP/URU 3302, Montevideo, Uruguay. 306p.

Quénol H, Arauni C, **Fourment M**, Trapateau L, Grassin M, Briche E, Quini C, Ortiz H, Ferrer M, Barbeau G, Neethling E, Pinson L, Polimeni M. 2014. Changement climatique dans les vignobles d'Amérique du Sud. En: Quénol, H. Changement climatique et terroirs viticoles. Lavoisier. Paris. 444p.