



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA Y TURISMO

TESIS DE DOCTOR EN GEOGRAFÍA

ESTUDIO INTEGRAL DE LOS RECURSOS HÍDRICOS Y LAS
COBERTURAS DEL SUELO DE LA CUENCA MEDIA Y BAJA DEL RÍO
SAUCE GRANDE (ARGENTINA)

Andrea Soledad Brendel

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2020

PREFACIO

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Geografía, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Instituto Argentino de Oceanografía, dependiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET-UNS) durante el período comprendido entre el 1 de abril de 2015 y el 30 de marzo de 2020, bajo la dirección de la Dra. María Cintia Piccolo y la co-dirección del Dr. Gerardo M. E. Perillo.

Lic. Andrea S. Brendel

CONICET-Instituto Argentino de Oceanografía

Departamento de Geografía y Turismo

Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca

*Y no apures el camino, al fin todo llegará
cada luz, cada mañana, todo espera en su lugar.
Puedes creer, puedes soñar*

Dedicada a mi familia...

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis agradecimientos a todas aquellas personas e instituciones que hicieron posible el desarrollo de esta tesis. En primer lugar a mis directores, la Dra. María Cintia Piccolo y el Dr. Gerardo Miguel Eduardo Perillo por haberme permitido formar parte de su grupo de investigación, por el acompañamiento y apoyo constante.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por haber financiado mi beca doctoral. Al Instituto Argentino de Oceanografía (IADO), Departamento Geografía y Turismo y la Universidad Nacional del Sur por brindarme el lugar necesario para desarrollar esta tesis. A la Municipalidad de Monte Hermoso y al equipo de la laguna Sauce Grande por permitirme el espacio para la colocación de los equipos. A Sandy, Darío y Martin por permitirme realizar las mediciones en sus establecimientos rurales como así también por sus extensas charlas y debates sobre las problemáticas de la cuenca. Gracias por brindarme desinteresadamente sus conocimientos.

Al personal de apoyo, administrativos, becarios e investigadores del IADO. En especial a Jorge Bustamante y Juan Pons por su buena predisposición y trabajo en cada salida al campo. Gracias por acompañarme y ayudarme a darle forma a mis ideas de investigación. A Alejandro Vitale por haber construido el equipamiento y por los conocimientos brindados. A mis compañeros de oficina por los hermosos momentos compartidos: Andrea, Paula, Facundo y Cari los cuales compartí mis primeros años y a Belén, Josefina, Vanina, Gian, Vanesa y Fede en el resto de mis años. Gracias a Belén, Cari, Facundo, Josefina y Andrea por haberme enseñado las técnicas de medición, por su ayuda en el laboratorio, procesamiento de datos y por haberme acompañado en mis primeras campañas. También quiero agradecer a mi amigo Fede por su apoyo constante, sus consejos, su confianza y por su enorme trabajo en los viajes de campo y en la oficina. Gracias Fede por tu generosidad y por cada abrazo.

A mis amigos y amigas de la vida, quienes me han aconsejado y entendido siempre. A Ricardo y Pancho por permitirme crecer personalmente y profesionalmente, por los sabios consejos y por entenderme en momentos difíciles. A mi familia y en especial a mis cuatro sobrinos por tener siempre una sonrisa para mí. Especialmente a mis padrinos Mabel y Oscar por ser siempre mi sostén, por darme muchos abrazos llenos de amor y por aconsejarme y ayudarme siempre. Finalmente quiero agradecer a Fer. Gracias por acompañarme en este camino, por la paciencia, por entender mis tiempos, por escucharme y aconsejarme y por haber creado juntos esta hermosa y pequeña familia. Esta tesis es fruto de un gran esfuerzo personal y sin el apoyo de todas las personas que nombre anteriormente no hubiese sido posible realizarla. Como dijo el gran Gustavo Cerati, gracias totales.

RESUMEN

Las cuencas hidrográficas son sistemas que presentan una estrecha relación entre los factores naturales tales como la geomorfología, el clima, el suelo, el agua, la vegetación y los factores antrópicos como las actividades agrícolas. Los objetivos generales de la presente tesis fueron evaluar el efecto de la variabilidad pluviométrica sobre los principales recursos hídricos de la cuenca del río Sauce Grande (SW de la provincia de Buenos Aires), como así también analizar el comportamiento espacio-temporal de los parámetros limnológicos en su cuenca. Además, se propuso estudiar la dinámica del caudal del río Sauce Grande y la circulación atmosférica local de la laguna homónima, determinar su origen y los efectos del ingreso de la brisa de mar sobre este cuerpo de agua.

Inicialmente, se analizaron las anomalías de las principales variables meteorológicas, utilizando una extensa serie de tiempo (1960-2017) de tres estaciones meteorológicas ubicadas en el norte, centro y sur del área de influencia de la cuenca. Los resultados indicaron que la temperatura aumentó (+0,5 °C en el norte y + 0,8 °C, en el sur), mientras que la velocidad del viento disminuyó (-1 km/h en el sur y -3,3 km/h en el norte). La tendencia de la precipitación fue espacialmente heterogénea dado que aumentó en el norte y sur (+42 mm y +16 mm, respectivamente) y disminuyó en el centro (-6 mm). Este parámetro, se estudió en función de la variación espacio-temporal de la cobertura de agua de los dos principales recursos hídricos de la cuenca del río Sauce Grande: el dique Paso de Las Piedras (DPP) y la laguna Sauce Grande (LSG) durante el período 1987-2017. Los resultados arrojaron que el área cubierta por agua y la precipitación poseen una asociación lineal positiva, alta y estadísticamente significativa. La variación areal de la LSG estuvo explicada por la precipitación en un 67 %, mientras que la del DPP en un 55 %. Ambos presentaron los mismos períodos de incremento (2001 a 2005 y 2014 a 2017) y reducción de su área (2007 a 2013) relacionados al monto anual de precipitación. Los parámetros morfométricos que presentaron mayor variación con respecto a la precipitación fueron el área, el perímetro y la longitud máxima total.

El caudal del río Sauce Grande, medido en alta frecuencia, fluctuó en función de la variabilidad pluviométrica. Durante el período analizado (noviembre 2016-marzo de 2018) el río presentó tres crecidas. La más importante ocurrió en septiembre de 2017 con un caudal máximo de $34,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en el sector más cercano a la descarga del río en el Océano Atlántico y de $4,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ antes de su ingreso a la laguna. Este valor fue generado por precipitaciones diarias entre 60 y 80 mm. El tiempo máximo de escurrimiento directo fue 12 días y fue mayor en el sector más cercano a la

desembocadura del río en el Océano Atlántico, dado la escasa pendiente del terreno. Las áreas inundables ante un evento de precipitación intenso se ubicaron en la barrera Medanos Austral y en los sectores cercanos al ingreso del río en la laguna homónima. Esta laguna también fue monitoreada con sensores de alta frecuencia (septiembre de 2016-marzo de 2018). Los resultados permitieron caracterizar la dinámica de las variables medidas en un período de mayor profundidad de la laguna y compararlos con un estudio previo realizado durante un período de sequía (febrero de 2011-enero de 2012). En esta tesis, además de aumentar el nivel del agua en relación con un período húmedo, se registró un aumento de la temperatura del agua y del aire, como así también, una disminución de la conductividad eléctrica y la velocidad del viento. La Transformada Rápida de Fourier mostró diferentes intensidades de la señal en las distintas variables, principalmente representadas por los ciclos anuales, mensuales y estacionales, diarios y semidiurno. Sin embargo, la temperatura del agua y del aire y la velocidad del viento mostraron ciclos de energía en 4 y 8 h. Estos resultados determinaron la existencia de una circulación atmosférica local sobre la laguna de origen geomorfológico. La misma se caracterizó por un aumento significativo de la velocidad del viento en las horas de mayor radiación solar producto del desigual calentamiento, que fue analizado a partir del procesamiento de imágenes satelitales Landsat, entre la laguna y el médano que la limita al sur. Esta circulación se encontró sólo cuando en la región se localizan centros de alta presión, cielo despejado y viento regional mínimo. Además, se comprobó que los eventos de brisa marina ocurridos en la costa de Monte Hermoso (ubicada a 6 km de la laguna) ingresan a la laguna aproximadamente 2 h más tarde, modifican la velocidad y dirección del viento y disminuye la temperatura del aire producto del viento con componente sur.

Teniendo en cuenta los parámetros limnológicos medidos de manera estacional (abril-diciembre de 2016), la cuenca media y baja del río Sauce Grande presenta tres unidades espaciales: i) el río Sauce Grande antes de su ingreso en la laguna homónima, ii) el arroyo Las Cortaderas y iii) el arroyo Las Mostazas, la laguna y el sitio más cercano a la descarga del río en el Océano Atlántico. En general, las variables presentaron una marcada variación espacio-temporal. La CE fue mayor en la laguna y en el sitio más cercano a la descarga del río en el Océano Atlántico, dado que son los sectores de menor altura por lo que se genera la acumulación las sales provenientes de toda la cuenca. El arroyo Las Mostazas presentó valores altos de estas variables producto de su cercanía a la ciudad de Coronel Dorrego. El seston y la MOP también se incrementaron a medida que el río se encuentra más cercano a su desembocadura en la laguna y fue registrado en el otoño, en coincidencia con elevadas

precipitaciones. El arroyo Las Cortaderas y la laguna presentaron los máximos valores medios de seston y MOP. Su concentración fue mayor durante el verano, probablemente por las altas concentraciones de fitoplancton. El valor medio de seston de la laguna fue ampliamente inferior al registrado en un estudio previo sobre el cuerpo de agua durante un período de extrema sequía (septiembre de 2008-diciembre de 2010), mientras que el encontrado en esta tesis fue durante un período húmedo. Por lo tanto, el seston es altamente fluctuante con respecto al nivel de agua de la laguna. El valor medio de oxígeno disuelto permitió clasificar a todos los ambientes analizados como moderadamente ricos en oxígeno y se correlacionó negativamente con la temperatura del agua. Su valor fue aceptable para la gran mayoría de los organismos acuáticos y especies de peces. El NT y el PT, fueron los más variables temporalmente y el NT se registró en mayor proporción. Ambos presentaron su máximo en invierno y elevadas concentraciones en primavera. Esta situación se relaciona con que, durante estos períodos, se aplican fertilizantes en la siembra (junio-julio) y maduración (septiembre-octubre) del cultivo de trigo, el principal de la cuenca. Estas prácticas, en conjunto con el escurrimiento superficial de la cuenca, generaría el incremento de los nutrientes durante estos dos momentos del año.

Se utilizaron diferentes métodos de clasificación de las coberturas del suelo en las tres unidades geomorfológicas de la cuenca. El de mejor precisión en la llanura fue el de Máxima Verosimilitud, mientras que en el médano y en el afloramiento rocoso fue la Distancia de Mahalanobis. En todos los casos, la utilización de seis índices espectrales calculados a partir de imágenes satelitales Landsat mejoró significativamente la discriminación de las coberturas del suelo en comparación con el uso de la reflectividad de las bandas. A partir de la selección del mejor método y conjunto de datos para su determinación, se realizó un análisis multitemporal de las coberturas del suelo durante el período 2000-2016. Las cubiertas de vegetación y particularmente los cultivos, fluctuaron en función de los montos de precipitación. Por ejemplo, durante el año 2014, se encontró la menor área de cultivos de invierno (584 km²) producto del exceso hídrico ocurrido antes de su implantación, mientras que durante ese mismo año los cultivos de verano presentaron su máxima superficie (1144 km²), beneficiados por las óptimas condiciones de humedad de suelo en el momento de siembra. El mapa generado con información *in situ* no sólo fue útil para conocer la distribución y variación de las coberturas del suelo a lo largo de toda la cuenca, sino que sirvió de base para contrastarlo con el escenario óptimo y definir el nivel de vulnerabilidad eco-ambiental. Se encontró que la cuenca del río Sauce Grande presentó cinco niveles de vulnerabilidad eco-ambiental. El más frecuente fue el bajo

(1343,7 km²), seguido del alto (1091,4 km²). La importancia de considerar esta última categoría es que las áreas de pastizales se utilizaron para la implantación de cultivos, por lo que su conservación es fundamental dado la significativa provisión de bienes y servicios ecosistémicos que estos brindan. Los niveles muy alto y medio fueron menos frecuentes, pero las problemáticas que en estos espacios se generan son importantes, dado que los cultivos se realizan sobre áreas inundables, en el primer caso, lo que podría generar graves consecuencias económicas a los productores agropecuarios. En el segundo, el recurso suelo está sobreexplotándose por el incremento de la superficie destinada a cultivos. Teniendo en cuenta estos niveles y sus problemáticas asociadas, se diseñaron estrategias que tuvieron como objetivo mejorar la calidad ambiental de la cuenca, considerando la sostenibilidad ambiental, social y económica.

ABSTRACT

Hydrographic basins are systems related to natural (such as geomorphology, climate, soil, water, vegetation), and anthropic factors (i.e., agricultural activities). The main objectives of this thesis were to evaluate the effect of rainfall variability on the primary water resources of the Sauce Grande river basin (SW of the province of Buenos Aires), as well as to analyze the Spatio-temporal behavior of its limnological parameters. Moreover, the dynamics of the flow of the Sauce Grande river and the local atmospheric circulation were studied. The purpose was to determine its origin and the effects of the sea breeze on this water body.

First of all, the meteorological anomalies were analyzed considering the period 1960-2017. This information was obtained from three meteorological stations located in the north, the center, and the south of an influence area of the basin. The results indicated that the temperature increased (+0.5 °C in the north and + 0.8 °C in the south), while the wind speed decreased (-1 km/h in the south and -3,3 km/h in the north). The precipitation trend was spatially heterogeneous since it increased in the north and south (+42 mm and +16 mm, respectively), and decreased in the center (-6 mm). This parameter was studied based on the spatial and temporal variation of the water coverage of the two primary water resources of the Sauce Grande river basin: the Paso de Las Piedras dam and the Sauce Grande shallow lake during the period 1987-2017. The results evidenced that the water coverage and the precipitation have a positive and statistically significant linear agreement. The areal variation of the Sauce Grande shallow lake was explained by precipitation in 67 %, while in the Dique Paso de las Piedras dam in 55 %. The increase and reduction periods presented a

relationship with the annual rainfall amount. As a consequence, morphometric parameters ranged widely, observing the most extensive changes in the area, the perimeter, and the maximum length.

The discharge of the Sauce Grande River was measured at high-frequency, and it fluctuated according to the rainfall variability. During the period analyzed (November 2016-March 2018), the river presented three events of flood. The most relevant occurred in September of 2017. It was observed a maximum flow of $34.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in the sector closest to the Atlantic Ocean and $4.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ before entering the lake. This value was generated during daily extreme precipitation events, with a total of 60 and 80 mm. The maximum runoff time was 12 days and was longer in the sector closest to the Atlantic Ocean, due to the existence of low slopes. Flood areas were located in the Medanosa Austral barrier and near the entrance of the river in the shallow lake. This lake was also monitored with high-frequency sensors (September 2016-March 2018). The results allowed characterizing the dynamics of the physical and biological variables and comparing them with a previous study carried out during a dry period (February 2011-January 2012). In this thesis, it was observed an increase in water and air temperature, as well as a decrease in electrical conductivity and wind speed. The Fast Fourier Transform showed different signal intensities in the different variables, mainly represented by the annual, monthly, and seasonal, daily, and semidiurnal cycles. However, water and air temperature and wind speed identified cycles in 4 and 8 hours. These results determined the existence of a local atmospheric circulation over the shallow lake with a geomorphological origin. It was characterized by a significant increase in wind speed during maximum solar radiation due to uneven heating. This study was carried out with Landsat satellite image processing. This circulation only appeared with high-pressure, clear skies, and minimum regional wind. Moreover, it was found that sea breeze events that occurred on the coast of Monte Hermoso (located 6 km from the shallow lake) enter into the shallow lake approximately two hours later, modifying the wind speed and direction, decrease the air temperature, and changing the wind direction.

On the other hand, the limnological parameters measured seasonally (April-December 2016) in the middle and lower basin of the Sauce Grande River basin. The presented three spatial units: i) the Sauce Grande River before entering the homonymous shallow lake, ii) the Las Cortaderas stream, and iii) Las Mostazas stream, the shallow lake, and the site closest to the river discharge into the Atlantic Ocean. In general, the variables showed a marked spatial and temporal variation. The electrical conductivity was higher in the shallow lake and closed to the Atlantic Ocean

discharge due to the lowest heights favor accumulation of salts. Las Mostazas stream presented high values of this variable because of its proximity to Coronel Dorrego city. The seston and the POM increased while the river was closing to its mouth in the shallow lake. Las Cortaderas stream and the lake had the highest average values of seston and POM. Its concentration was higher during the summer, probably due to the high concentrations of phytoplankton. The mean seston value of the shallow lake was widely lower than that recorded in a previous study during a period of extreme drought (September 2008-December 2010), while the one found in this thesis was during a wet period. Therefore, the seston is highly fluctuating concerning the water level of the lake. The mean value of dissolved oxygen allowed all the analyzed environments to be classified as moderately rich in oxygen and was negatively correlated with the water temperature. Its value was acceptable for a vast majority of aquatic organisms and fish species. The NT and the PT were the most temporarily variable, and the NT was recorded in a higher proportion. Both presented their maximum in winter and high concentrations in spring. This situation is related to the fact that, during these periods, fertilizers are applied in the sowing (June-July) and growth (September-October) of the wheat crop, the main one of the basin. These practices would generate an augmentation of the nutrients during these seasons.

Different methods of classifying land cover were analyzed in the three geomorphological units of the basin. The one with the best precision in the plain was Maximum Likelihood, while in the dune and the hills were the Mahalanobis Distance. In all cases, the application of six spectral indexes calculated from Landsat satellite images improved the discrimination of the land cover significantly compared to the use of the reflectivity of the bands. From the selection of the best method and data set for its determination, a multitemporal analysis of the land cover during the period 2000-2016 was carried out. The vegetation covers, and particularly crops fluctuated depending on the amounts of precipitation. For example, during 2014, the smallest area of winter crops (584 km²) was found as a result of the excess water that occurred before its implementation, while during that same year the summer crops had their maximum surface area (1144 km²), benefited by the optimal soil moisture conditions at the time of planting. The land cover map generated with information *in situ* was useful to define the optimal scenario and the level of eco-environmental vulnerability. It was found that the Sauce Grande river basin presented five levels of eco-environmental vulnerability. The most frequent was the low (1343.7 km²), followed by high (1091.4 km²). The importance of considering this last category is that the grassland areas were used for the implantation of crops so that their conservation is crucial due to the

significant provision of ecosystem services. Very high and medium levels were less frequent, but the problems generated in these spaces are essential, given that the crops are carried out on flood areas, in the first case, which could generate severe economic consequences for farmers. In the second, the soil is being overexploited due to the increase in the area devoted to crops. Vulnerability levels and their spatial and temporal problems allowed to delimit adaptation strategies aimed at improving the environmental quality, considering a sustainability scenario.

INDICE

PREFACIO	2
AGRADECIMIENTOS	4
RESUMEN	5
ABSTRACT	8
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. HIPÓTESIS DE TRABAJO	5
1.2. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS	5
2. ÁREA DE ESTUDIO	7
CAPÍTULO 2	12
ANOMALÍAS CLIMÁTICAS DEL ÁREA DE INFLUENCIA DE LA CUENCA DEL RÍO SAUCE GRANDE	12
1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. MÉTODO DE TRABAJO.....	14
2.1. Información climática	14
2.2. Relación entre la precipitación y la extensión areal de los cuerpos de agua	15
3. RESULTADOS	17
3.1. Temperatura del aire.....	17
3.1.1. Sector norte	17
3.1.2. Sector centro	18
3.1.3. Sector sur	19
3.2. Viento	20
3.2.1. Sector norte	20
3.2.2. Sector centro	22
3.2.3. Sector sur	23
3.3. Precipitación	24
3.3.1. Sector norte	24
3.3.2. Sector centro	25
3.3.3. Sector sur	26
3.4. Análisis multitemporal de la cobertura de agua y su relación con la precipitación	28
3.5. Cambios morfométricos en años pluviométricamente diferentes	30
4. CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN.....	31
CAPÍTULO 3	34
MONITOREO AMBIENTAL EN ALTA FRECUENCIA DE LA LAGUNA SAUCE GRANDE Y EL RÍO HOMÓNIMO	34
1. INTRODUCCIÓN.....	34
2. MÉTODO DE TRABAJO.....	36
2.1. Boya autónoma EMAC	36
2.1.1 Análisis de los datos de la boya EMAC.....	37

2.2. Medición de caudal	38
3. RESULTADOS	40
3.1. Laguna Sauce Grande.....	40
3.1.1. Variables meteorológicas.....	40
3.1.1.1. Temperatura del aire.....	40
3.1.1.2. Viento	41
3.1.2. Variables limnológicas	43
3.1.2.1. Temperatura del agua.....	43
3.1.2.2. Nivel del agua	45
3.1.2.3. Oxígeno disuelto	46
3.1.2.4. Conductividad eléctrica.....	47
3.2. Análisis de correlación entre las variables meteorológicas y limnológicas ..	48
3.3. Dinámica del caudal del río Sauce Grande	48
3.3.1. Curva de calibración	48
3.3.2. Análisis del caudal del río Sauce Grande y su relación con la precipitación	49
4. DISCUSIÓN.....	53
5. CONCLUSIÓN.....	56
CAPÍTULO 4	57
CIRCULACIÓN ATMOSFERICA LOCAL DE LA LAGUNA SAUCE GRANDE	57
1. INTRODUCCIÓN.....	57
2. METODO DE TRABAJO.....	58
2.1. Circulación local de la laguna SG	58
2.1.1. Estimación de la temperatura de superficie terrestre (TST)	59
2.2. Brisa de mar	63
3. RESULTADOS	64
3.1. Circulación atmosférica local de la laguna SG	64
3.1.1. Primavera	64
3.1.2. Verano	65
3.1.3. Otoño.....	66
3.1.4. Invierno.....	67
3.2. Análisis de la Temperatura de Superficie Terrestre (TST).....	68
3.3. Brisa de mar y su efecto sobre la circulación local de la laguna SG.....	70
3.3.1. Verano	70
3.3.2. Otoño.....	71
3.3.3. Invierno.....	73
3.3.4. Primavera	74
4. CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN.....	76
4.1. Circulación atmosférica local de la LSG impulsada por diferencias térmicas	76

4.1. Efecto de ingreso de la brisa de mar sobre los parámetros meteorológicos de la LSG.....	77
CAPÍTULO 5	79
CALIDAD DEL AGUA DE LA CUENCA MEDIA Y BAJA DEL RÍO SAUCE GRANDE.....	79
1. INTRODUCCIÓN.....	79
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	81
2.1. Sitios y frecuencia de los muestreos y medición	81
2.2. Mediciones limnológicas	84
2.3. Análisis de los datos	86
3. RESULTADOS	86
3.1. Variables limnológicas en la cuenca media y baja del río Sauce Grande....	86
3.1.1. pH.....	86
3.1.2. Oxígeno disuelto	87
3.1.3. Temperatura del agua.....	88
3.1.4. Conductividad eléctrica.....	89
3.1.5. Sestón y MOP.....	90
3.1.6. Nutrientes	91
3.2. Correlación de Spearman	93
3.3. Análisis de componentes principales (ACP).....	93
3.4. Análisis de conglomerados	95
3.5. Clorofila a y profundidad del disco Secchi.....	95
3.6. Estado trófico de la laguna Sauce Grande.....	96
4. DISCUSIÓN.....	97
5. CONCLUSIÓN.....	101
CAPÍTULO 6	103
COBERTURAS DEL SUELO DE LA CUENCA DEL RÍO SAUCE GRANDE.....	103
1. INTRODUCCIÓN.....	103
2. MÉTODO DE TRABAJO.....	105
2.1. Procesamiento digital de imágenes satelitales.....	105
2.2. Trabajo de campo. Muestras geo-referenciadas para clasificar las coberturas del suelo	106
2.3. Métodos de clasificación.....	111
3. RESULTADOS	112
3.1. Comportamiento espectral de las coberturas del suelo.....	112
3.2. Comportamiento anual y estacional de los índices espectrales.....	114
3.3. Precisión de los métodos de clasificación supervisados y no supervisados.....	116
3.4. Variación espacio-temporal de las coberturas del suelo	123
4. DISCUSIÓN.....	125
5. CONCLUSIÓN.....	128
CAPÍTULO 7	129

VULNERABILIDAD ECO-AMBIENTAL Y ESTRATEGIAS DE MANEJO SUSTENTABLE DEL TERRITORIO EN LA CUENCA DEL RÍO SAUCE GRANDE	129
1. INTRODUCCIÓN.....	129
2. MÉTODO DE TRABAJO.....	130
2.1. Determinación de las coberturas del suelo a partir del modelo de simulación espacial	130
2.2. Evaluación y validación de los resultados: escenario óptimo vs. escenario <i>in situ</i>	134
2.3. Categorización y delimitación de áreas vulnerables.....	134
3. RESULTADOS	135
3.1. Precisión de las coberturas del suelo modeladas vs <i>in situ</i>	135
3.2. Vulnerabilidad eco-ambiental.....	137
3.3. Estrategias de manejo sustentable del territorio.....	139
4. CONCLUSIÓN.....	144
CAPÍTULO 8	146
CONCLUSIONES FINALES	146
REFERENCIAS	152

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Las cuencas hidrográficas constituyen un sistema en donde interactúan factores naturales como la geomorfología, el clima, el suelo, el agua, la vegetación y la fauna, en conjunto con los desarrollos productivos generados por el hombre (Gil, 2009). El uso del suelo y la variabilidad climática son los principales factores ambientales que afectan la hidrología de las mismas (Chen et al., 2012; Molina-Navarro et al., 2014). Por ejemplo, los cambios en el uso del suelo, que en su mayoría son inducidos por actividades humanas, afecta la evapotranspiración y la infiltración, generando alteraciones en los flujos de superficie y subterráneos (Wang et al., 2014), mientras que la variabilidad climática influye en los patrones espaciales y temporales de los recursos hídricos de una cuenca (Khoi y Suetsugi, 2014). Los efectos de este fenómeno seguirán aumentando especialmente en las regiones áridas y semiáridas, dado que presentan un alto nivel de vulnerabilidad (Vorosmarty et al., 2010). La variabilidad climática también impone cambios hidrometeorológicos en los cursos y cuerpos de agua de una cuenca hidrográfica y, por lo tanto, determina los servicios ecosistémicos que brindan a la comunidad. Cuando su funcionamiento se ve modificado por causas naturales o antrópicas, se manifiesta una serie de procesos que afectan la calidad del agua como la eutrofización, acidificación y contaminación, proliferación de especies invasoras, sobreexplotación del hábitat, entre otros (Scordo, 2018a). En este sentido, la eutrofización de los ambientes acuáticos genera pérdida de calidad del agua dado que se reduce su transparencia y en muchas ocasiones se producen condiciones de anoxia que pueden generar mortandad de las especies acuáticas (Kopprio et al., 2014).

Los sistemas hídricos naturales se caracterizan por una alta variabilidad espacio-temporal (Kirnbauer et al., 2005) por lo que la respuesta hidrológica de una cuenca ante un evento de precipitación es el resultado de múltiples factores (Zabaleta y Antigüedad, 2013). En las cuencas hidrográficas de la llanura Pampeana, la dinámica de sus recursos hídricos se relaciona directamente con la regularidad, intensidad y frecuencia de la variabilidad pluviométrica (Aliaga, 2018). Este fenómeno ha generado modificación en el caudal y los servicios ecosistémicos en la mayoría de ellas (Palmer et al., 2008). Por otra parte, el aumento de la temperatura, la reducción de las precipitaciones y el cambio de las coberturas del suelo alteran la respuesta hidrológica de las cuencas a los eventos extremos (Nsubuga et al., 2015). Los cuerpos de agua someros, principal característica de los situados en la llanura Pampeana, responden rápidamente a las variaciones en el ambiente y por ello son considerados

“centinelas” de la variabilidad climática y el impacto antrópico (Williamson et al., 2009; Adrian et al., 2009; Zunino, 2018). Además, están ubicadas en zonas de escasa pendiente y suelos fértiles con gran desarrollo de actividades agrícolas por lo que su carga de nutrientes es mayor que la encontrada en los lagos profundos (Jeppesen et al., 2015). Su dinámica espacio-temporal también se ve modificada por otros factores tales como la geomorfología, hidrografía y las actividades antrópicas (Bohn et al., 2011). Para comprender su variación es importante tener en cuenta un enfoque multidisciplinario no solo considerando los factores ambientales sino los socioeconómicos y culturales (Scordo, 2018a).

El monitoreo ambiental en alta frecuencia de los cuerpos y cursos de agua es cada vez más frecuente. Los estudios más recientes se enfocan en las consecuencias de la variabilidad climática y las actividades humanas sobre la calidad del agua de los mismos. Algunos ejemplos se observan en el lago Tanganica, Africa (Plisnier et al., 2018), en los ríos Connecticut, Potomac y Mississippi, Estados Unidos (Zimmer et al., 2019), en el lago Taihu, China (Deng et al., 2018), etc. La medición de parámetros en alta frecuencia ha sido empleada para estudiar los cambios en el fitoplancton y su relación con la eutrofización en el lago Greifensee, Suiza (Thomas et al., 2018) y en río Támesis, Reino Unido (Bowes et al., 2016). Este tipo de datos ha permitido determinar el tiempo de escurrimiento del flujo ante precipitaciones intensas en la cuenca del río Koiliaris, Grecia (Moraetis et al., 2010), como así también analizar el régimen diario y estacional del caudal del río Mackenzie durante los últimos 40 años (Yang et al., 2015). Por otro lado, también se han utilizado este tipo de datos para detectar con excelente precisión fenómenos de circulación local como la brisa lagunar (Wang et al., 2017) y la brisa de mar (Huamantínco Cisneros y Piccolo, 2011b). En la llanura Pampeana, el monitoreo en alta frecuencia se ha centrado principalmente sobre laguna someras. Entre las investigaciones más recientes se destacan la realizadas en la laguna La Salada (provincia de Buenos Aires) (Alfonso et al., 2018), laguna de Puan (Zunino, 2018) y laguna Sauce Grande (Fornerón, 2012). En estas lagunas las mediciones en alta frecuencia mediante boyas permitieron analizar los diferentes parámetros meteorológicos y limnológicos identificando procesos que no se pueden observar con mediciones en baja frecuencia. En La Salada se analizó el metabolismo ecosistémico, como así también la dinámica en alta frecuencia de la clorofila *a* y su relación con el pasaje de centros de baja presión (Alfonso et al., 2018; Zunino, 2018). En la laguna Sauce Grande su utilización fue fundamental dado que permitió conocer la dinámica ambiental de este cuerpo de agua durante un período de sequía (Fornerón, 2012).

El estudio de las variaciones de las coberturas del suelo en una cuenca hidrográfica es fundamental, dado que permite evaluar las tendencias espacio-temporal de procesos como la deforestación y degradación ambiental, provocadas por las actividades humanas y que afectan la provisión de servicios ecosistémicos (Osuna-Osuna et al., 2015). Los cambios de cobertura y uso de suelo también generan alteración del ciclo hidrológico, incrementando la vulnerabilidad de las poblaciones (Reyes, et al., 2006). Además, este fenómeno puede potenciar los procesos de deterioro de la fertilidad de suelo, de la calidad del agua y la pérdida del hábitat, que en consecuencia, afectan la provisión de bienes y servicios ambientales (Freeman et al., 2007, Peña-Cortés et al., 2011). En este sentido, la obtención de un mapa preciso de coberturas del suelo es importante para establecer un manejo sustentable de los recursos naturales, especialmente en áreas altamente vulnerables como lo son las semiáridas (Alrababah y Alhamad, 2006) dado que la producción de cultivos depende del régimen de precipitaciones (Ferrelli et al., 2019). Además, es útil para evaluar la erosión hídrica y también para determinar el manejo de las prácticas agrícolas y la selección de los sitios de cultivos, entre otras (Saadat et al., 2011). El procesamiento de imágenes satelitales ha permitido conocer la variación espacio-temporal de las coberturas del suelo en diversas áreas del mundo (Rodríguez-Galiano y Chica-Rivas, 2014; Rawat y Kumar, 2015). Para ello, se han utilizado diversas fuentes de información remota, pero la más frecuente ha sido el satélite Landsat dado su alta resolución espacial y temporal y su cobertura y calidad de los datos registrados (Kolios y Stylios, 2013). Por ejemplo, en Australia se realizó un análisis multitemporal de la superficie cubierta por agua durante el período 1987-2014 mediante el procesamiento de imágenes satelitales Landsat 5 TM y 7 ETM (Mueller et al., 2016). En el NE de China, un área agrícola de gran importancia, el análisis de diversos índices espectrales calculados a partir de imágenes satelitales Landsat 5 TM, 7 ETM y 8 OLI-TIRS permitió conocer la variación temporal de las coberturas del suelo en un extenso período de tiempo (1986-2016), como así también obtener un mapa con excelente precisión de las mismas (Zhao et al., 2019). En la cuenca de la laguna Mar Chiquita (provincia de Buenos Aires, Argentina), la información provista por el satélite Landsat 5 y 7 permitió evaluar el cambio de área de los cuerpos de agua producto de las actividades humanas durante el período 1998-2008 (Booman et al., 2012). Por otro lado, este tipo de datos han sido aplicados para clasificar las coberturas del suelo en el SE de la Región Pampeana (Guerschman et al., 2003).

La cuenca del río Sauce Grande ha sido objeto de numerosas investigaciones centradas principalmente en la cuenca alta. Por ejemplo, Paoloni et al. (1972) y Luque

et al. (1979) realizaron estudios hidrológicos e hidrogeológicos mientras que Gil (2009) y Volonté (2018) estudiaron la hidrogeomorfología de este sector de la cuenca aplicado al riesgo de crecidas y su relación con las diversas actividades antropogénicas. La morfometría de este sector de la cuenca fue analizado por Gaspari et al. (2012) a partir de un modelo digital del terreno e imágenes satelitales. Por otro lado, Aduriz et al. (2003) caracterizaron los agrosistemas predominantes de la cuenca alta, considerándolas como fuente de contaminación del dique Paso de Las Piedras, mientras que Espósito et al. (2016) realizaron mediciones sobre el arroyo El Divisorio con el objetivo de determinar la influencia en la distribución de iones tóxicos (arsénico, flúor) y de nutrientes (fósforo y nitrógeno) en la eutrofización del embalse Paso de las Piedras. Estos dos últimos parámetros también fueron analizados por Orioli et al. (2008), quienes caracterizaron la calidad del agua del reservorio y de sus afluentes. Asimismo, en este sector de la cuenca se realizó un estudio sobre la variación espacio-temporal de los parámetros fisicoquímicos y de materia orgánica del agua superficial en cuatro sitios de muestreo sobre el cauce principal del río Sauce Grande (Álvarez et al., 2018), mientras que Fernandez (2010) estudió la dinámica limnológica y del fitoplancton del embalse y de sus afluentes. Por otra parte, se han realizado estudios sobre las diatomeas perifíticas (Vouilloud et al., 2005).

En la cuenca alta y media, Casado (2013) y Casado et al. (2016) evaluaron el efecto hidrológico del dique Paso de Las Piedras sobre el caudal, la temperatura y la morfología del río Sauce Grande aguas abajo del mismo. En la cuenca media y baja, las investigaciones se han centrado principalmente sobre laguna Sauce Grande. Desde el punto de vista turístico, Heit (2014) y Tumini Ercoli (2017), analizaron los diferentes atractivos turísticos naturales de la cuenca baja, destacando la importancia de este cuerpo de agua en el desarrollo económico del partido de Monte Hermoso. Por otro lado, Fornerón (2012) realizó un estudio integral de la hidrografía de la laguna en un período de sequía extrema y Carbone et al. (2015) analizaron el impacto de los eventos secos sobre la morfometría del cuerpo de agua y la producción agrícola en el área de influencia de la laguna. Desde el punto de vista biológico, Ferrer et al. (2012) caracterizaron el fitoplancton y el estado trófico de este cuerpo de agua durante el otoño de 2010, mientras que Cony (2018) realizó un estudio de similares características pero en período más amplio (abril 2012-julio 2015) y consideró el muestreo del río Sauce Grande en un sector cercano a su descarga en la laguna. La composición y abundancia del mesozooplancton durante el invierno y primavera del año 2010 fue descrito por Baleani et al. (2017), mientras que Alfonso et al. (2018) estudiaron el metabolismo ecosistémico. Seitz (2018) realizó un estudio sobre la

evolución geológica, geomorfológica y limnológica de lagunas pampeanas, incluyendo a la laguna Sauce Grande. Sin embargo, no existen estudios integrales en la cuenca del río Sauce Grande que demuestren la variación multitemporal de los principales recursos hídricos y las coberturas del suelo a partir de datos satelitales, de campo y en alta frecuencia, considerando la laguna Sauce Grande y el río homónimo hasta la descarga en la plataforma continental adyacente. Además, no se han realizado investigaciones acerca de cómo la variabilidad pluviométrica y las actividades antrópicas afectan a los mismos, como así también del nivel de vulnerabilidad eco-ambiental que presenta la cuenca del río Sauce Grande.

1.1. HIPÓTESIS DE TRABAJO

En la presente tesis se plantean tres hipótesis de trabajo: i) *“La variabilidad pluviométrica afecta la dinámica espacio-temporal de los principales recursos hídricos de la cuenca media y baja del río Sauce Grande, ii) El monitoreo en alta frecuencia permite caracterizar las fluctuaciones diarias del caudal del río, detectar fenómenos de circulación local en la laguna Sauce Grande de origen geomorfológico, como así también evaluar el efecto de la brisa de mar sobre los misma y iii) La topografía y las actividades antrópicas modifican la calidad del agua de los recursos hídricos y a su vez, estas últimas, exponen a la cuenca del río Sauce Grande a diferentes niveles de vulnerabilidad eco-ambiental”*.

1.2. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

El **objetivo general** de esta tesis es realizar un estudio integral de los recursos hídricos y las coberturas del suelo de la cuenca del río Sauce Grande. Para ello se propone, analizar el efecto de la variabilidad pluviométrica sobre la cobertura de agua y la morfometría de los principales recursos hídricos de la cuenca; evaluar el comportamiento espacio-temporal de los parámetros limnológicos sobre la hidrología de la cuenca media y baja y establecer su relación con las actividades antrópicas y la topografía de la cuenca. Finalmente, analizar las series de tiempo en alta frecuencia del caudal del río Sauce Grande en función de registros de precipitación diarios y sobre la laguna homónima para detectar la circulación atmosférica local, su origen y determinar si ingresa la brisa de mar sobre este cuerpo de agua.

Para ello se proponen los siguientes **objetivos específicos**:

- Analizar las anomalías climáticas de las principales variables meteorológicas del área de influencia de la cuenca del río Sauce Grande durante el período 1970-2017.

- Conocer la variación multitemporal del área del dique Paso de Las Piedras y la laguna Sauce Grande y establecer su relación con la variabilidad pluviométrica.
- Caracterizar las variaciones meteorológicas y limnológicas de la laguna Sauce a partir de mediciones de alta frecuencia mediante la utilización de una boya de monitoreo.
- Estudiar y determinar el origen de la circulación atmosférica local de la laguna Sauce Grande y establecer el momento y los efectos de ingreso de la brisa de mar sobre la misma.
- Comprender la dinámica del caudal del río Sauce Grande, su relación con la precipitación y analizar sus crecidas.
- Determinar la variación espacio-temporal de los parámetros limnológicos de los recursos hídricos de la cuenca media y baja del río Sauce Grande.
- Describir las coberturas del suelo *in situ* a partir de datos ópticos y de campo y entender su dinámica espacio-temporal.
- Establecer el nivel de vulnerabilidad eco-ambiental de la cuenca y definir estrategias de manejo sustentable del territorio.

Para cumplir con estos objetivos y verificar las hipótesis de trabajo se dividió la tesis en 8 capítulos en los cuales:

En el *Capítulo 1* se describe la temática general, los objetivos y las hipótesis de trabajo y la descripción del área de estudio;

En el *Capítulo 2* se realiza un estudio de las anomalías climáticas de la cuenca del río Sauce Grande y de los efectos de la precipitación sobre la variación espacio-temporal de la laguna Sauce Grande y el dique Paso de Las Piedras;

En el *Capítulo 3* se analizan las variaciones meteorológicas y limnológicas con mediciones en alta frecuencia de la laguna Sauce Grande y se realiza un análisis armónico. Además, se caracteriza la dinámica en alta frecuencia del caudal del río Sauce Grande y se describen los eventos de crecidas;

En el *Capítulo 4* se estudia la circulación atmosférica local de la laguna Sauce Grande, se determina su origen como así también se caracteriza el ingreso de la brisa de mar en el cuerpo de agua;

En el *Capítulo 5* se analiza el comportamiento espacio-temporal de las principales variables limnológicas a lo largo de los diferentes ríos y arroyos de la cuenca media y baja del río Sauce Grande y en la laguna homónima.

En el *Capítulo 6* se evalúa la efectividad de diferentes métodos de clasificación supervisados y no supervisados, utilizando dos conjunto de datos para la obtención de un mapa de coberturas del suelo *in situ*. Además, se analiza la variación espacio-temporal de las coberturas del suelo durante el período 2000-2016.

En el *Capítulo 7* se evalúa la vulnerabilidad eco-ambiental de la cuenca del río Sauce Grande a partir del cruce de dos matrices: una resultante de un modelo de simulación espacial (escenario óptimo) y otra de su delimitación a campo (*Capítulo 6*). A partir de ello, se diseñan estrategias sustentables de manejo del territorio orientadas a preservar la calidad ambiental, reducir los impactos negativos sobre el ambiente y fomentar la permanencia de las actividades económicas de la cuenca.

Finalmente, en el *Capítulo 8* se presentan las conclusiones finales del trabajo desarrollado.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio es la cuenca del río Sauce Grande ($38^{\circ} 1' - 38^{\circ} 58' S - 62^{\circ} 3' - 61^{\circ} 6' W$), localizada en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina) (Figura 1.1). Esta cuenca exorreica posee un área de 4856 km². Nace en el sistema serrano de Ventania (1243 msnm) y se prolonga en la llanura interserrana desembocando en el Océano Atlántico (Figura 1.1). Está formada por el río homónimo que es el principal afluente del dique Paso de las Piedras. El reservorio fue construido a comienzos de la década de 1970 y constituye la principal fuente de agua potable para las ciudades de Bahía Blanca y Punta Alta, abasteciendo a más de 500.000 habitantes, como así también es fuente de agua cruda para el polo industrial cercano (Casado, 2013). A partir de allí, el río Sauce Grande drena sus aguas hasta la laguna Sauce Grande y prosigue hasta la unión con el arroyo Las Mostazas, que en conjunto desembocan en el Océano Atlántico (Figura 1.1).

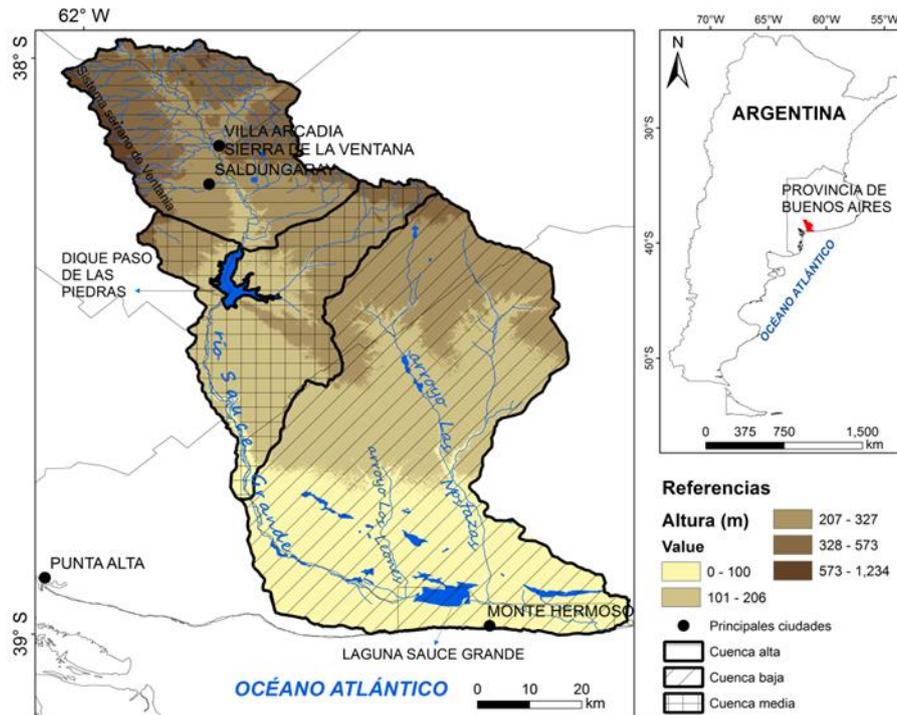


Figura 1.1. Ubicación, topografía y división espacial de la cuenca del río Sauce Grande.

Según Gil (2009), la cuenca se divide en tres sectores. La cuenca alta que se caracteriza por presentar las mayores elevaciones y la mayor densidad de drenaje. Tiene un área de $\approx 1020 \text{ km}^2$ y finaliza en el embalse dique Paso de Las Piedras. La cuenca media ($\approx 962 \text{ km}^2$) incluye el dique y se extiende hasta el sitio denominado Las Oscuras, donde el río presenta una cota de 60 m mientras que, la cuenca baja ($\approx 2630 \text{ km}^2$), se emplaza desde el punto anterior hasta la desembocadura del río Sauce Grande en el Océano Atlántico (Figura 1.1). En este sector de la cuenca se encuentra la laguna Sauce Grande que presenta un régimen permanente y es el cuerpo de agua más extenso de este sector. Está localizada en el partido de Monte Hermoso a 7 km de la ciudad cabecera (Fornerón, 2012) (Figura 1.1). El partido posee una población total de 6.499 habitantes (INDEC, 2010). La laguna presenta como principal atractivo turístico la pesca deportiva del pejerrey. Además, se realizan deportes náuticos y el avistaje de aves (Arnaudo y Corbella, 2013). Está originada por el embalsado natural del agua proveniente de la escorrentía y condicionada por la presencia de la Barrera Medanos Austral (Isla et al., 2001). Es una alargada depresión en sentido W-E y sus costa es de tosca con suaves declives, por lo general fangosas y con juncales emergentes raleados y no muy accesibles (Fornerón, 2012). El fondo es predominantemente de fango y de conchillas en su orilla Sur (Remes Lenicov y Colautti, 2003). Según Seitz (2018), la laguna se originó hace 3000 años por el

desarrollo de médanos costeros que desviaron la desembocadura del río Sauce Grande hacia el Este y encerraron un área deprimida donde se desarrolló la laguna (Seitz, 2018). Esta barrera se desarrolló en el Holoceno Medio como resultado del abundante sedimento litoral que migró hacia el interior del continente como consecuencia de las fluctuaciones del nivel del mar (Isla, 1998). El sedimento es poroso, de alta permeabilidad y está compuesto por arenas de granos redondeados a subredondeados, de tamaño uniforme y principalmente de arena fina y muy fina. La vegetación que la recubre es rala (Isla et al., 2001). Según el análisis morfométrico realizado por Fornerón (2012), la laguna Sauce Grande presenta un área de 21,5 km² por lo que se la considera un cuerpo de agua grande dado que supera los 2 km². El perímetro es 28,5 km mientras que su longitud máxima total es de 8 km y su ancho medio y máximo de 2,6 y 3,2 km, respectivamente (Fornerón, 2012).

El clima de la cuenca es semiárido-templado con una precipitación media anual de 750 mm en el norte y 560 mm en su extremo sur, concentrándose principalmente en primavera-verano. La temperatura media anual es 15,5 °C. Las sequías e inundaciones son frecuentes y constituyen uno de los fenómenos de mayor impacto sobre la actividad agrícola, la población y el ambiente (Aliaga, 2018). La principal actividad económica de la cuenca es la agricultura de secano con rotación de cultivos y pastoreo de ganado en pastizales naturales o semi-naturales. El trigo es el principal cultivo, seguido de la cebada y avena (SIIA, 2018). La producción agrícola ha experimentado cambios importantes en el uso de la tierra en los últimos años, con una diversificación de los productos primarios y nuevas alternativas productivas, como el cultivo de olivos, la vinificación y los cultivos aromáticos. El desarrollo turístico, especialmente el turismo ecológico y rural, es un importante motor de la actividad económica en la cuenca lo que ha generado un crecimiento significativo en las ciudades de la cuenca alta (Sierra de la Ventana, Villa Ventana y Saldungaray) (Zilio et al., 2019).

Según Rabassa (1982), la cuenca del río Sauce Grande presenta seis unidades geomorfológicas: las sierras, los niveles de piedemonte, la llanura, el valle del río Sauce Grande, los valles fluviales menores y los médanos costeros. Las sierras se localizan en la cuenca alta con numerosos afluentes que discurren en pequeños y profundos cañadones. Las ubicadas en el sector occidental presentan crestas con paredes rocosas muy abruptas mientras que, las orientales, son más bajas y redondeadas (Gil, 2009). Los niveles de piedemonte están cubiertos por loess y también se ubican en la cuenca alta con una pendiente de entre 2 y 7 ° entre la llanura

y las sierras. Por otro lado, la llanura se extiende a lo largo de la cuenca media y baja y está caracterizada por presentar una capa casi continua de depósitos eólicos que se extienden hasta el Océano Atlántico (Figura 1.2). El valle del río Sauce Grande está elaborado sobre un material sedimentario muy potente y a medida que el curso de agua atraviesa la llanura, ocupa un valle más amplio (Gil, 2009). Los valles fluviales menores están compuestos por cursos de agua intermitentes y son más frecuentes en la cuenca alta. La morfología de los valles es en forma de “V” en el sector más alto de la cuenca, mientras que a medida que el río drena sus aguas sobre la llanura, su forma es “U” o plano (Gil, 2009). Por último, los médanos costeros que caracterizan la mayor parte de costa de la provincia de Buenos Aires, se ubican paralelos a la costa. El tipo de suelo dominante en la cuenca es el Molisol y se encuentra principalmente a lo largo de la llanura. Son suelos oscuros, profundos ($\approx 1,6$ m) y ricos en materia orgánica. En los médanos costeros, el tipo de suelo es Entisol, caracterizados por una textura franco-arenosa con baja capacidad de retención de humedad y expuestos a erosión eólica.

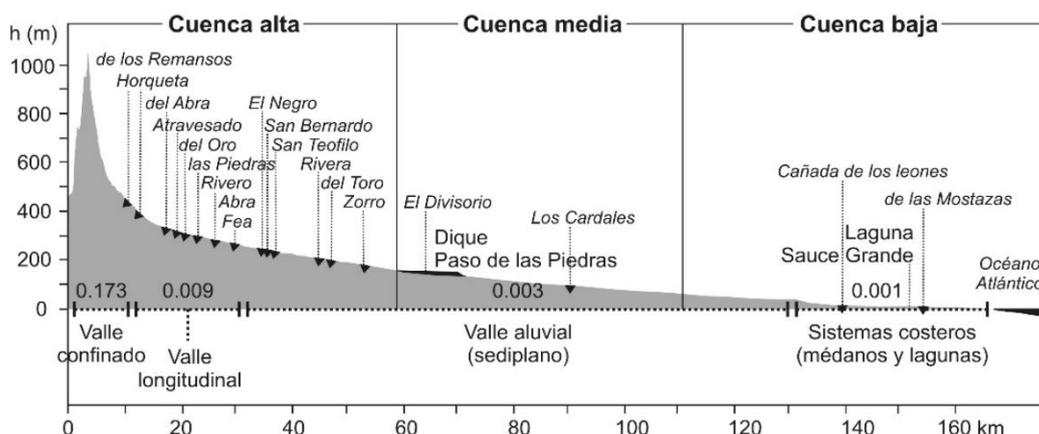


Figura 1.2. Perfil de elevación de la cuenca del río Sauce Grande (Fuente: Casado, 2013).

La cuenca tiene un comité que funciona como un sistema administrativo propio. El mismo fue creado en 2001 y actualmente está constituido por representantes de autoridades políticas, organizaciones no gubernamentales, productores y asociaciones vecinales. Su principal objetivo es el de articular y ejecutar las acciones necesarias para lograr el uso eficiente, racional y responsable del recurso hídrico. Además, la cuenca tiene como ente principal a la Autoridad del Agua (ADA), que es el ente encargado de regular el uso extractivo de agua para el riego, la ganadería, las actividades industriales y la provisión de agua potable (Zilio et al., 2019). Por lo tanto, los usuarios deben obtener un permiso de ADA para llevar a cabo la utilización superficial o subterránea del agua. Para obtener la autorización por parte de este

organismo, las obras de infraestructura no pueden representar un obstáculo para el caudal del río y tampoco una amenaza para la calidad del agua de los recursos hídricos de la cuenca. Por otro lado, los usuarios deben abonar una tarifa por el uso del agua que se calcula en función del tipo de usuario, el volumen de agua utilizada y el costo de los estudios y trabajos destinados a monitorear y conservar el recurso. Otro actor involucrado en la cuenca es la empresa Aguas Bonaerenses SA (ABSA) que constituye el principal concesionario de este espacio. La misma es la encargada de tomar el agua del dique Paso de las Piedras para suministrarlos a las ciudades de Bahía Blanca y Punta Alta, como así también el agua necesaria para el polo industrial de Bahía Blanca, generando en muchas ocasiones conflictos de intereses entre los diferentes actores de la cuenca en momentos de bajo nivel de agua en el embalse (Zilio et al., 2019).

CAPÍTULO 2

ANOMALÍAS CLIMÁTICAS DEL ÁREA DE INFLUENCIA DE LA CUENCA DEL RÍO SAUCE GRANDE

1. INTRODUCCIÓN

La variabilidad climática depende de numerosos factores dado que es producto de eventos meteorológicos que se producen en diferentes escalas espaciales y temporales (décadas, años, estaciones). Es una fluctuación a corto plazo dentro de un cambio climático de mayor duración (Houghton, 2002). Su estudio es fundamental ya que permite comprender el funcionamiento de los sistemas naturales y su impacto sobre las actividades humanas (Davey et al., 2014; Ferrelli, 2016a). En América del Sur, el fenómeno “El Niño Oscilación Sur” (ENOS) es un factor importante en la variabilidad climática interanual (Grimm, 2011). Por ejemplo, en el caso de las precipitaciones, numerosos estudios han demostrado que en la Región Pampeana, durante la fase negativa del ENOS (El Niño), las precipitaciones aumentan, mientras que durante la positiva (La Niña) se producen extensos períodos de sequía (Grondona, 1997; Aliaga et al., 2017).

En los últimos 50 años, los parámetros más utilizados en el estudio de la variabilidad climática son la temperatura, la precipitación y el viento. Estos parámetros han sufrido cambios a escala mundial y regional. La temperatura ha experimentado mundialmente un aumento de 0,8 °C durante 1880-2012 (Panel Intergubernamental del Cambio Climático, IPCC, 2013). En Argentina, el aumento encontrado durante 1960 y 2010 fue de hasta 0,5 °C en la mayor parte del territorio, excepto en la Patagonia, donde el aumento superó 1 °C (IPCC, 2013). En el caso de las precipitaciones, la tendencia es positiva en la mayor parte del mundo, pero su patrón de distribución espacial es más complejo en comparación con lo que ocurre con la temperatura (Chen et al., 2018). En Argentina, la precipitación aumentó en casi todo el país durante el período 1960-2010. Los incrementos de más de 100 mm tuvieron efectos en algunas zonas semiáridas dado que se aceleró el proceso de agriculturización y se modificaron las características productivas (Re y Barros, 2009, Penalba y Robledo, 2010; Volante, 2014). Además, se produjeron importantes incrementos en los rendimientos de los cultivos de secano (Magrin et al., 2005).

Por otra parte, los estudios de la variabilidad en la velocidad del viento se han realizado fundamentalmente por sus implicancias biológicas (Mianzán y Zamponi, 1988; Brendel et al., 2017a) y por su uso para la generación de energía (Pérez-Collazo et al., 2015; Kumar y Chatterjee, 2016; Genchi et al., 2016). A escala mundial, la

tendencia del viento es principalmente negativa (Guo et al., 2011; Kim y Paik, 2015), similarmente a lo que ocurre en la Región Pampeana (Aliaga, 2018). Además, la disminución de la velocidad del viento a lo largo de la costa de Monte Hermoso (provincia de Buenos Aires, Argentina) fue uno de los factores claves para comprender la ausencia de una especie de medusa que genera severos efectos sobre la salud de los turistas (Brendel et al., 2017a).

Las rápidas modificaciones que el clima está manifestando en todo el mundo son el objeto de estudio de numerosas investigaciones (Chen et al., 2018) debido a los impactos que genera sobre la actividad agrícola, la salud humana, la estabilidad política regional, las coberturas del suelo, entre otros (Ferrelli, 2017a). En este sentido, las actividades relacionadas con la agricultura, como el riego, la fertilización o la selección del sitio de cultivo se ven altamente afectadas por variaciones en la precipitación y temperatura (Fernández-Long et al., 2013). La variabilidad climática tiene consecuencias importantes en la accesibilidad a agua potable, la provisión de energía, desplazamiento y pérdidas de animales y recursos pesqueros (Houghton, 1993; Ferrelli et al., 2017b).

La Región Pampeana presenta un gran número de lagunas distribuidas a lo largo de su vasta superficie. La mayoría de ellas son someras. Dicha característica genera que sean más sensibles a las variaciones meteorológicas a corto plazo. En este aspecto, el análisis de la morfometría y de las condiciones de sitio brinda información útil de los mecanismos de respuesta de los sistemas acuáticos a la variabilidad y cambio climático (Williamson et al., 2009). Estos cuerpos de agua son importantes porque constituyen un hábitat singular para la flora y fauna característica de los humedales de la región. Además, sirven de moderadores del régimen fluvial al almacenar el exceso hídrico y también cumplen un papel importante en las actividades pecuarias y turísticas, porque constituyen la fuente de desarrollo de muchas localidades (Geraldini et al., 2011). En áreas de llanura la dinámica de los recursos hídricos se relaciona directamente con la regularidad, intensidad y frecuencia pluviométrica (Aliaga, 2018). Los cuerpos de agua superficiales representan la cobertura de la tierra que más sufre los impactos de ese fenómeno. La alternancia de eventos secos y húmedos generan cambios significativos en gran parte de ellos, modificando su caudal y servicios ecosistémicos (Palmer et al., 2008). Se han realizado numerosos estudios sobre los efectos de estos ciclos en diversas cuencas hidrográficas (He et al., 2015; Zhang et al., 2015; Brendel et al., 2017b; Scordo et al., 2018b). Los objetivos de las investigaciones en estos espacios se han centrado, generalmente, en los efectos de los períodos secos y húmedos sobre los cursos y

cuerpos de agua (Carbone et al., 2015; Brendel et al., 2017c; Mendoza-Cariño et al., 2018). Dependiendo de la extensión de las cuencas hidrográficas, estas pueden presentar diferentes respuestas a la variabilidad pluviométrica y si a ello se le suma que pueden formar parte de varias unidades administrativas (partidos, municipios), provincias o países, las consecuencias en las diversas comunidades involucradas pueden ser diferentes.

Teniendo en cuenta las consecuencias socio-económicas y ambientales de la variabilidad climática y, fundamentalmente la pluviométrica sobre los cuerpos de agua de las cuencas hidrográficas, los objetivos de este capítulo son: i) analizar las principales variables meteorológicas del área de influencia de la cuenca del río Sauce Grande y ii) evaluar los efectos de la precipitación sobre la variación morfométrica y espacio-temporal de los dos principales cuerpos de agua de la cuenca. Los resultados obtenidos permitirán comprender la dinámica de los recursos hídricos y de las coberturas del suelo ante períodos pluviométricamente diferentes, como así también generar información relevante para los tomadores de decisión de la cuenca.

2. MÉTODO DE TRABAJO

2.1. Información climática

Para el estudio de la variabilidad climática del área de influencia de la cuenca del río Sauce Grande, se utilizaron datos meteorológicos mensuales de tres estaciones: Coronel Suárez, Coronel Pringles y Bahía Blanca (Figura 2.1). Estos fueron cedidos por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Si bien las estaciones meteorológicas no se encuentran dentro del límite hidrográfico de la cuenca, ellas se seleccionaron dado que son las más próximas a la cuenca y presentan los períodos más extensos de datos. De esta manera, Coronel Suárez se utilizó para caracterizar el sector norte, mientras que Coronel Pringles y Bahía Blanca para caracterizar el sector centro y sur, respectivamente.

Las variables utilizadas fueron temperatura media del aire (°C), dirección e intensidad de viento (km/h) y precipitación (mm). El período de estudio fue variable según cada parámetro. En el caso de la temperatura y la precipitación se utilizó el período 1960-2017 para las estaciones Coronel Suárez y Bahía Blanca, mientras que el período 1994-2017 para Coronel Pringles. Para analizar la velocidad del viento, se consideró el período 1960-2017 para la estación Bahía Blanca, 1981-2017 para Coronel Suárez y 2008-2017 para Coronel Pringles, mientras que para el estudio de la dirección del viento se consideraron períodos más cortos por falta de mediciones. Por

lo tanto, los períodos analizados corresponden a 1981-2010 (Bahía Blanca) y 1991-2010 (Coronel Suárez). No se obtuvieron datos de dirección de viento en la estación Coronel Pringles.

Se analizó la tendencia de las variables utilizando la prueba no paramétrica de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall 1975) y el estimador de pendiente de Sen (1968) para cuantificar la magnitud de las variaciones de cada parámetro. La utilización del test de Mann-Kendall para una serie de n datos independientes e idénticamente distribuidos supone que la hipótesis nula no debe ser rechazada. La hipótesis nula (H_0) y alterna (H_a) para cada una de las estaciones de análisis son: H_0 : no se presenta una tendencia lineal en la serie; H_a : hay una tendencia lineal en la serie. La prueba de Mann Kendall se mide con el estadístico Tau-b de Kendall. Si dicho valor es positivo, entonces la serie presenta una tendencia positiva y si ese valor es negativo, la serie posee una tendencia negativa. La tendencia es estadísticamente significativa si el valor de p es $< 0,05$. Esta metodología fue aplicada con el software R Studio mediante la utilización del paquete Trend (Pohlert, 2017) recientemente utilizado en estudios climatológicos (Brendel et al., 2017c; Shrestha et al., 2017; Ferrelli et al., 2019). Por último, se calcularon las anomalías anuales de cada variable.

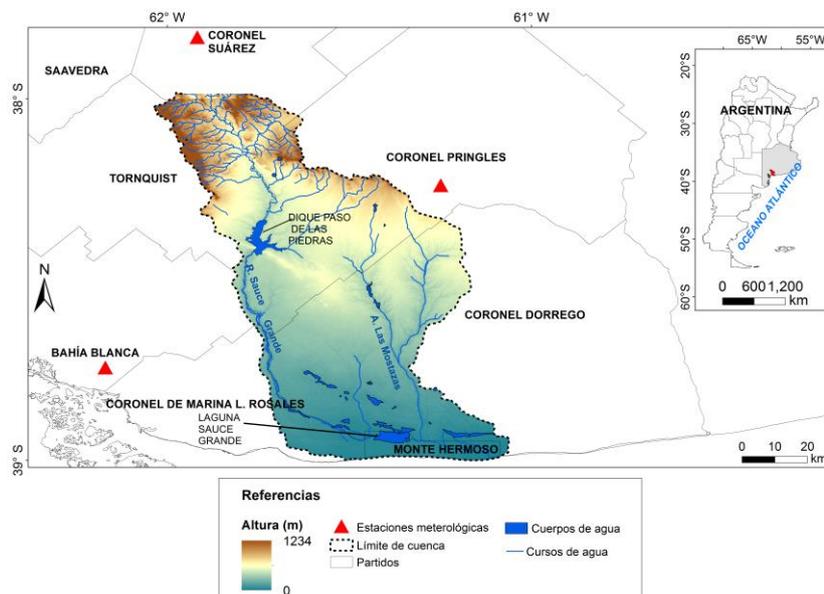


Figura 2.1. Localización de las estaciones meteorológicas utilizadas e hidrología de la cuenca del río Sauce Grande.

2.2. Relación entre la precipitación y la extensión areal de los cuerpos de agua

El estudio de la correlación entre la precipitación y la variación espacio-temporal del área de la laguna Sauce Grande (LSG, Figura 2.1) y el dique Paso de las

Piedras (DPP, Figura 2.1), se calculó a partir del índice de correlación de Pearson con un $\alpha < 0,01$. Además, se realizó un análisis de regresión entre ambas variables. Los datos de precipitación anual fueron analizados durante el período 1987-2017 y correspondieron a las estaciones meteorológicas de Bahía Blanca y Coronel Suárez. Dada su cercanía y la extensión de la serie de tiempo, la primera se utilizó para evaluar el grado de correlación entre la precipitación y la extensión areal de la LSG, mientras que la segunda fue utilizada para analizar esa relación en el DPP.

El cálculo de la variación espacio-temporal del área de ambos cuerpos de agua, se realizó con el procesamiento de 26 imágenes satelitales LANDSAT 5 TM, 7 ETM+ y 8 OLI-TIRS obtenidas del *United States Geological Survey* (USGS, Estados Unidos) para el período 1988-2017 (Tabla 2.1). Las imágenes corresponden a días despejados y se procesaron las correspondientes al mes de enero, dado que durante ese mes hay mayor probabilidad de trabajar con cielos despejados. En el caso de las imágenes del mes de enero que presentaban nubes, se optó por utilizar las pertenecientes al mes de febrero. Las mismas fueron corregidas geométrica, radiométrica y atmosféricamente con en el software ENVI 5.1 y siguiendo la metodología descrita en los Capítulos 4 y 6.

Tabla 2.1. Descripción de las imágenes satelitales utilizadas.

Fecha de la imagen satelital	Fuente	Descripción
01/01/1988	USGS	LM52260871988001FFF03
04/02/1989	USGS	LM52260871989035FFF03
22/01/1990	USGS	LM52260871990022FFF03
25/01/1991	USGS	LM52260871991025FFF03
22/12/1995	USGS	LT52260871996039CUB01
28/01/1998	USGS	LT52260871998028COA00
15/01/1999	USGS	LT52260871999015COA00
02/01/2000	USGS	LT52260872000002CUB00
04/01/2001	USGS	LT52260872001004COA00
07/01/2002	USGS	LT52260872002007COA00
18/01/2003	USGS	LE72260872003018EDC00
05/01/2004	USGS	LE72260872004005ASN01
07/01/2005	USGS	LE72260872005007EDC00
10/01/2006	USGS	LE72260872006010EDC00
22/02/2007	USGS	LT52260872007053CUB00
01/02/2008	USGS	LE72260872008032EDC00
27/02/2009	USGS	LT52260872009058COA00
05/01/2010	USGS	LE72260872010005EDC00
08/01/2011	USGS	LE72260872011008EDC00
28/02/2012	USGS	LE72260872012059EDC00
14/02/2013	USGS	LE72260872013045EDC00
08/01/2014	USGS	LC82260872014008LGN00
12/02/2015	USGS	LC82260872015043LGN00
14/01/2016	USGS	LC82260872016014LGN00
16/01/2017	USGS	LC82260872017016LGN01
19/01/2018	USGS	LC82260872018019LGN00

El área de los cuerpos de agua se calculó a partir del cálculo de diversos índices espectrales detallados en el Capítulo 6. Por otra parte, con el objetivo de analizar el efecto de los eventos secos y húmedos sobre la morfometría de los cuerpos de agua, se seleccionaron años pluviométricamente diferentes y se calcularon diversos parámetros morfométricos de la LSG y del DPP a partir de la utilización de las imágenes satelitales Landsat descritas en la Tabla 2.1. Estos fueron: área (km²), perímetro (km), longitud máxima total (LMT), orientación de la LMT (OLMT), ancho máximo (Amax), ancho medio (Amed) y desarrollo de línea de costa (DLC) (Hutchinson, 1957).

3. RESULTADOS

Como fue mencionado en la metodología, el área de influencia de la cuenca del río Sauce Grande fue dividida en tres sectores en función de la distribución de las estaciones meteorológicas. El sector norte, se caracterizó a partir de la estación Coronel Suárez mientras que, para el sector centro y sur, se utilizaron las estaciones Coronel Pringles y Bahía Blanca, respectivamente.

3.1. Temperatura del aire

3.1.1. Sector norte

La temperatura media durante el período de estudio (1960-2017) fue 13,6 °C con un máximo de 14,9 °C en 2009 y dos mínimos de 12,7 °C en 1964 y 1984 (Figura 2.2a). Esta variable presentó una marcada diferenciación estacional registrando los mínimos valores durante el mes de julio (6,2 °C) y los máximos durante el mes de enero (21,2 °C) (Figura 2.2b). Durante los 58 años analizados, la temperatura presentó una tendencia positiva y estadísticamente significativa ($p = 0,03858$) aumentando 0,5 °C durante 1960-2017. Desde el año 1960 a 2007 (Figura 2.2c), se observó alternancia de años con anomalías positivas y negativas (-1 °C a 0,8 °C) mientras que, a partir de 2008 y durante nueve años consecutivos, las anomalías de temperatura fueron positivas (0,1 a 1,2 °C) (Figura 2.2c).

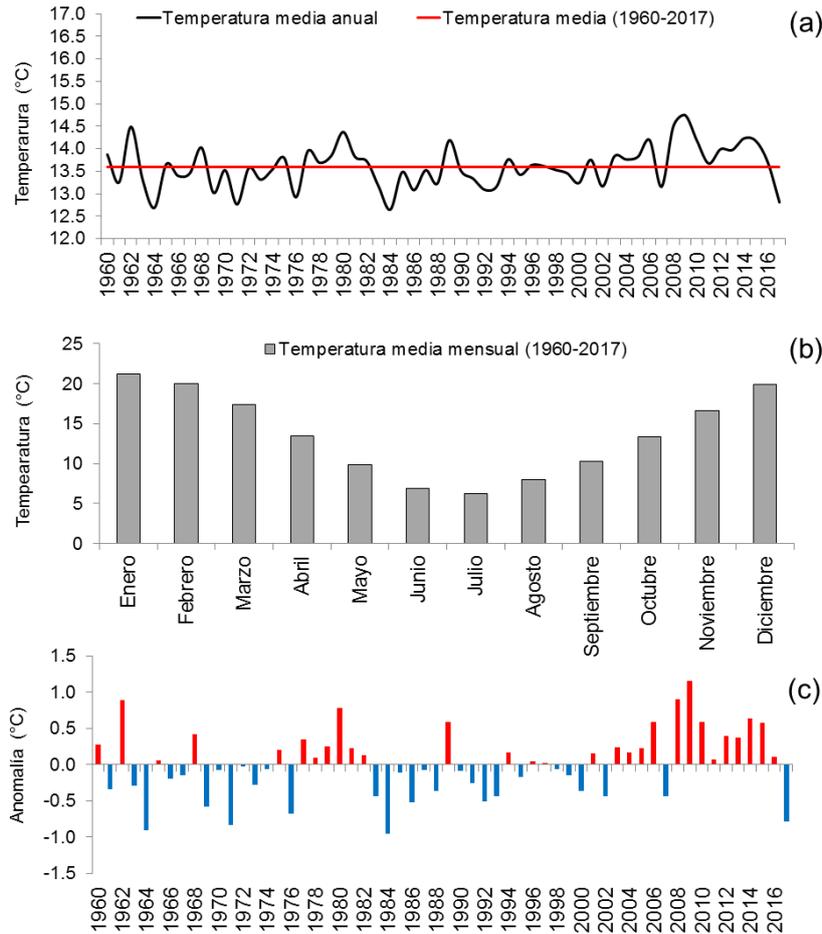


Figura 2.2. Series de tiempo de temperatura del aire en el sector norte (estación Coronel Suárez). a) Temperatura media anual y promedio histórico, b) temperatura media mensual y c) anomalías.

3.1.2. Sector centro

El valor medio de temperatura en este sector fue 13,9 °C (1994-2017), siendo mínima en 2007 (13,1 °C) y máxima en 2008 y 2017 (14,5 °C) (Figura 2.3a). Similarmente al sector norte, el sector centro evidenció una marcada estacionalidad térmica registrando los valores mínimos en julio (6,9 °C) y los máximos en enero (21,5 °C) (Figura 2.3b).

Por otro lado, la tendencia de la temperatura media anual fue positiva y estadísticamente significativa ($p = 0,001846$). Este parámetro aumentó 0,7 °C durante los 24 años analizados y además se observaron dos períodos distintos en la evolución de la temperatura. Desde 1994 hasta 2007 las anomalías fueron mayormente negativas (-0,1 a -0,8 °C) y desde 2008 hasta 2017 fueron positivas (0,1 a 0,6 °C), indicando un claro calentamiento de este sector (Figura 2.3c).

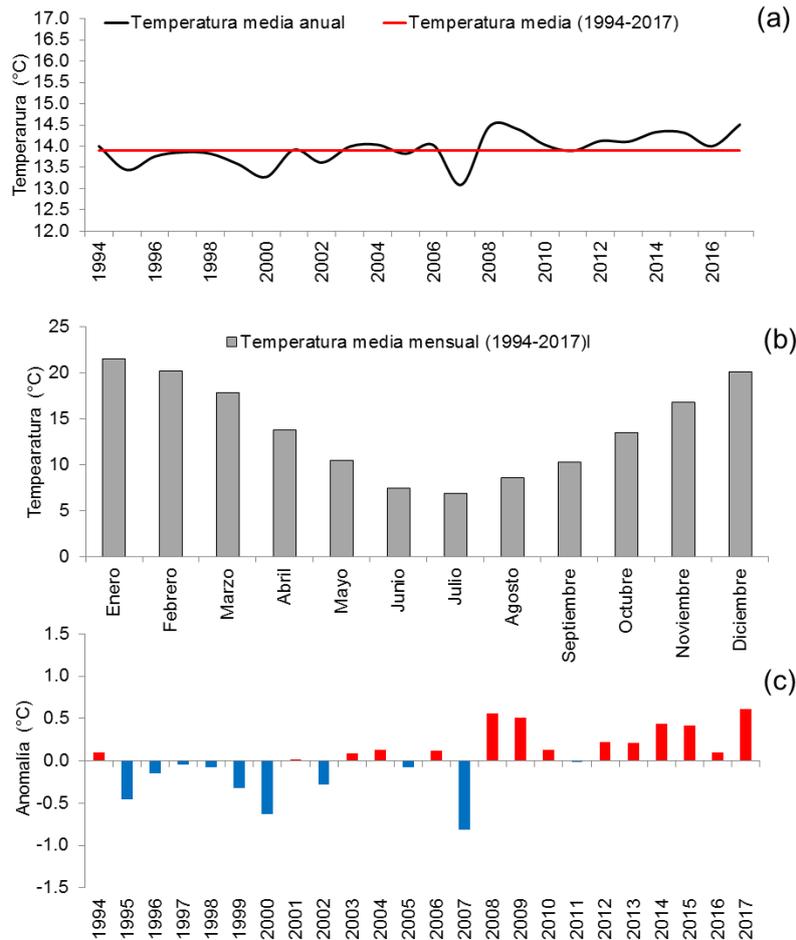


Figura 2.3. Series de tiempo de temperatura del aire en el sector centro (estación Coronel Pringles). a) Temperatura media anual y promedio histórico, b) temperatura media mensual y c) anomalías.

3.1.3. Sector sur

En el sector sur, la temperatura media fue 15,3 °C (1960-2017) con máximos en 2009, 2012 y 2013 (16,1 °C) y un mínimo en 1964 (14 °C) (Figura 2.4a). Similarmente a los dos sectores descritos anteriormente, este parámetro también presentó una clara variación estacional, con registros máximos en enero (23,6 °C) y mínimos en julio (7,7 °C) (Figura 2.4b). En esta zona la tendencia de la temperatura media anual fue positiva y estadísticamente significativa ($p = 0,0001086$), registrando el mayor aumento de todas las estaciones analizadas (0,8 °C).

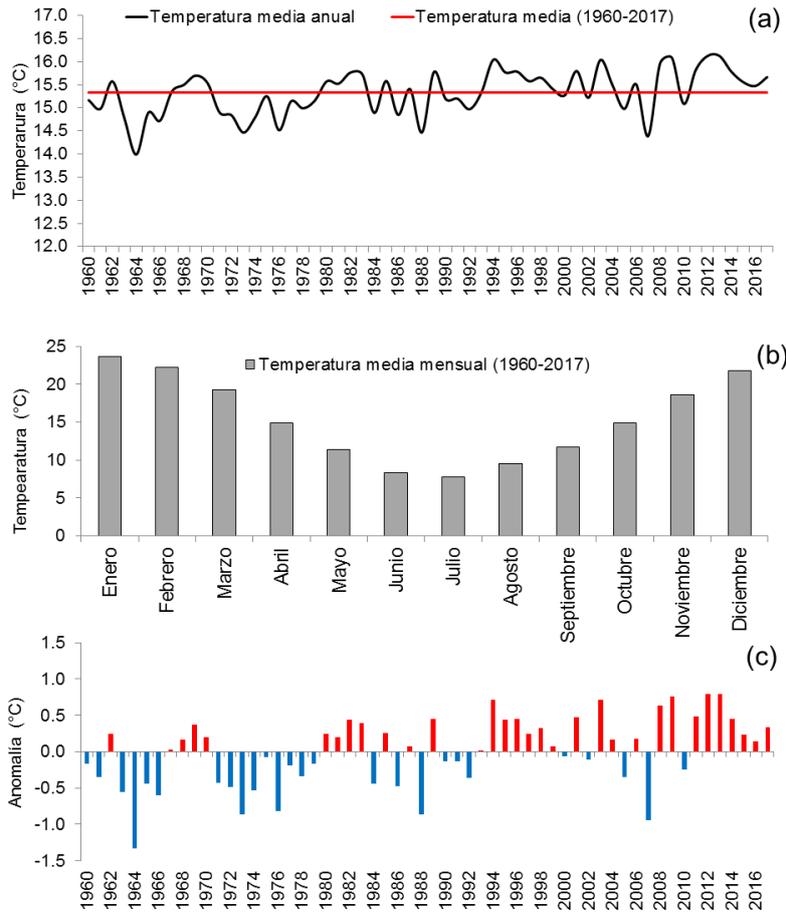


Figura 2.4. Series de tiempo de temperatura del aire en el sector sur (estación Bahía Blanca). a) Temperatura media anual y promedio histórico, b) temperatura media mensual y c) anomalías.

Se registraron tres períodos de anomalías distintos. El primero de ellos, se extendió desde 1960 a 1979 con anomalías principalmente negativas. El segundo período ocurrió desde 1980 a 1993 con alternancia de anomalías positivas y negativas de temperatura y finalmente desde 1994 hasta el 2017 predominaron las anomalías positivas (Figura 2.4c).

3.2. Viento

3.2.1. Sector norte

La velocidad media del viento en este sector fue 13,2 km/h (1981-2017) con un mínimo de 9,6 km/h en el año 2012 y un máximo de 15,2 km/h en 1981, 1998 y 2001 (Figura 2.5a). Esta variable también presentó, como la precipitación y la temperatura, una marcada estacionalidad. La primavera es la estación más ventosa (valor medio de 15 km/h), mientras que, en el otoño, se observaron los menores valores medios (11 km/h) (Figura 2.5b).

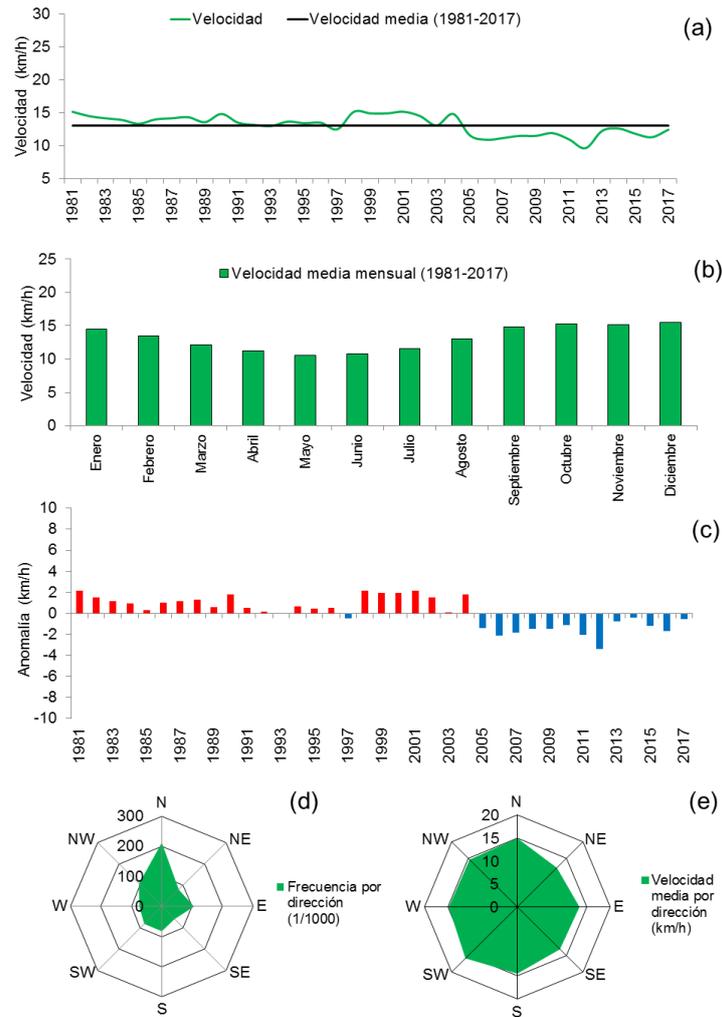


Figura 2.5. Series de tiempo de viento en el sector norte (estación Coronel Suárez). a) Velocidad del viento anual y valor medio, b) velocidad media mensual, c) anomalía anual, d) frecuencia por dirección y e) velocidad media por dirección.

La tendencia de esta variable fue negativa y estadísticamente significativa ($p = 0,0001323$). En el período 1981-2017, la velocidad del viento disminuyó $-3,3$ km/h. Este parámetro registró dos períodos de anomalías claramente diferenciados. El primero se extendió desde 1981 a 2004, con anomalías positivas (0,1 a 2 km/h), mientras que el segundo desde 2005 a 2017 con anomalías negativas en todos los años ($-0,4$ a $-3,4$ km/h) (Figura 2.5c). La dirección predominante del viento fue del N seguida del NW (Figura 2.5c) y los vientos más fuertes provienen de sector SW y N (15,8 y 15 km/h, respectivamente) (Figura 2.5d).

3.2.2. Sector centro

La velocidad media del viento fue 11,1 km/h (período 2008-2017) (Figura 2.6a). La máxima velocidad media fue en el año 2008 (16 km/h) y la mínima en 2015 y 2016 (9,1 km/h). Similarmente al sector norte, la primavera es la estación con mayor velocidad de viento (12,4 km/h) mientras que el otoño, se caracteriza por las mínimas velocidades (9,7 km/h) (Figura 2.6b).

El viento también disminuyó en este sector. La tendencia fue negativa y estadísticamente significativa ($p = 0,01158$) con una reducción de -5 km/h durante 2008-2017. Finalmente, se detectaron dos períodos con diferente evolución de esta variable. En los años 2008 y 2009, las anomalías fueron positivas (3,9 a 5 km/h) y desde 2010 hasta 2017 fueron negativas con velocidades que oscilaron entre -0,4 y -1,9 km/h (Figura 2.6c).

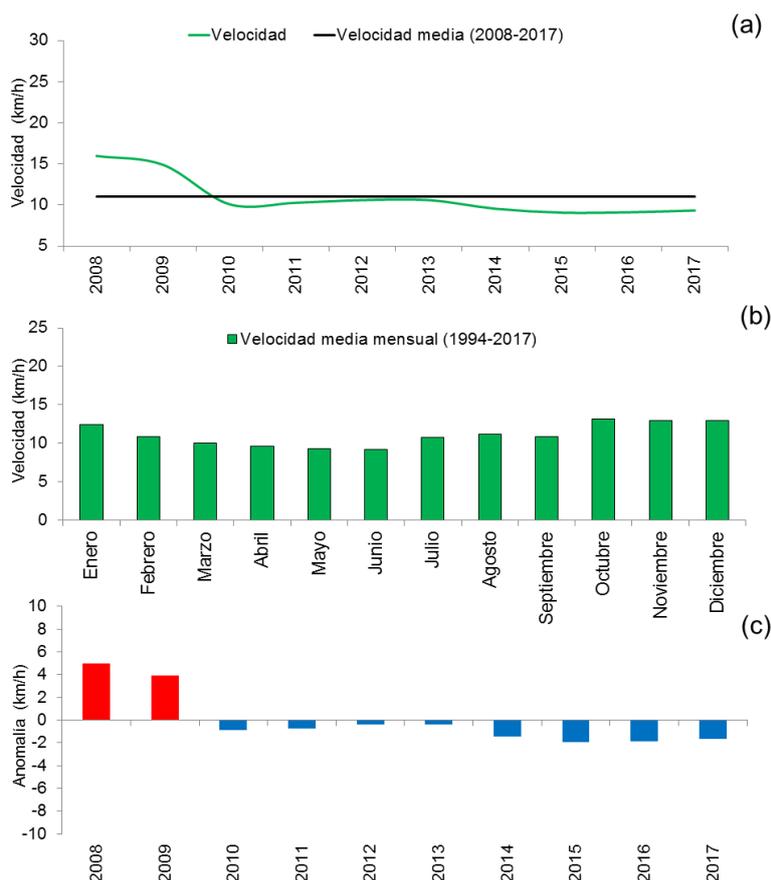


Figura 2.6. Series de tiempo de viento en el sector centro (estación Coronel Pringles). a) Velocidad del viento anual y valor medio, b) velocidad media mensual y c) anomalías.

3.2.3. Sector sur

Este sector presentó la mayor velocidad media del viento de todo el área de estudio (20,8 km/h) (1960-2017), con un mínimo de 12,8 km/h en 1964 y un máximo de 27,5 km/h en 1980 (Figura 2.7a). A diferencia de lo ocurrido en las zonas norte y centro, el verano es la estación más ventosa (22,8 km/h). En toda la región el otoño presenta las menores velocidades del viento. En este sector fue 9,7 km/h (Figura 2.7b).

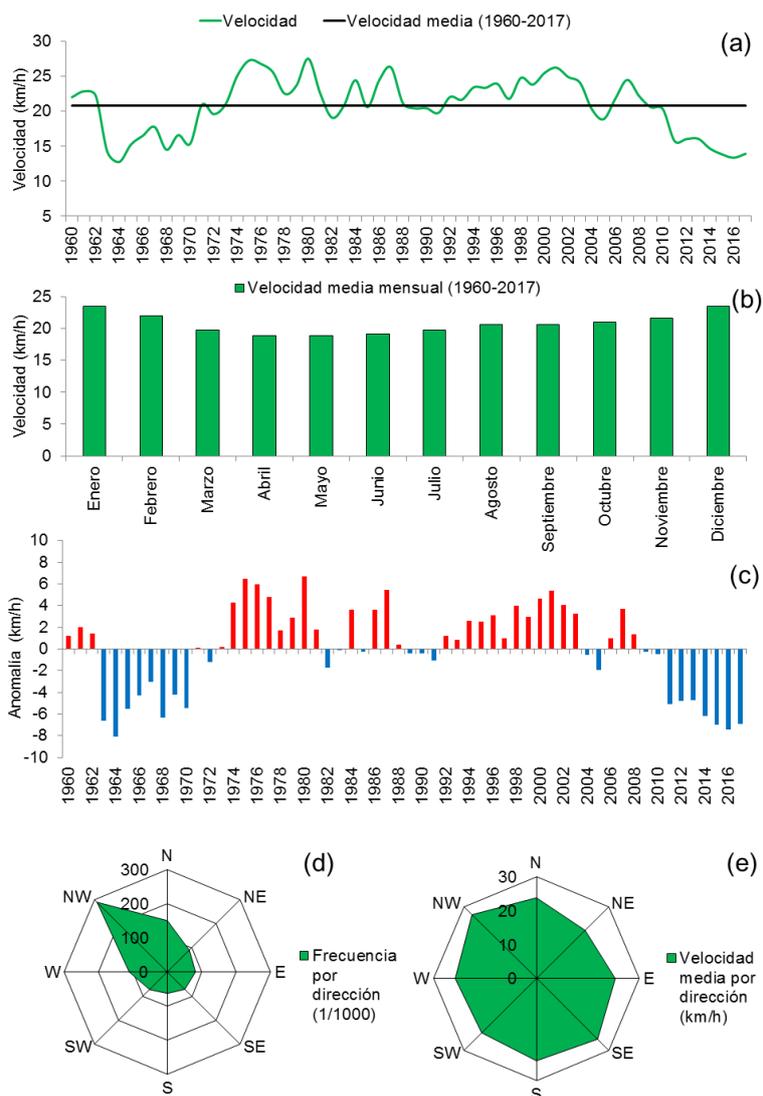


Figura 2.7. Series de tiempo de viento en el sector sur (estación Bahía Blanca). a) Velocidad del viento anual y valor medio, b) velocidad media mensual, c) anomalías, d) frecuencia por dirección y e) velocidad media por dirección.

La tendencia fue negativa, al igual que en las ocurrido en las dos estaciones analizadas anteriormente. La disminución fue -1 km/h y no presentó significancia

estadística ($p = 0,6482$). Sin embargo, al analizar las anomalías se observaron tres períodos diferentes (Figura 2.7c). De 1960 a 1974, las anomalías fueron predominantemente negativas y desde 1974 a 2008 fueron principalmente positivas. Entre 2009 a 2017 se registró un cambio de tendencia con respecto al período anterior y las anomalías fueron negativas. En este último período, las anomalías del viento fluctuaron entre $-0,2$ a $-7,4$ km/h y fue considerado el ciclo más importante dado que los valores negativos persistieron durante nueve años consecutivos (Figura 2.7c). El viento más frecuente fue del NW y el de mayor velocidad media ($26,6$ km/h) (Figura 2.7c y 2.7d). La dirección S fue la que presentó la menor frecuencia.

3.3. Precipitación

3.3.1. Sector norte

Durante el período 1960-2017, el promedio de la precipitación anual fue 784 mm. El menor registro de precipitación, se registró en el año 1962 (307 mm) seguido de los años 2008 y 2011 (453 y 472 mm, respectivamente), mientras que el máximo se presentó en el año 1985 (1222 mm) (Figura 2.8a). La precipitación de los años 1978 y 2014 estuvo muy cercano al valor máximo (1166 y 1139 mm, respectivamente). Esta variable presentó, similarmente a la temperatura, diferencias notables a escala estacional. El verano es la estación más lluviosa, con un promedio de 261 mm, mientras que las menores precipitaciones ocurren en invierno (87 mm). El otoño presenta un valor medio de 209 mm y la primavera de 225 mm (Figura 2.8b).

La precipitación mostró una tendencia positiva pero no fue estadísticamente significativa ($p = 0,7679$). Esta aumentó 42 mm durante los 58 años analizados. En la serie de tiempo se definieron cuatro períodos pluviométricamente diferentes. El primero se extendió desde 1960 hasta 1974, con anomalías predominantemente negativas (-33 a -476 mm), mientras que el segundo, con anomalías mayormente positivas, ocurrió desde 1975 a 1994 (40 a 438 mm). El tercero, se desarrolló entre 1995 a 2013 con alternancia de anomalías positivas y negativas pero con una clara tendencia a la sequía ($-4,1$ a -330 mm). Desde 2014 a 2017, las anomalías fueron positivas (37 a 355 mm) (Figura 2.8c).

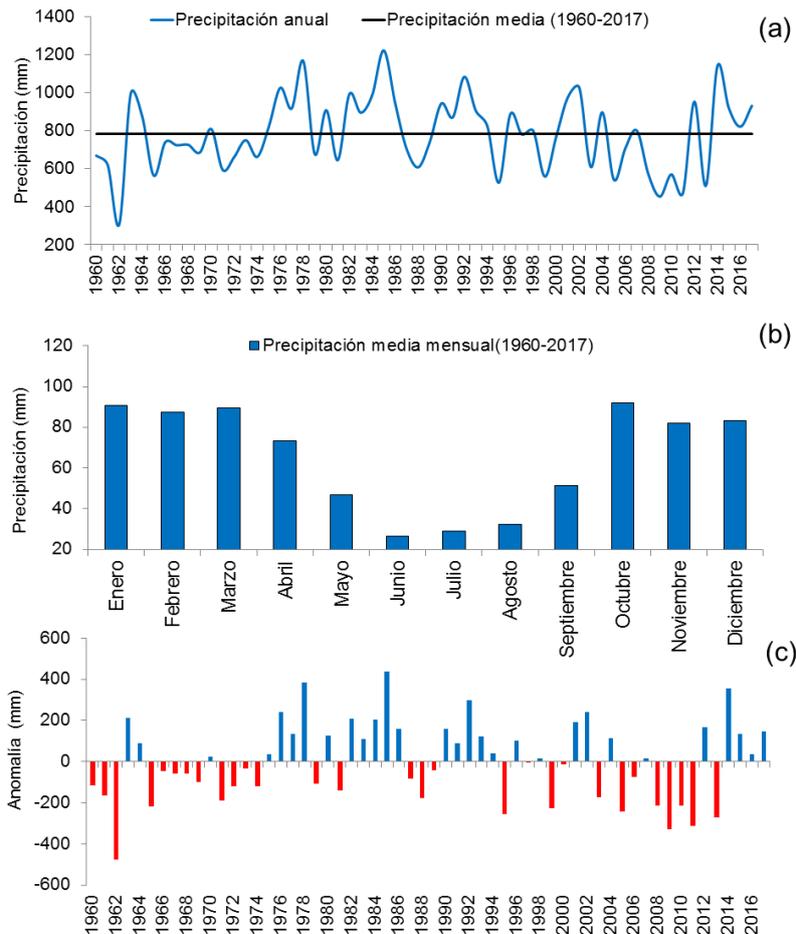


Figura 2.8. Series de tiempo de precipitación en el sector norte (estación Coronel Suárez). a) Precipitación anual y promedio histórico, b) precipitación media mensual y c) anomalías.

3.3.2. Sector centro

El promedio de precipitación anual fue 766 mm (1994-2017). La menor precipitación se registró en el año 2009 (497 mm) y fue máxima en 2014 (1230 mm) (Figura 2.9a). Como en el sector norte, la precipitación mostró una marcada fluctuación estacional siendo mayor en el verano (254 mm) y menor en el invierno (99 mm) (Figura 2.9b).

La tendencia de esta variable fue negativa, mínima (-6 mm durante el período 1994-2017) y no presentó evidencia estadística ($p = 0,785$). Desde 1994 hasta 2002 hubo alternancia de anomalías positivas y negativas, pero con una moderada tendencia a la humedad (14,9 a 352 mm). Durante 2003 y 2013, las anomalías fueron principalmente negativas (-18,6 a -269 mm), mientras que desde 2014 a 2017 predominaron las positivas (29,7 a 464,2 mm), excepto en 2016 (-51 mm). Finalmente,

las anomalías positivas fueron más extremas que las negativas (464 mm vs -269 mm) (Figura 2.9c).

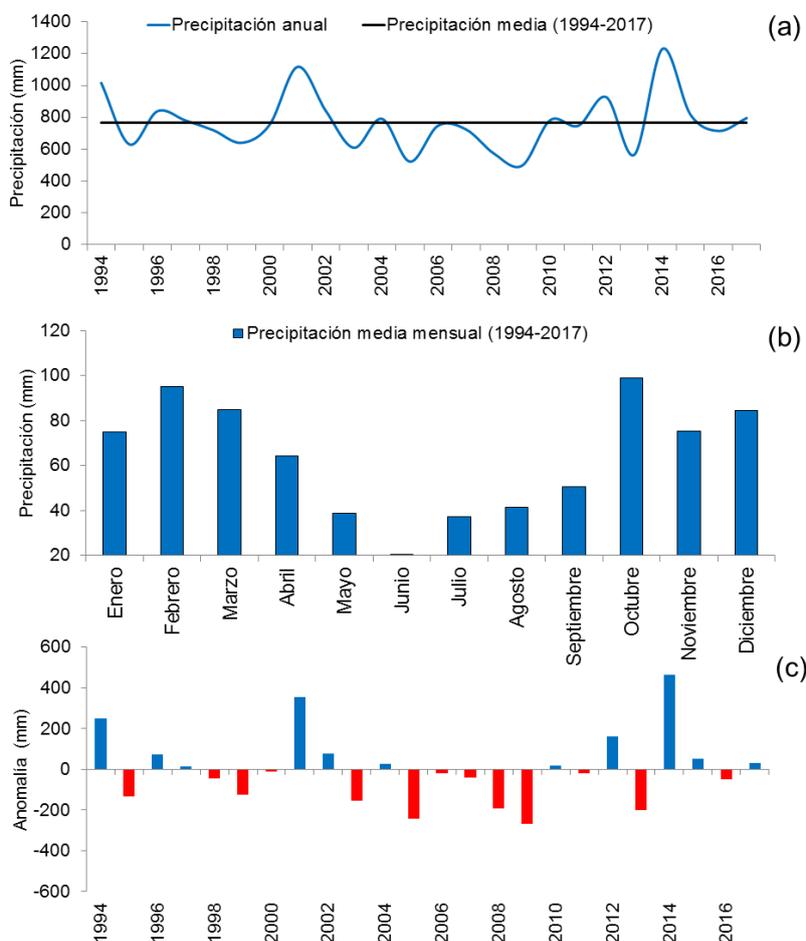


Figura 2.9. Series de tiempo de precipitación en el sector centro (estación Coronel Pringles). a) Precipitación anual y promedio histórico, b) precipitación media mensual y c) anomalías

3.3.3. Sector sur

El valor medio de precipitación anual en este sector fue 646 mm (1960-2017) con un mínimo de 354 mm que se registró en 1962 y 2008 y un máximo en 1976 (1086 mm) (Figura 2.10a). La marcada estacionalidad de las precipitaciones también se observó en este sector y se presentó en el mismo período que en el norte y en centro (máximas precipitaciones en verano (200mm) y mínimas en invierno (100 mm) (Figura 2.10b). Este parámetro mostró tendencia positiva (no significativa, $p = 0,8668$), aumentando 16 mm durante el período 1960-2017.

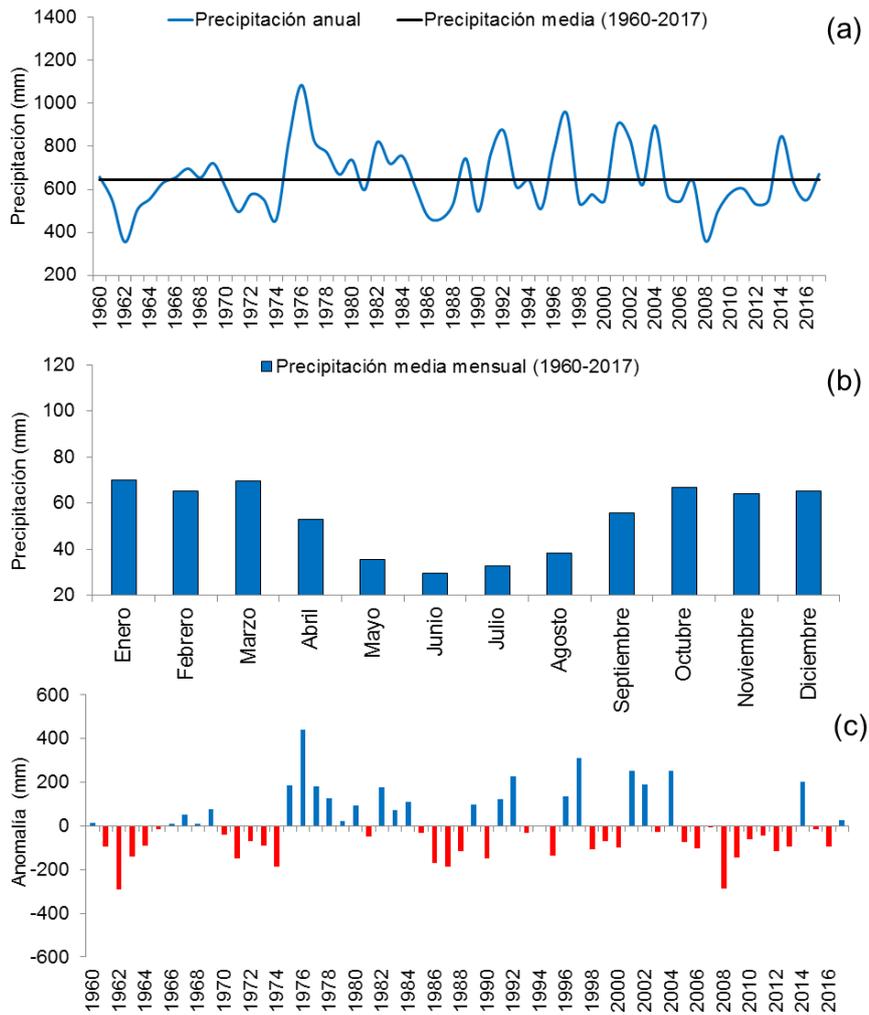


Figura 2.10. Series de tiempo de precipitación en el sector sur (estación Bahía Blanca). a) Precipitación anual y promedio histórico, b) precipitación media mensual y c) anomalías

En la zona sur, se observaron cuatro períodos con anomalías positivas y negativas bien diferenciadas. El primero de ellos, con un mayor porcentaje de anomalías negativas, se extendió desde 1960 a 1974 (-16,3 a -290 mm), mientras que el segundo se desarrolló entre 1975 a 1984, con anomalías positivas (23,6 a 440 mm) (Figura 2.10c). El tercero, se caracterizó por la alternancia de anomalías positivas y negativas y ocurrió de 1985 a 2004. Además, durante este lapso, se destacan los años 1997, 2001 y 2004 por presentar montos de precipitaciones superiores a la media (309, 253 y 251 mm, respectivamente). Por otra parte, el cuarto período de anomalías se produjo durante 2005 a 2017, con predominancia de condiciones secas (-5,4 a -286,5 mm), exceptuando 2014 (202 mm) y 2017 (25 mm). Finalmente, es importante destacar que las anomalías positivas fueron más importantes que las negativas (440 mm y -290 mm, respectivamente) (Figura 2.10c).

3.4. Análisis multitemporal de la cobertura de agua y su relación con la precipitación

La relación entre el área de la LSG y el DPP y la precipitación anual se presenta en la Figura 2.11. La extensión areal de ambos cuerpos de agua con respecto a la precipitación presentó una asociación lineal positiva, alta y estadísticamente significativa, dado que los valores del coeficiente de correlación de Pearson fue 0,79 en la LSG y 0,72 en el DPP ($p < 0,05$ en ambos). El r^2 ajustado fue 0,67 en la LSG y 0,55 en el DPP, lo que indica que la variación del área está explicada en un 67 y 55 %, respectivamente por la precipitación (Figura 2.11).

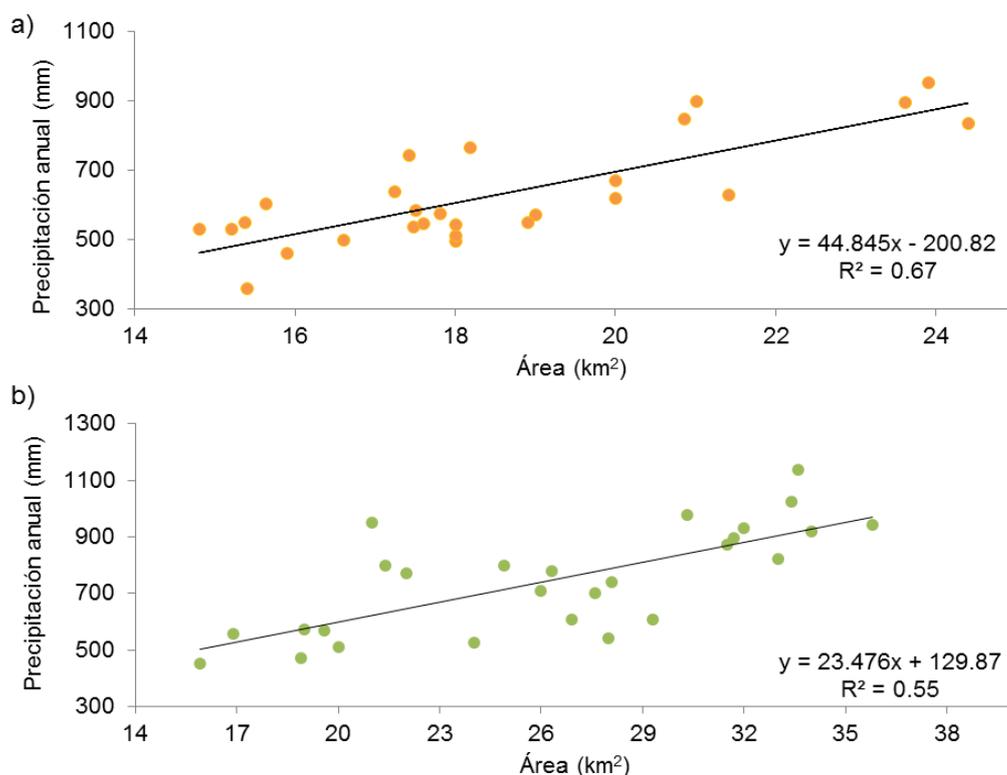


Figura 2.11. Correlación entre la extensión areal y la precipitación anual. a) Laguna Sauce Grande y b) dique Paso de Las Piedras (modificado de Brendel et al., 2018).

Durante el período 1987-2017, la LSG presentó un área media de $18,5 \pm 2,7$ km², siendo el promedio de precipitación anual 628 ± 150 mm (Figura 2.12a). El área máxima de este cuerpo de agua se registró en el año 2002 (24,4 km²), seguido de 1997 (23,9 km²), 2004 (23,6 km²) y 2001 (21 km²) en coincidencia con años pluviométricamente húmedos. Durante esos años se registraron más de 830 mm. Este mismo patrón se observó en los años 2014 y 2015, dado que el área también superó el valor promedio (21 y 21,4 km², respectivamente).

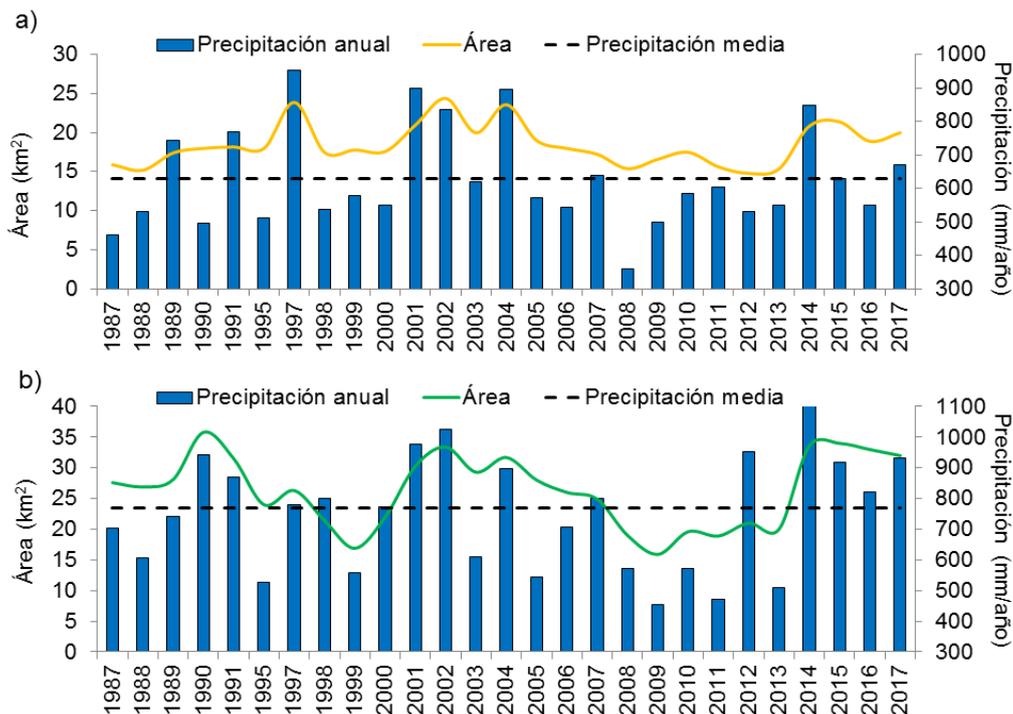


Figura 2.12. Extensión areal y precipitación anual durante el período 1987-2017. a) laguna Sauce Grande y b) dique Paso de Las Piedras (modificado de Brendel et al., 2018).

Las áreas más escasas de la LSG fueron en los años 2012 (14,8 km²), 1988 (15,2 km²) y 2008 y 2013 (15,4 km²) (Figura 2.12a). En estos años, las anomalías fueron negativas y fue más extrema durante el año 2008 (-268 mm). Además, la LSG presentó un lapso de siete años consecutivos con áreas por debajo del promedio (desde 2007 a 2013), mientras que durante 2001 a 2005 y 2014 a 2017 el área fue superior al valor medio (Figura 2.12a).

El DPP registró un área media de $26,8 \pm 5,8$ km² (1987-2017). La precipitación media anual fue 767 ± 188 mm. El área fue máxima en 1990 (35,8 km², +175 mm), seguido de los años 2015 y 2014 (34 y 33,6 km², respectivamente) en relación con años húmedos (+150 mm y 371 mm, respectivamente) (Figura 2.12b). Durante 2001 y 2002, la cobertura de agua fue 30,3 y 33,4 km², con anomalías positivas de precipitación (225 mm). Similarmente a lo indicado para la LSG, durante años húmedos el área del DPP aumentó.

La menor cobertura de agua se registró en 2009 (15,9 km²) en coincidencia con un año extremadamente seco (-314 mm). Su extensión también se redujo durante 2008 y 2011 (18,9 km²) producto de las escasas precipitaciones (Figura 12.2b). Es importante destacar que se presentaron varios años consecutivos donde el área fue

mayor que el valor medio. Entre ellos, se destacan los períodos 1987-1991, 2001-2005 y 2014-2017, mientras que, durante ocho años consecutivos (2006-2013) ocurrió lo contrario (Figura 2.12b).

3.5. Cambios morfométricos en años pluviométricamente diferentes

Los parámetros morfométricos de la LSG y el DPP en un año normal (2007), seco (2009) y húmedo (2014) se muestran en la Tabla 2.2. La variación pluviométrica generó cambios en los morfometría de los dos cuerpos de agua analizados. Durante el año seco el área de la LSG se redujo 13,3 % mientras que en el DPP un 35 %. Por otro lado, en un año húmedo, la extensión areal del DPP se incrementó un 19 %, mientras que en la laguna el sólo un 1,6 %.

Tabla 2.2. Parámetros morfométricos de la laguna Sauce Grande (LSG) y el dique Paso de Las Piedras (DPP) en un año normal (2007), seco (2009) y húmedo (2014).

Parámetros Morfométricos	2007		2009		2014	
	LSG	DPP	LSG	DPP	LSG	DPP
Área (km ²)	18.9	27.3	16.4	17.8	19.2	32.5
Perímetro (km)	22.1	51.3	21.2	37.7	22.4	59.3
Longitud Máxima Total (LMT) (km)	7.7	10.7	7.5	8.4	8.4	11.2
Orientación de la LMT	SW-NE	N-S	SW-NE	N-S	SW-NE	N-S
Ancho Máximo (km)	3.1	8.4	3.1	6.7	3.5	9.3
Ancho Medio (km)	2.4	2.5	2.2	2.1	2.3	2.9
Desarrollo de línea de costa (DLC)	1.4	2.8	1.5	2.5	1.4	2.9

El perímetro también se modificó de acuerdo con los diferentes montos de precipitación. Su variación fue más significativa en el DPP y durante el año húmedo (2014) dado que, al aumentar su sinuosidad, el perímetro se incrementó (Figura 2.13, Tabla 2.2). En la LSG también se observó esta tendencia pero con una menor variación. La longitud máxima total (LTM) fue mayor en ambos cuerpos de agua durante el período húmedo (8,4 km en la LSG y 11,2 km en el DPP) (Tabla 2.2). Sin embargo, en el DPP este parámetro fue más fluctuante dado que, durante el año seco, alcanzó 8,4 km, mientras que en la laguna fue 7,5 km. La orientación de la LMT no presentó cambios a pesar de las variaciones pluviométricas y siempre fue SW-NE en la laguna y N-S en el dique. Por otro lado, no se observaron cambios notables en el DLC, lo que demuestra que a pesar de las fluctuaciones pluviométricas, la LSG siempre tuvo una forma elíptica mientras que el DPP se clasificó como subrectangular elongado.

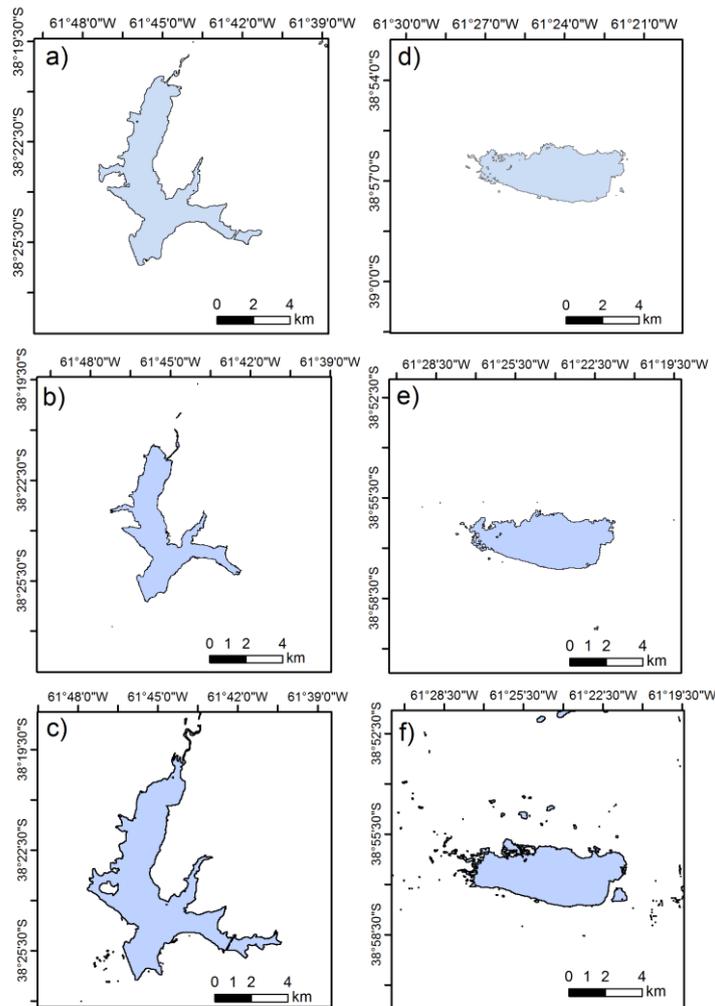


Figura 2.13. Extensión areal del dique Paso de las Piedras (a,b,c) y de la laguna Sauce Grande (d,e,f) en un año normal, seco y húmedo, respectivamente.

4. CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo, se analizaron las anomalías climáticas de las principales variables meteorológicas (temperatura, viento y precipitación), utilizando registros históricos del área de influencia de la cuenca del río Sauce Grande. La temperatura presentó un gradiente regional creciente en sentido N-S y fue la única variable que mostró significancia estadística en la totalidad de las estaciones, aumentando 0,5 °C en el sector norte y 0,8 °C en el sur (1970-2016) (Figuras 2.2 y 2.4). Las anomalías positivas y negativas no coincidieron entre las estaciones. Sin embargo, se observó que a partir de 2008 toda la región demostró tendencias al calentamiento atmosférico (Figuras 2.2, 2.3 y 2.4). Esta tendencia encontrada en el clima regional coincide con el aumento de temperatura observada a escala mundial. Según el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) la temperatura del

aire aumentó 0,8 °C durante el período 1880-2012 (IPCC, 2013). Es importante destacar que los cambios térmicos han sido de mayor magnitud después de 1970 con tasas de aumento que han llegado a 0,2 °C por década (IPCC, 2014; Worku et al., 2019). Por otra parte, esta tendencia también fue encontrada en la mayor parte de la Región Pampeana durante el período 1960-2010 (Aliaga, 2018) y en el sudoeste bonaerense durante 1970-2017 (Ferrelli et al., 2019).

Por otra parte, la velocidad del viento exhibió una clara tendencia a la disminución en la totalidad de la región (Figuras 2.5, 2.6 y 2.7). La mayor reducción se produjo en el centro (-5 km/h), mientras que en el norte fue -3,3 km/h. Hacia el sur, este decrecimiento fue -1 km/h. Además, como ocurrió con la temperatura, si bien los períodos con anomalías positivas y negativas no fueron similares en todas las áreas, se encontró que a partir del año 2010 toda la región experimentó un decrecimiento de la velocidad del viento (Figuras 2.5, 2.6 y 2.7). Esta tendencia es una situación que se ha observado a escala mundial como por ejemplo en Australia (McVicar et al., 2008), China (Guo et al. 2011), Corea del Sur (Kim y Paik, 2015), entre otros. Además, este patrón fue hallado a escala local. Según Brendel et al. (2017a) la velocidad media del viento en Monte Hermoso (provincia de Buenos Aires, Argentina) fluctuó de 22,6 km/h en 2008 a 9 km/h en 2015. Además, las calmas y los vientos leves aumentaron un 44,2 y 7,5 %, respectivamente (Brendel et al., 2017a).

La precipitación anual mostró un gradiente decreciente en sentido N-S (Figuras 2.8, 2.9 y 2.10). A partir del análisis de tendencia durante el período 1960-2017, este parámetro aumentó en el norte y sur y disminuyó levemente en el centro, alcanzando -6 mm en el período 1994-2017. El aumento de mayor magnitud se produjo en el norte (+42 mm) mientras que en el sur fue +16 mm. Por lo tanto, el patrón de precipitaciones fue espacialmente heterogéneo y concuerda con lo estudiado por Westra et al. (2013) quien indica que si bien este parámetro no presenta una tendencia definida a escala mundial, la mayor parte de las áreas han experimentado un aumento en la cantidad, intensidad y frecuencia de las precipitaciones. Por lo tanto, el clima regional de la cuenca del río Sauce Grande presentó una marcada estacionalidad de todos sus parámetros. La velocidad del viento es mayor en verano (en el norte y el sur) y en primavera/verano, en el centro. Los mínimos registros se producen en otoño. La temperatura y la precipitación presentan su máximo valor medio en verano y su mínimo en invierno.

En esta investigación se realizó por primera vez un estudio multitemporal (1987-2017) entre la precipitación y el área de los dos principales cuerpos de agua de la cuenca: la laguna Sauce Grande (LSG) y el dique Paso de Las Piedras (DPP). Se

demonstró que el área y la precipitación presentan una asociación lineal positiva, alta y estadísticamente significativa. En el caso de la LSG las fluctuaciones de su superficie se explican por la precipitación en un 67 % mientras que en el DPP, en un 55 %. Ambos cuerpos de agua presentaron los mismos períodos de incremento y reducción de su área. Además, los ciclos de menor cobertura de agua fueron más extensos (siete años). La mayoría de los parámetros morfométricos respondieron a los cambios en la precipitación. Los más importantes fueron el área, el perímetro y la longitud máxima total (LMT). Este último registró mayor variación en el DPP durante el año húmedo. El desarrollo de línea de costa (DLC) no se modificó en los diferentes escenarios pluviométricos. De acuerdo con la clasificación propuesta por Hutchinson (1957), la LSG presentó forma elíptica en los tres años seleccionados mientras que el DPP se definió como subrectangular elongado.

Por último, es importante destacar que la cuenca presenta un manejo antrópico muy importante, principalmente por la presencia del DPP, que provee de agua potable a más de 500.000 habitantes como así también es fuente de agua cruda para el polo industrial ubicado en la ciudad de Bahía Blanca (Casado, 2013). Este hecho genera que, en ciertas épocas del año y fundamentalmente en períodos de escasas precipitaciones, el caudal del río Sauce Grande aguas debajo del DPP es regulado para mantener el nivel de agua en el reservorio, por lo que el área de la laguna puede verse comprometida y no responder a los cambios pluviométricos. Además, diversas fuentes periodísticas y científicas han confirmado que aguas abajo del DPP, la extracción de agua del río Sauce Grande para riego es una problemática recurrente que podría generar variación de la cobertura de agua de la LSG (La Nueva Provincia, 2012; Cifuentes y Bonzini, 2014).

CAPÍTULO 3

MONITOREO AMBIENTAL EN ALTA FRECUENCIA DE LA LAGUNA SAUCE GRANDE Y EL RÍO HOMÓNIMO

1. INTRODUCCIÓN

El monitoreo de cursos y cuerpos de agua se define como la recolección, comparación y análisis continuo y periódico de información limnológica y meteorológica que son fundamentales para el manejo y gestión de los recursos hídricos (Atkins et al., 2003). Las lagunas son cuerpos de agua dinámicos y los procesos que allí se generan son complejos, abarcando una superposición tanto de escalas temporales como de niveles tróficos. Por ello, la frecuencia y periodicidad en la medición de las variables ecológicas son aspectos críticos para poder capturar y entender los patrones de evolución temporal de estas variables (Aguilera et al., 2016). El monitoreo en alta frecuencia permite obtener no sólo un mayor volumen de datos y cobertura espacial que las realizadas con técnicas de muestreo convencional que suelen ser mensuales o estacionales (Hamilton et al., 2015). Además, hacen posible la medición de parámetros en lugares inaccesibles (Porter et al., 2009). Su utilización en lagunas es fundamental dado que permite detectar fenómenos meteorológicos y limnológicos de corta duración que afectan la dinámica ambiental y que, dependiendo de su magnitud, tienen consecuencias sobre las comunidades biológicas (Jennings et al., 2012; Alfonso, 2018; Zunino, 2018). El uso de boyas automatizadas en lagos y lagunas a nivel mundial ha permitido comprender la dinámica ambiental (Wüest y Lorke 2003, Klug et al. 2012), estudiar el metabolismo ecosistémico (Van de Bogert et al., 2007, Staehr et al., 2010; Alfonso et al., 2015; Alfonso et al; 2018), el efecto de la circulación de los vientos locales sobre la clorofila (Zunino, 2018), análisis de flujo de calor (Zhao y Liu, 2018; Shao et al., 2015), entre otros.

La medición en alta frecuencia del caudal de los ríos ha permitido estimar la carga de nutrientes en tres cuencas hidrográficas de Reino Unido ante un evento de crecida (Outram et al., 2014), monitorear el material particulado en suspensión y los contaminantes que se transportan desde las áreas continentales hacia el mar con mayor precisión, en la cuenca del río Ródano (Francia) (Poulier et al., 2019), analizar la frecuencia de inundación en la cuenca del río Sava (Eslovenia) (Bezák et al., 2016), etc. El estudio del caudal de un río es importante para comprender la dinámica y variabilidad de la escorrentía de los cursos de agua (Carbone et al., 2006). Además, el conocimiento de su dinámica espacio-temporal y la respuesta frente a un evento de

precipitación intenso es fundamental dado que periódicamente provocan inundaciones, generando severos daños económicos y humanos (Volonté, 2018).

Las lagunas, principalmente las someras, son afectadas por la variabilidad climática y se las considera como centinelas del cambio climático (Adrian et al., 2009). Teniendo en cuenta que gran parte de estos cuerpos de agua están sometido a una gran presión para la obtención de servicios ecosistémicos, la necesidad del monitoreo meteorológico y fisicoquímico en alta frecuencia es fundamental (Alfonso, 2018). En la Región Pampeana, son escasos los trabajos realizados con monitoreos en alta frecuencia utilizando boyas automatizadas. Entre ellos, se destacan las investigaciones realizadas en las lagunas La Salada (provincia de Buenos Aires) (Alfonso, 2018) y Puan (Zunino, 2018). En estos estudios, el uso de este tipo de información fue fundamental para detectar fenómenos de brisa lagunar resultante de la interacción agua-atmósfera. Estos se generaron con una frecuencia de 4, 6 y 8 h y se caracterizaron por modificar las concentraciones de clorofila y oxígeno disuelto en La Salada, mientras que en Puan se observaron variaciones de temperatura del aire, viento y humedad relativa cada 6 y 12 h.

En la laguna Sauce Grande, un primer monitoreo en alta frecuencia fue realizado durante un período de sequía desde febrero 2011 hasta enero 2012. Los cambios más importantes se observaron durante el verano de 2012, dado que se registraron los valores más altos de temperatura del agua y del aire, de salinidad y de sedimentos en suspensión (Fornerón, 2012). Además, la profundidad presentó los valores más bajos del período analizado. Un análisis espectral permitió identificar que la laguna se encontraba influenciada por el pasaje de sistemas sinópticos de tiempo atmosférico en una escala diaria, semidiurno (brisas) y mensual (Fornerón, 2012). Por otro lado, el caudal del río Sauce Grande ha sido analizado en la cuenca alta (López Cazorla et al., 2003; Gil, 2009; Volonté, 2018) y en la cuenca media (Casado, 2013). Sin embargo, no se han desarrollado estudios sobre el comportamiento hidrológico del río Sauce Grande en la cuenca baja utilizando datos de caudal en alta frecuencia. Para obtener una visión integral de ese sector de la cuenca se ha estudiado el aporte del arroyo Las Mostazas, dado que es el principal afluente del río Sauce Grande.

En esta tesis, se presentan los resultados correspondientes a un período más húmedo que el estudiado por Fornerón (2012) que fue de sequía y permite la comparación de los datos en períodos pluviométricamente distintos. Por lo expuesto, el objetivo de este capítulo es analizar las variaciones de los parámetros meteorológicos y limnológicos de la laguna Sauce Grande utilizando mediciones en alta frecuencia y determinar la variabilidad observada entre períodos secos y

húmedos. Un segundo objetivo es analizar la dinámica del caudal del río Sauce Grande y su relación con las precipitaciones.

2. MÉTODO DE TRABAJO

2.1. Boya autónoma EMAC

Las Estaciones de Monitoreo Ambiental Costero (EMAC) son sistemas modulares que permiten adquirir información meteorológica e hidrológica de forma simple, práctica y a un bajo costo (<http://emac.iado-conicet.gob.ar/2019>). Dentro de esta red de estaciones, se encuentra la boya autónoma de la Laguna Sauce Grande localizada en su sector más profundo (Figura 3.1). La misma fue construida en el Instituto Argentino de Oceanografía (IADO-CONICET) por el Dr. Alejandro Vitale y fue instalada en septiembre de 2016. La boya está constituida por sensores meteorológicos (ubicados a 1,5 m de altura) que registran datos de viento (dirección y velocidad) y temperatura del aire (°C). Además, está equipada con sensores limnológicos, que registran las variables a 0,5 m de profundidad (subsUPERficial) y obtienen información del nivel de agua (m), temperatura del agua (°C), conductividad eléctrica (mS/cm) y oxígeno disuelto (%). La forma de alimentación de energía está dada por dos paneles solares que alimentan su batería interna (Figura 3.2). La frecuencia de medición es de 10 minutos y actualizada en el sitio web cada media hora.

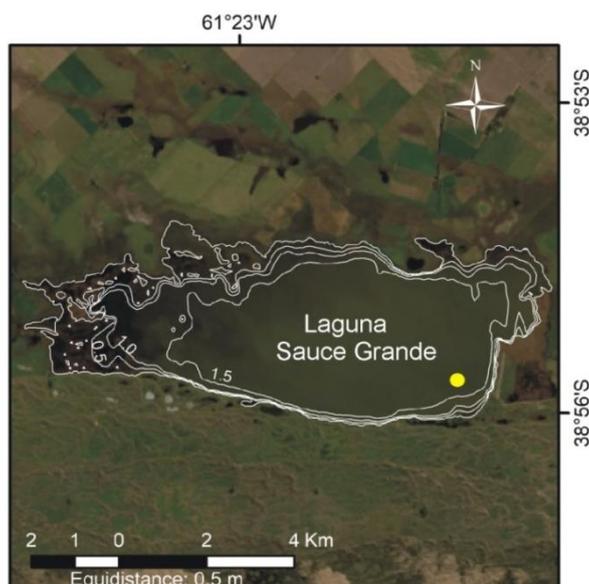


Figura 3.1. Localización de la boya EMAC en la laguna Sauce Grande (círculo amarillo). La batimetría fue obtenida de Seitz (2018).

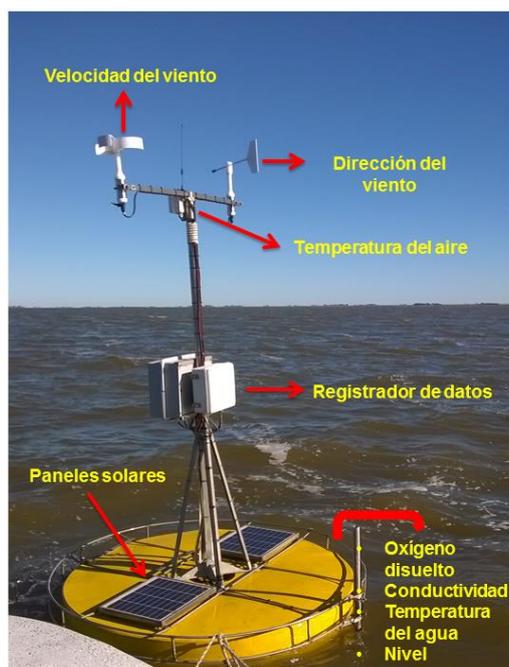


Figura 3.2. Ubicación de los sensores en la boya EMAC.

2.1.1 Análisis de los datos de la boya EMAC

El período de estudio de las variables analizadas se presenta en la Tabla 3.1. Para el estudio de estas variables se aplicaron métodos estadísticos descriptivos tales como promedio, desvío estándar, valores mínimos y máximos. Se utilizó la Transformada Rápida de Fourier (TRF) para calcular la densidad espectral de cada parámetro medido. Esta técnica permite conocer las frecuencias de mayor variabilidad y energía y así estimar la periodicidad de las variables analizadas. Para realizar este análisis, los datos obtenidos a una frecuencia de 10 minutos fueron promediados cada 1 hora. Por último, para conocer el grado de relación entre las variables analizadas se aplicó un análisis de correlación de Spearman utilizando el software SPSS 17.

Tabla 3.1. Período de estudio de las variables analizadas.

Variable	Unidad de medición	Inicio de medición	Fin de medición
Temperatura del aire	°C	Septiembre de 2016	Septiembre de 2018
Viento	Km/h	Marzo de 2017	Septiembre de 2018
Temperatura del agua	°C	Septiembre de 2016	Septiembre de 2018
Nivel de agua	m	Octubre de 2016	Octubre de 2017
Oxígeno disuelto	%	Septiembre de 2016	Marzo de 2018
Conductividad eléctrica	ms/cm	Diciembre de 2016	Septiembre de 2018

2.2. Medición de caudal

Se utilizaron datos de nivel de agua de dos estaciones limnimétricas EMAC ubicadas en la cuenca baja del río Sauce Grande (Figura 3.3a). La frecuencia de medición fue de 10 minutos y actualizada en el sitio web cada media hora. La primera estación (E1, Figura 3.3b) está localizada en el río Sauce Grande (RSG) a ≈ 21 km antes del ingreso a la laguna homónima, mientras que la segunda (E2) a ≈ 8 km de la salida del RSG de la laguna y luego de haber colectado las aguas del arroyo Las Mostazas. Además, la E2 se encuentra a ≈ 18 km de la desembocadura del RSG en el Océano Atlántico (Figura 3.3c). El período de medición analizado fue desde noviembre de 2016 a marzo de 2018.



Figura 3.3. a) Ubicación de las estaciones limnimétricas y pluviométricas. EMAC (E1 y E2) y pluviométricas (P1: Estación Coronel Falcón y P2: Estación El Faro), b) E1: antes del ingreso del río Sauce Grande a la laguna homónima y c) E2: río Sauce Grande luego de su desembocadura de la laguna.

Para calcular el caudal en los dos tramos del RSG se realizaron cinco campañas de aforo durante el período marzo de 2017-2018. Las mismas se llevaron a

cabo teniendo en cuenta diferentes niveles de altura de agua del río en las dos estaciones (Figura 3.3). Estas campañas permitieron realizar una curva de calibración del caudal con respecto al nivel de agua. Para medir la velocidad de la corriente y la profundidad de la columna de agua se utilizó un perfilador de corrientes acústico Doppler (ADP, por sus siglas en inglés) basado en el sistema River Surveyor (Figura 3.4). El sistema está montado en una embarcación que mide la velocidad de la corriente de agua como así la profundidad de la columna de agua que son almacenados instantáneamente en una computadora portátil. A medida que la embarcación se mueve de un flanco del río al otro el ADP mide estas dos variables (Oberg y Mueller, 2007). Ambas fueron registradas cada 1 metro a lo largo de la sección transversal del río (Figura 3.5). Los datos de velocidad y profundidad fueron integrados en un script de programación en el software Matlab diseñado por el Ing. Juan Pons en el Instituto Argentino de Oceanografía (IADO-CONICET) que permitió obtener el caudal del río cada 10 minutos. Luego se calcularon métodos estadísticos el caudal promedio, desvío estándar, valores mínimos y máximos.



Figura 3.4. Perfilador de corrientes acústico Doppler (ADP) utilizado en las campañas de aforo.

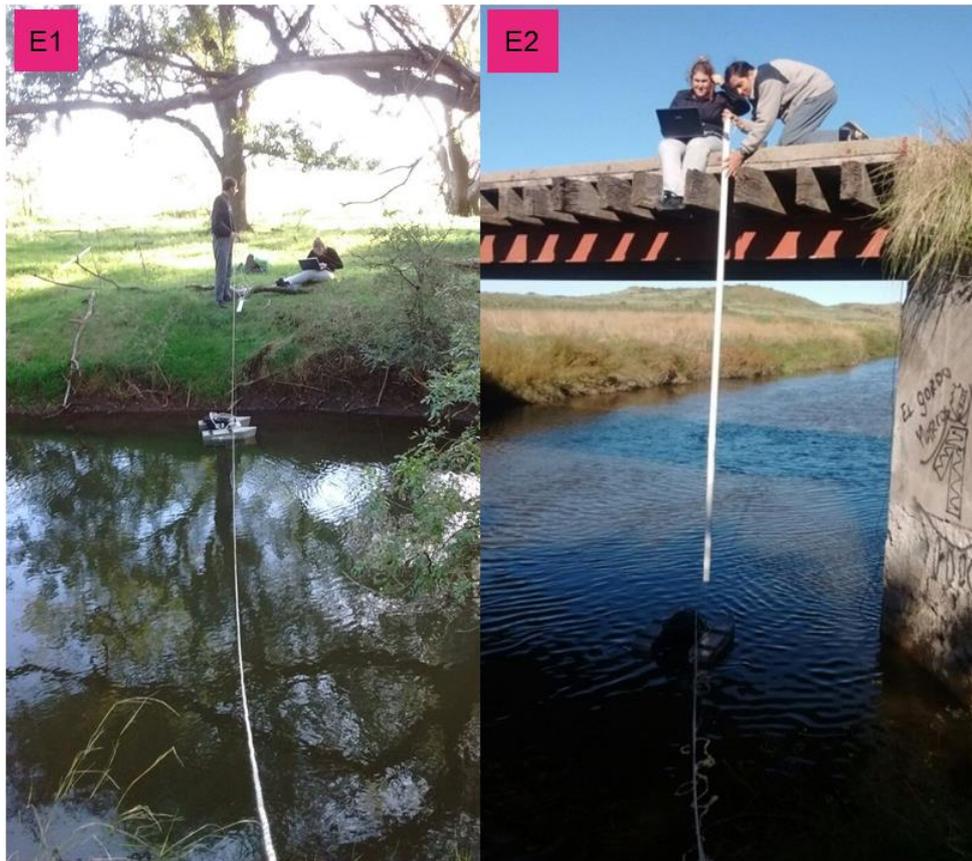


Figura 3.5. Campañas de aforo en las estaciones E1 y E2 utilizando el ADP.

3. RESULTADOS

3.1. Laguna Sauce Grande

A continuación se presentan los resultados estadísticos estándar y el análisis espectral de los datos meteorológicos y limnológicos de la laguna Sauce Grande con el objetivo de analizar su dinámica e identificar los períodos característicos.

3.1.1. Variables meteorológicas

3.1.1.1. Temperatura del aire

La temperatura media para el período de estudio fue 14,4 °C. Esta variable presentó los menores valores en invierno (8,2 °C) y los máximos en verano (21,6 °C) (Figura 3.6). El máximo registro de temperatura se produjo en diciembre de 2016 (36 °C), mientras que el mínimo en junio de 2017 (-2,2 °C). El resultado de la transformada Rápida de Fourier (TRF) se muestra en la Figura 3.7. Los máximos más importantes

fueron el anual, mensual, estacional y sinóptico (<15 días). Además, se registraron picos semidiurnos y horarios entre 9 y 4 h (Figura 3.7).

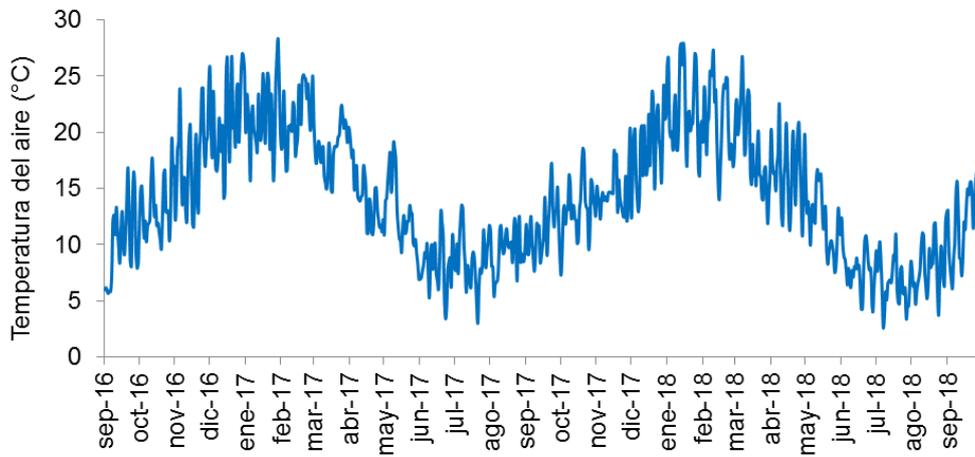


Figura 3.6. Temperatura media diaria del aire de la laguna Sauce Grande durante el período de estudio.

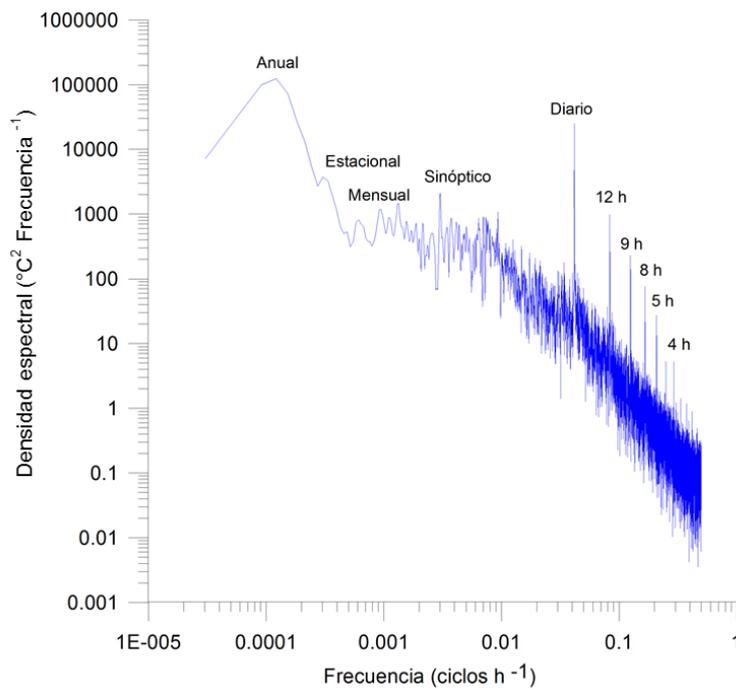


Figura 3.7. Densidad espectral de la temperatura del aire durante el período de estudio.

3.1.1.2. Viento

El valor medio de velocidad del viento durante el período de estudio fue 15,8 km/h. La máxima velocidad se registró en junio de 2017 (77 km/h). La primavera es la

estación más ventosa (17,8 km/h), mientras que el otoño presenta las menores velocidades (13,4 km/h) (Figura 3.8).

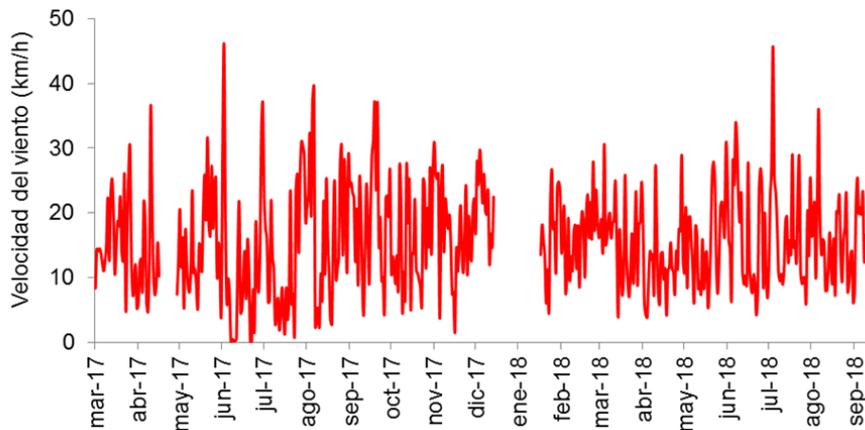


Figura 3.8. Velocidad media diaria del viento en la laguna Sauce Grande durante el período de estudio. Las discontinuidades corresponden a períodos de falla o calibración del sensor.

La dirección del viento dominante fue del NNW (15,8 %), seguida del N (12,3 %) y NW (11,3 %) mientras que la de menor frecuencia fue del SSW (3,3 %) y del SW (3,4 %) (Figura 3.9). Las mayores velocidades medias correspondieron a aquellas del sector SW (22,4 km/h) y WSW (21,8 km/h) (Figura 3.9). La velocidad media del viento predominante (NNW) es 19,2 km/h. Se observó una mayor frecuencia de las brisas débiles (12 a 20 km/h, 25,3 %), seguido de brisas moderadas (20 a 29 km/h, 19,8 %) y muy débiles (6 a 12 km/h, 17,9 %) (Tabla 3.2). Por último, el análisis espectral mostró que la intensidad de la señal dominante correspondió a los ciclos anual, mensual y estacional. Además, se encontraron máximos a escala diaria, semidiurno (12 h) y 8 h (Figura 3.10).

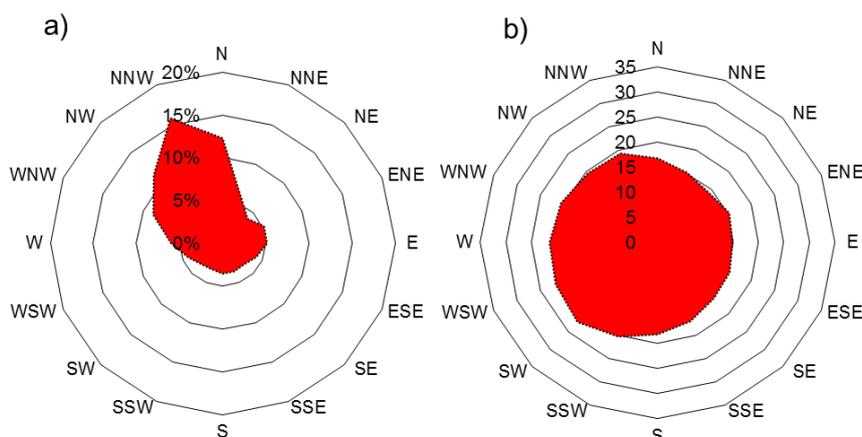


Figura 3.9. a) Frecuencia y b) velocidad por dirección del viento en la laguna Sauce Grande durante el período de estudio.

Tabla 3.2. Intensidad del viento según la escala de Beaufort (en km/h).

Escala	%	Horas
Calma (< 2)	14.8%	1973.7
Ventolina (2 a 6)	9.7%	1306.2
Brisa muy débil (6 a 12)	17.9%	2408.5
Brisa débil (12 a 20)	25.3%	3355.3
Brisa moderada (20 a 29)	19.8%	2637.2
Brisa Fresca (29 a 39)	9.9%	1343.8
Brisa Fuerte (39 a 50)	3.1%	410.0
Viento Fuerte (50 a 62)	0.5%	65.8
Viento Duro (62 a 75)	0.1%	10.5
Viento muy Duro (75 a 89)	0.0%	0.3
Temporal (89 a 103)	0.0%	0.0
Borrasca (103 a 118)	0.0%	0.0
Huracán (118 y mas)	0.0%	0.0

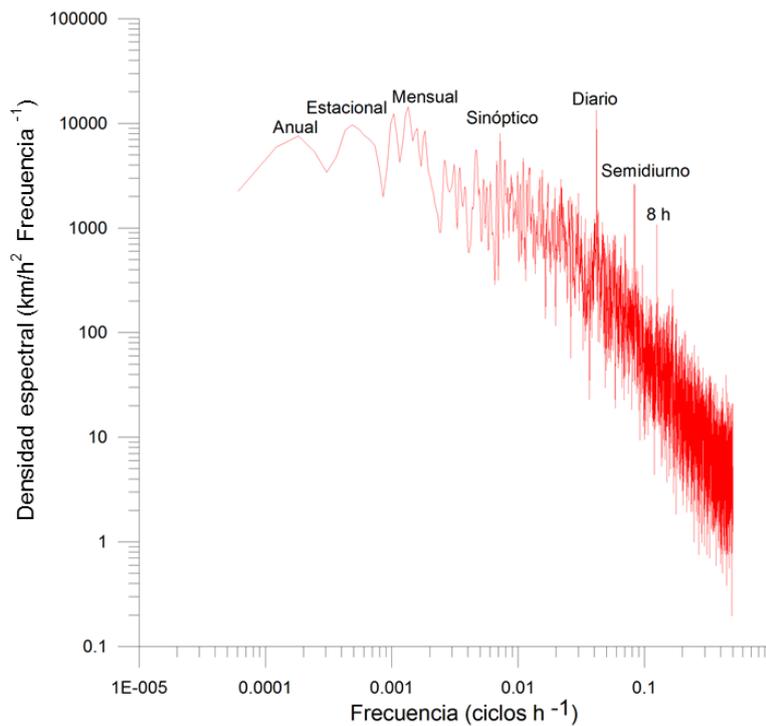


Figura 3.10. Densidad espectral de la velocidad del viento durante el período de estudio.

3.1.2. Variables limnológicas

3.1.2.1. Temperatura del agua

El valor medio de la temperatura del agua durante el período analizado fue 15,9 °C. La temperatura media del agua en el período estival fue 22,6 °C, mientras que la

temperatura media invernal fue 9,0 °C. Durante la primavera, la temperatura media del agua fue 15,7 °C y en el otoño 16,5 °C. Por lo tanto, se evidenció una clara fluctuación estacional (Figura 3.11). La temperatura mínima absoluta durante el período de estudio se registró en junio de 2017 (4,3 °C) y la máxima en enero de 2018 (29,6 °C). El análisis de TRF indicó un comportamiento similar a lo ocurrido con la temperatura del aire. Se registraron máximos de energía en el ciclo anual, mensual y estacional. Además, fueron importantes los ciclos diarios, semidiurno y cada 8 h (Figura 3.12).

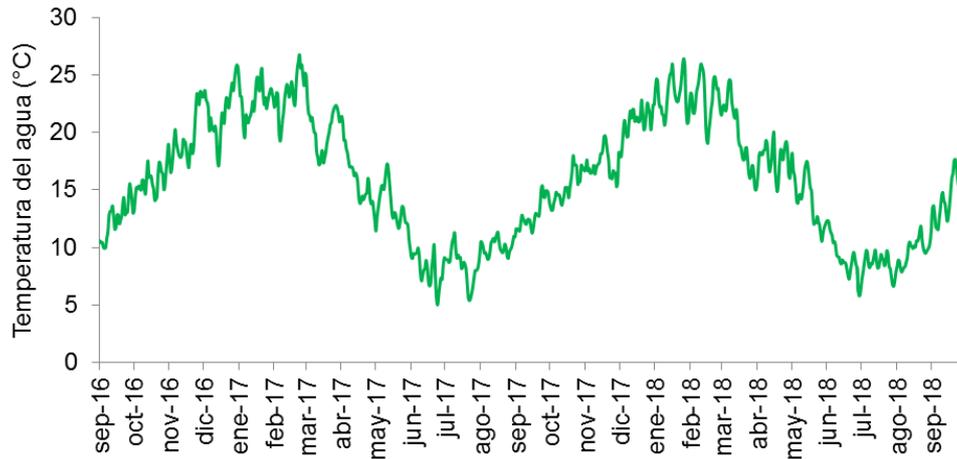


Figura 3.11. Temperatura media diaria del agua de la laguna Sauce Grande durante el período de estudio.

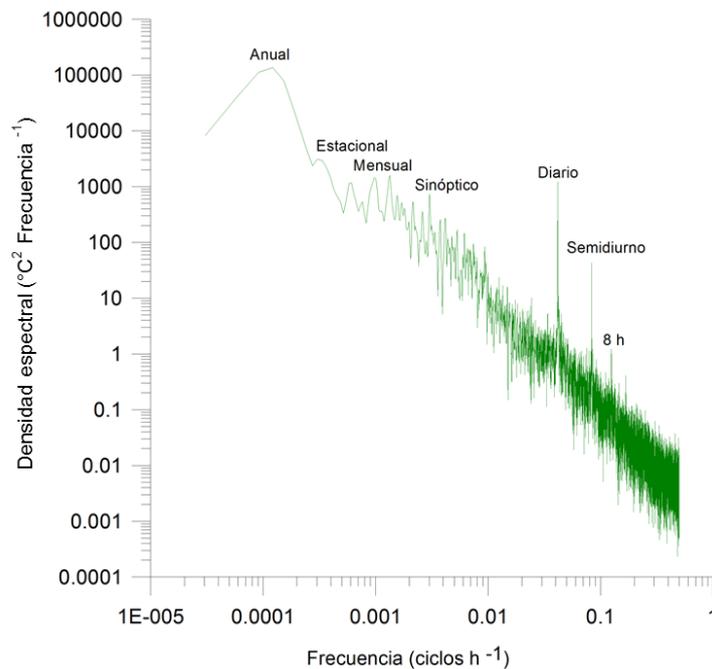


Figura 3.12. Densidad espectral de la temperatura del agua durante el período de estudio.

3.1.2.2. Nivel del agua

El nivel medio del agua fue $1,7 \pm 0,2$ m durante el período de estudio. El máximo nivel de agua fue registrado en julio de 2017 (2,1 m), mientras que el mínimo (1,2 m) fue observado en diferentes períodos (abril, mayo y junio de 2017). Esto evidencia las importantes fluctuaciones que presenta esta variable (Figura 3.13). Entre julio y octubre de 2017, se registraron las mayores profundidades producto del aumento de caudal del río Sauce Grande. La aplicación de la TRF mostró máximos de energía a escala anual, bimensual y diaria (Figura 3.14).

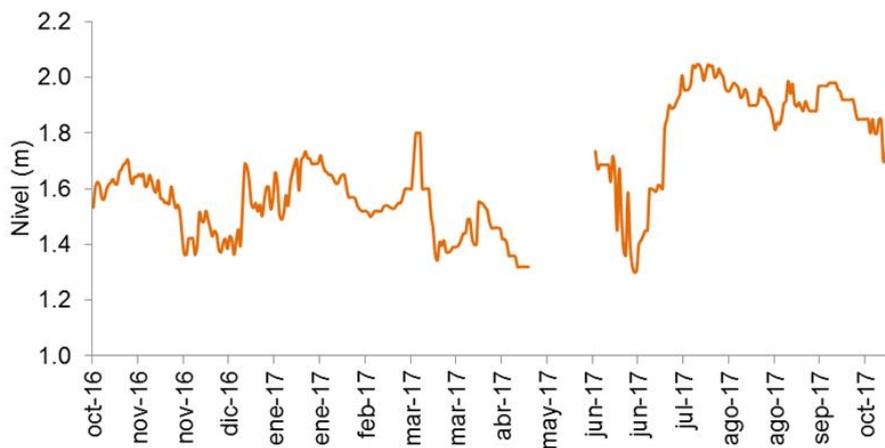


Figura 3.13. Nivel del agua de la laguna Sauce Grande durante el período de estudio. Las discontinuidades corresponden a períodos de falla o calibración del sensor.

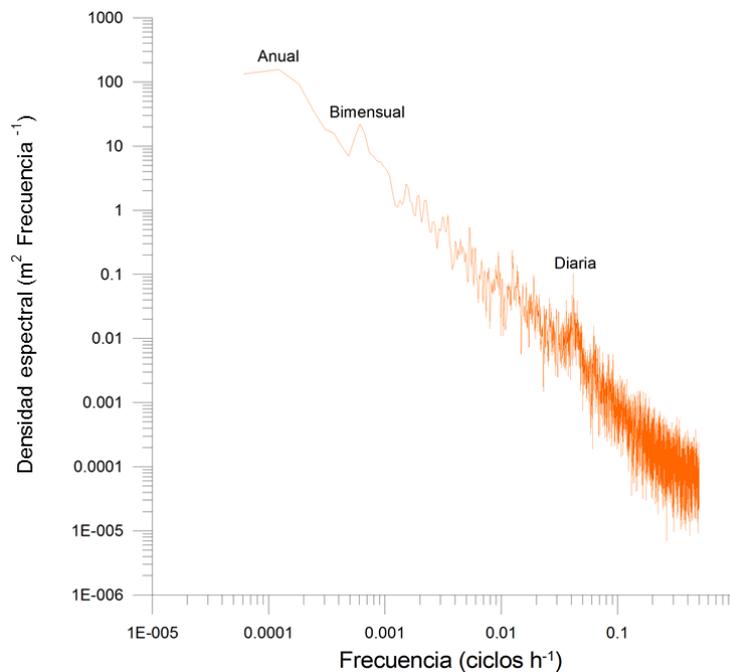


Figura 3.14. Densidad espectral del nivel del agua de la laguna Sauce Grande durante el período de estudio.

3.1.2.3. Oxígeno disuelto

El valor medio de oxígeno disuelto fue $90,9 \pm 9,8$ %. Esta variable mostró importantes variaciones a lo largo del período estudiado. El máximo valor ocurrió en diciembre de 2016 (115,5 %), mientras que el menor en enero de 2018 (50 %). El verano fue la estación que presentó el menor valor de oxígeno disuelto (80,6 %) (Figura 3.15). Teniendo en cuenta los resultados del análisis espectral, las mayores energías correspondieron al ciclo anual, estacional, mensual, sinóptico, diario, semidiurno y 8 h (Figura 3.16).

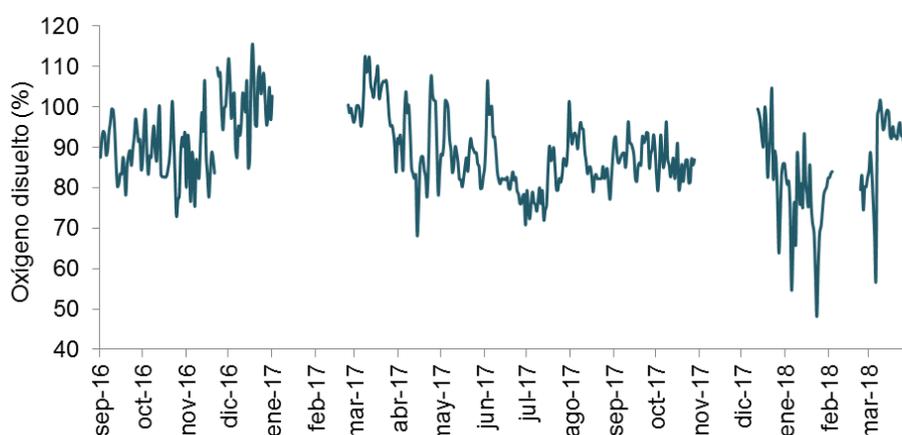


Figura 3.15. Concentración media diaria de oxígeno disuelto en la laguna Sauce Grande durante el período de estudio. Las discontinuidades corresponden a períodos de falla o calibración del sensor.

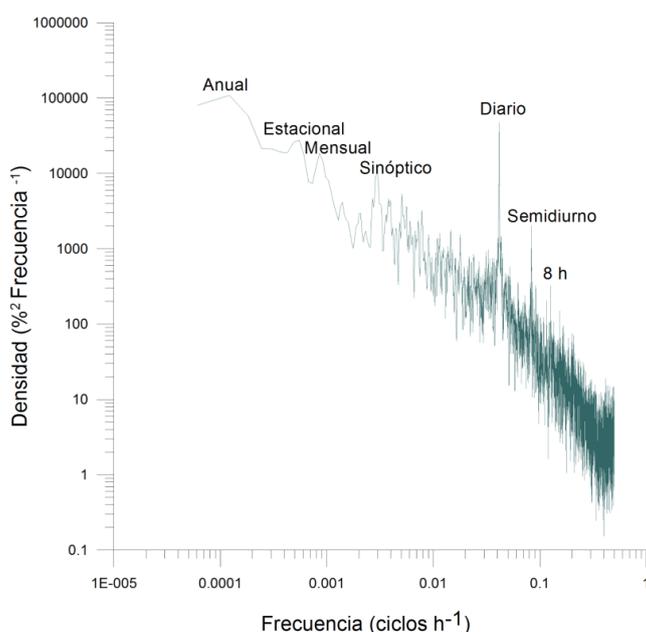


Figura 3.16. Densidad espectral del oxígeno disuelto en la laguna Sauce Grande durante el período de estudio.

3.1.2.4. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica presentó un valor medio de $3,3 \pm 0,9$ ms/cm. Este parámetro mostró fluctuaciones importantes, registrándose el menor valor en marzo de 2017 (1,7 ms/cm) y el máximo en marzo de 2018 (5,8 ms/cm) (Figura 3.17). El análisis de la TRF mostró máximos de energía a escala anual, mensual, sinóptico, diaria y de 12 h (Figura 3.18).

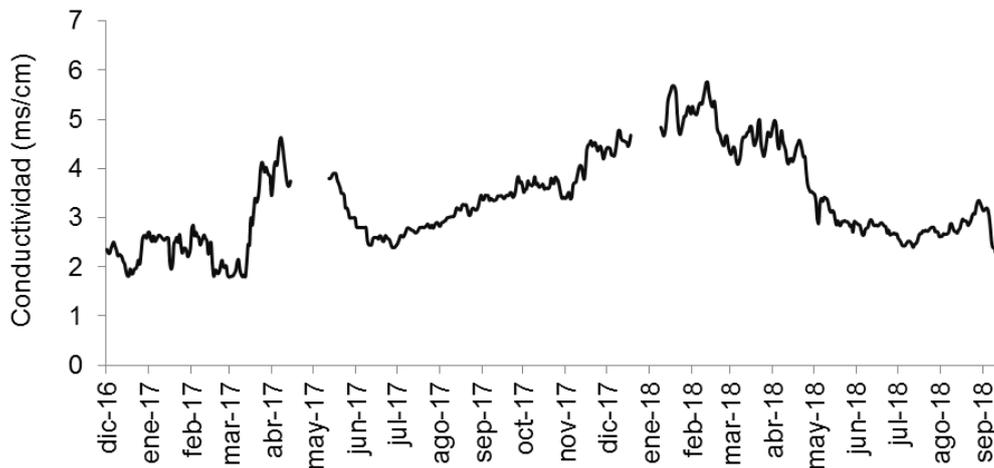


Figura 3.17. Conductividad eléctrica media diaria de la laguna Sauce Grande durante el período de estudio. Las discontinuidades corresponden a períodos de falla o calibración del sensor.

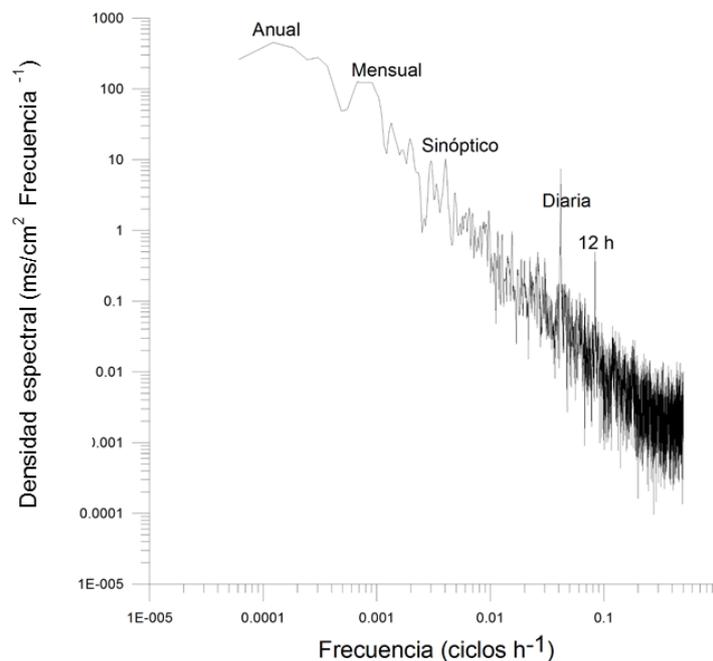


Figura 3.18. Densidad espectral de la conductividad eléctrica en la laguna Sauce Grande durante el período de estudio.

3.2. Análisis de correlación entre las variables meteorológicas y limnológicas

La temperatura del aire (TA) y la del agua (TAG) estuvieron correlacionadas positivamente con un alto grado de significancia estadística ($r^2 = 0,93$, $p < 0,01$) (Tabla 3.3). El oxígeno disuelto (OD), se relacionó negativamente con el nivel del agua (N) ($r^2 = 0,51$, $p < 0,01$) y con la TA y la TAG ($r^2 = 0,64$ y $0,68$, $p < 0,01$, respectivamente). El viento no mostró una relación dominante. Por último, la conductividad eléctrica (CE) y el N estuvieron correlacionados de manera negativa ($r^2 = 0,369$, $p < 0,05$) (Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Matriz de correlación de Spearman de las variables meteorológicas y limnológicas medidas por la boya autónoma. TA: temperatura del aire, TAG: temperatura del agua, V, velocidad del viento, N: nivel, OD: oxígeno disuelto y CE: conductividad eléctrica. *: $p < 0,01$ ** $p < 0,05$.

	TA	V	TAG	N	OD	CE
TA	1	0,239*	0,931**	-0,276	-0,647**	0,140**
V	0,239**	1	0,172**	-0,07	0,105*	0,202**
TAG	0,931**	0,172**	1	-0,474**	0,683**	0,169**
N	-0,276	-0,07	-0,474**	1	-0,512**	-0,369*
OD	-0,647**	0,105*	-0,683**	-0,512**	1	0,223**
CE	0,140**	0,202**	0,169**	-0,369*	0,223**	1

3.3. Dinámica del caudal del río Sauce Grande

3.3.1. Curva de calibración

Las curvas de calibración de caudal con respecto al nivel de agua fueron calculadas en dos estaciones de aforo E1 (río Sauce Grande antes del ingreso en la LSG, Figura 3.19a) y E2 (río Sauce Grande luego de su salida de la LSG y de haber colectado las aguas arroyo Las Mostazas, Figura 3.19b). Con los datos obtenidos en las cinco campañas de aforo, se aplicó una ecuación polinómica de grado tres que permitió obtener un excelente ajuste (R^2 fue 0,99 en ambas estaciones) (Figura 3.19). A partir de estas ecuaciones se pudo calcular el caudal en alta frecuencia a partir de los datos de nivel de agua registrados por las dos estaciones limnimétricas EMAC (E1 y E2) (Figura 3.3).

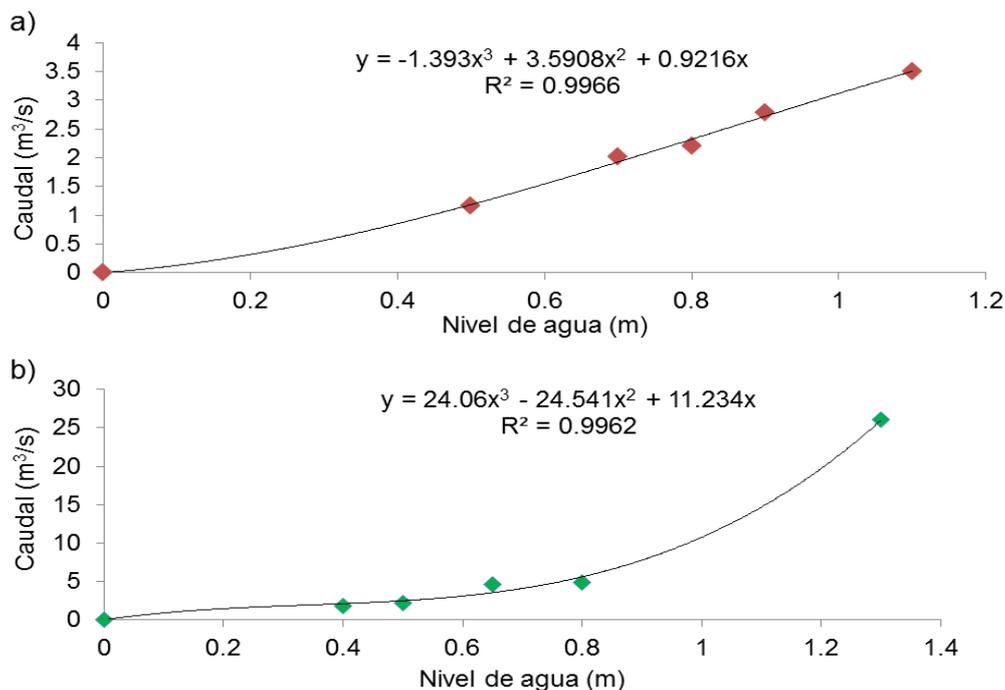


Figura 3.19. Curvas de calibración de caudal con respecto al nivel de agua. a) Estación de aforo E1: río Sauce Grande antes de su ingreso en la laguna y b) estación de aforo E2: río Sauce Grande luego de su desembocadura de la laguna y su confluencia con el arroyo Las Mostazas.

3.3.2. Análisis del caudal del río Sauce Grande y su relación con la precipitación

El caudal medio en E1 fue $2,2 \pm 0,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mientras que en E2 fue $2,6 \pm 2,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (noviembre 2016-marzo 2018) (Figura 3.20). El comportamiento del caudal a lo largo del período fue similar en ambos tramos del curso de agua y su fluctuación se relacionó con la precipitación.

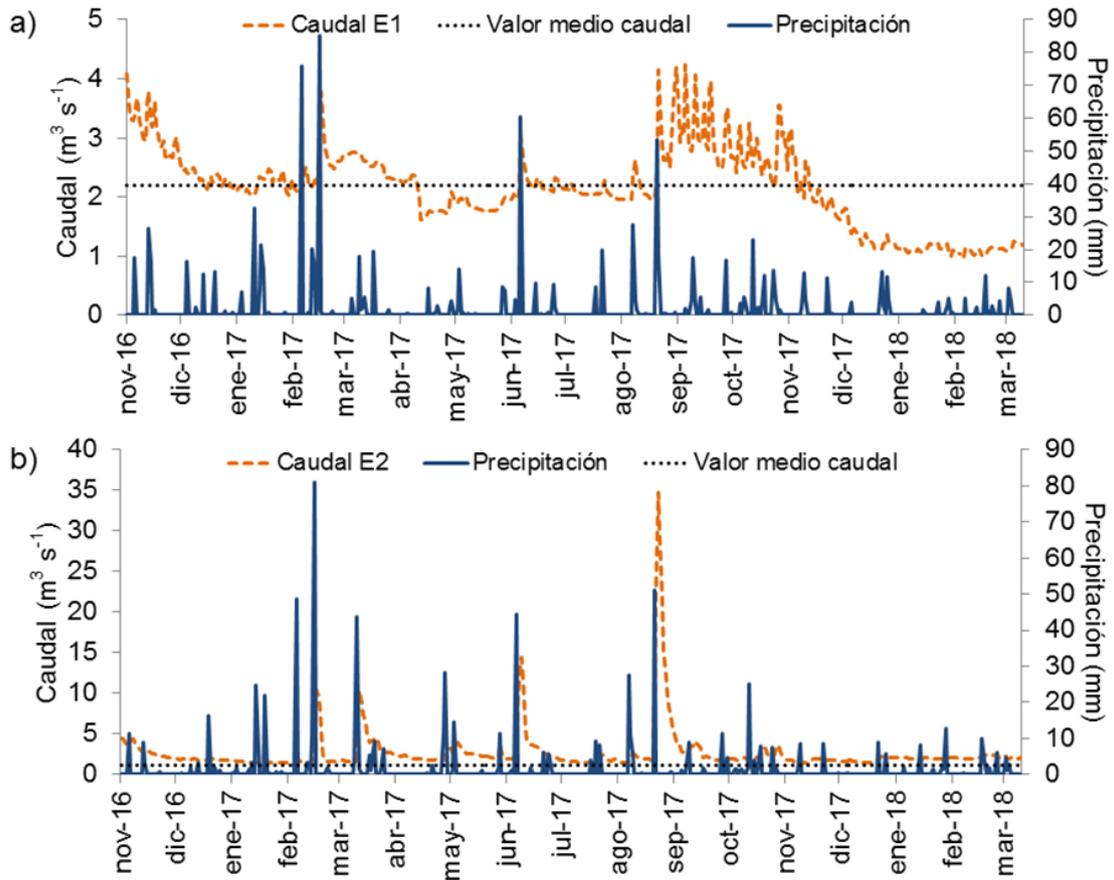


Figura 3.20. Caudal medio diario y precipitación durante el período noviembre de 2016-marzo de 2018. a) E1, b) E2.

Si bien se registraron varios períodos donde el valor de caudal fue superior a su valor medio, en ambos sectores del río, los más significativos fueron tres que se describen a continuación (Figura 3.21). Además, estos períodos presentaron diferente tiempo de escurrimiento del flujo en las dos estaciones. El primer período ocurrió en marzo de 2017 y se caracterizó por un aumento de caudal a partir del día 7 alcanzando su valor máximo el día 9 en ambas estaciones (E1: $3,8$ y E2: $9,8$ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) (Figura 3.21a y 3.21d). El total y el lapso en el cual se registraron las lluvias fueron similares en las dos estaciones (88 mm entre el 7 y 9 de marzo) de los cuales 80 mm ocurrieron el día 8 de marzo. Por lo tanto, el máximo caudal fue registrado un día después de la máxima precipitación (Figura 3.21). Por otro lado, el tiempo de escurrimiento del flujo directo (diferencia entre a y b) fue mayor en E1 que en E2 (10 vs 7 días, respectivamente) (Figura 3.21a y 3.21d).

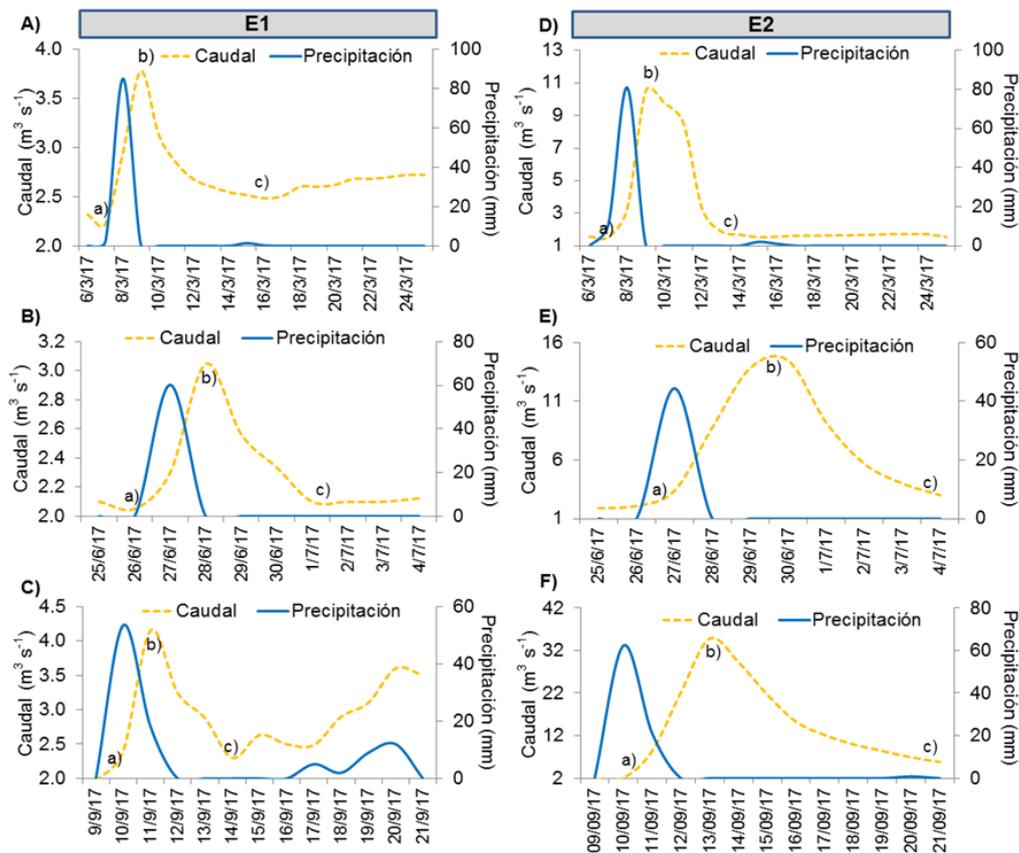


Figura 3.21. Hidrograma en diferentes momentos de crecida en la E1 (A, B, C) y E2 (D, E, F). a) Inicio del escurrimiento directo, b) momento de caudal máximo y c) fin de escurrimiento directo. La diferencia entre a y c indica el tiempo (en días) del escurrimiento directo.

El segundo momento de crecida del río fue en junio de 2017 (Figura 3.21b y Figura 3.21e). La precipitación fue 60 mm en E1 y 44 mm, en E2 y se produjo el día 27 de junio. El caudal comenzó a incrementarse a partir de ese día y presentó su máximo en el día 28 en E1 ($3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), mientras que en E2 se produjo el día 30 con un valor de $14,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Además, se observó que el tiempo de escurrimiento directo (diferencia entre a y d) fue mayor en E2 (8 días) (Figura 3.21e). Por último, el tercer período ocurrió en septiembre de 2017 y se caracterizó como el más extremo, dado que los valores de caudal en ambas estaciones fueron los más altos de todo el período de estudio (Figura 3.21c y Figura 3.21f). En E1 fue $4,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y ocurrió el día 11 de septiembre como consecuencia de las precipitaciones registradas el día anterior (53 mm). El flujo se mantuvo elevado el día 12 ($3,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), dado que también se produjeron lluvias (18 mm) (Figura 3.21c). Las precipitaciones también ocurrieron en E2 durante los mismos días que en E1 pero fueron de mayor magnitud ya que el valor total fue 85 mm, de los cuales 61 mm ocurrieron el día 10/9 (Figura 3.21f). El caudal máximo fue $34,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y ocurrió dos días después que en E1 (13/9), producto

probablemente del flujo que aporta la laguna y el arroyo Las Mostazas sobre este sector. El tiempo de escurrimiento directo también fue mayor, similarmente al ejemplo mencionado anteriormente, en E2 dado que fue 12 días (Figura 3.21f).

La superficie cubierta por agua durante el evento de crecida más extremo (13/9/2017, Figura 3.22a), como así también en momentos de caudal medio (22/04/2017) (Figura 3.22b) y caudal escaso (18/12/2017) (Figura 3.22c) del río Sauce Grande se muestra en la Figura 3.22. El área cubierta por agua es significativamente diferente en los tres ejemplos. Durante el primer evento mencionado y, como consecuencia de las intensas precipitaciones, en la cuenca baja se desarrollan numerosos cursos y cuerpos de agua de pequeña extensión, principalmente sobre la barrera medanosa y en cercanías a la desembocadura del río Sauce Grande en el Océano Atlántico. Otro sector cubierto por agua fue en el sector NW de la laguna y en el sector más próximo al ingreso del río en el cuerpo de agua. Este ejemplo permite visualizar las áreas en riesgo ante lluvias intensas en la cuenca baja y, como consecuencia, valores de caudal altos (Figura 3.22a) dado que en las situaciones de caudal medio y escaso no se registraron estos espacios cubiertos por agua (Figura 3.22b y Figura 3.22c).

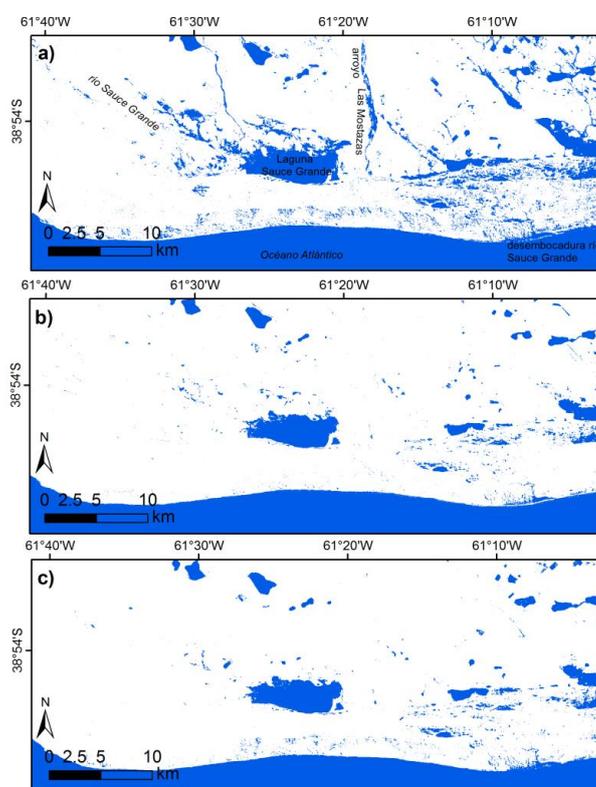


Figura 3.22. Cobertura de agua bajo diferentes escenarios de caudal del río Sauce Grande. a) 13/9/2017 (evento de crecida), b) 22/4/2017 (caudal medio) y c) 18/12/2017 (caudal escaso).

4. DISCUSIÓN

El análisis de los datos de monitoreo en alta frecuencia permitió identificar los períodos principales que caracteriza la dinámica diaria de las variables meteorológicas y limnológicas de la laguna Sauce Grande. Naturalmente, las temperaturas del aire y del agua presentaron una marcada estacionalidad térmica con máximos en verano y mínimos en invierno, típico del clima templado (Aliaga et al., 2017). Esta situación coincide con el patrón térmico regional hallado por Ferrelli et al. (2019) y Aliaga et al. (2017) y con los presentado en el Capítulo 2 para el área de influencia de la laguna Sauce Grande. La TRF mostró diferentes períodos de la señal en las distintas variables. Estas estuvieron principalmente representadas por los ciclos anuales, mensuales y estacionales, diarios y semidiurno. Pero lo más importante de este análisis es la presencia de señales de energía en períodos que oscilaban entre 4 y 9 h según la variable en estudio. Estas señales no fueron detectadas en la investigaciones realizadas por Fornerón et al. (2011) y Fornerón (2012). En particular, el análisis de Fourier efectuado con la velocidad del viento indica que existe una circulación local en la laguna como ha sido encontrado en otros cuerpos de agua someros cercanos al área de estudio (Alfonso, 2018; Zunino, 2018). Por otra parte, teniendo en cuenta valores registrados previamente en la laguna (Fornerón, 2012) y los presentados en esta tesis (septiembre 2016-2018), se afirma que la estación que mayor cambio presenta es el verano. La temperatura aumentó 0,8 °C, con respecto a los valores medidos en verano de 2011 y 2012. Estos valores podrían ser indicios de calentamiento local que de alguna manera influyen en la dinámica de la laguna.

La velocidad del viento mostró las máximas velocidades en primavera y la dirección dominante fue del NNW en coincidencia con el clima regional (Aliaga et al., 2017). La velocidad media del viento fue 15,8 km/h. Teniendo en cuenta este valor medio y el encontrado por Fornerón (2012) durante 2011-2012 (18,4 km/h), se puede afirmar que la velocidad del viento de la laguna disminuyó 2,6 km/h. Además, esta tendencia también fue hallada a escala local y regional dado que se observó en Monte Hermoso (Brendel et al., 2017a), en Bahía Blanca (Ferrelli et al., 2017b) y en el área de influencia de la cuenca del río Sauce Grande (Capítulo 2). Por otra parte, el análisis espectral del viento mostró el mismo comportamiento que la temperatura del aire (frecuencia anual, mensual, diaria, etc.). Sin embargo, se encontró una frecuencia de 8 h que no fue observada durante 2011-2012 por Fornerón (2012) y que, considerando también los análisis armónicos de las otras variables como la temperatura, sirvió de base para comprender la circulación local de la laguna que será presentada en el Capítulo 4.

La temperatura del agua mostró el mismo patrón que la temperatura del aire. Los máximos valores ocurren en verano, mientras que los mínimos en invierno. Además, las frecuencias obtenidas a partir del análisis de la TRF fueron similares, con importantes variaciones de la temperatura en períodos de 8 h. Esta variable también presentó resultados significativos con respecto a los valores registrados por Fornerón (2012) dado que en esta tesis, la temperatura estival e invernal aumentó +1,9 °C (2016-2018).

Por otra parte, el nivel del agua reveló importantes variaciones a lo largo del período de estudio. Esta variable mostró significativas diferencias con respecto a lo estudiado por Fornerón (2012). En este sentido, durante 2012 se registraron -115 mm de precipitación con respecto al valor medio en el área de influencia de la laguna (Capítulo 2) y como consecuencia el mínimo valor de profundidad (0,75 m) (Fornerón, 2012). Este valor no fue encontrado en esta tesis dado que el mínimo valor registrado fue 1,2 m, en concordancia con registros de precipitación más elevados que en 2011-2012 (SMN, 2018). La comparación de los resultados del análisis realizado por Fornerón (2012) y los de la presente investigación muestra que la laguna presenta significativas fluctuaciones de nivel del agua como consecuencia de la presencia de períodos secos y húmedos. Al ser una laguna poco profunda, estos ciclos climáticos la afectan significativamente. Los ciclos secos y húmedos no sólo afectan el nivel del agua sino también la conductividad eléctrica. Si bien este último parámetro fue medido de manera mensual (septiembre 2008-diciembre 2010) (Fornerón, 2012), el valor medio hallado en esta tesis fue 3,3 ms/cm, siendo ampliamente inferior a los 6,5 ms/cm registrados durante 2008-2010. Por lo tanto, es posible afirmar que la variación de este parámetro está en función de los diferentes niveles de agua que presentó la laguna en los dos períodos. Cabe destacar que la conductividad eléctrica si bien fue alta en situaciones de menor profundidad de la laguna como, por ejemplo, en abril de 2017, existieron momentos donde este parámetro presentó valores altos en condiciones de mayor nivel de agua (septiembre-octubre de 2017). El aumento de material particulado en suspensión producto del elevado caudal del río Sauce Grande durante ese período podría generar el aumento de la conductividad eléctrica de la laguna (Skarbøvik et al., 2014; Camiolo et al., 2018).

La concentración de oxígeno fue alta durante el período de estudio. Los valores más bajos fueron registrados en los momentos de escasa profundidad. Según estudios previos realizados en este cuerpo de agua, durante el período hídrico negativo y como consecuencia de la reducción de la descarga del río, se concentran los componentes disueltos en la laguna y se produce un aumento por unidad de volumen de la biomasa

de fitoplancton, zooplancton y peces, disminuyendo la concentración de ese parámetro (Quirós et al., 2002; Cony, 2018). Esta situación ha generado en sucesivas ocasiones una masiva mortandad de peces (La Nueva Provincia, 2012; Cony, 2018). Sin embargo, Jeppensen et al. (2015) indica que en lagos someros, ante bajos niveles de agua, es posible que aumente la concentración de nutrientes y de oxígeno debido a la mayor carga interna en una menor cantidad de agua.

Teniendo en cuenta la clasificación de la calidad de agua realizada por la cátedra de Limnología de la Universidad de Buenos Aires (2000) este cuerpo de agua se define como rico en oxígeno, lo que se evidencia también en otras investigaciones realizados en la misma laguna (Fornerón, 2012; Alfonso et al., 2018; Cony, 2018). Además, es importante destacar que el estudio de las tasas de oxígeno disuelto es fundamental para conocer el metabolismo de los organismos acuáticos (Alfonso et al., 2018). A través del análisis de la dinámica del oxígeno disuelto se estima la Productividad Primaria Bruta (PPB), la Respiración Ecosistémica (PEN) y la Productividad Ecosistémica Neta (PEN). Este último es resultado de la PPB y la PEN (Laas et al., 2012; Solomon et al., 2013). En este sentido, el estudio realizado para la laguna Sauce Grande utilizando datos en alta frecuencia arrojó que las tasas de PPB y PEN disminuyeron en condiciones de escaso nivel de agua (Alfonso et al., 2018).

Por último, el incremento de caudal del río Sauce Grande está en estrecha relación con las precipitaciones como ocurre en numerosas cuencas hidrográficas (Carbone et al., 2006; Bezak et al., 2016; Gil, 2009; Volonté, 2018). El curso de agua presentó tres períodos significativos de aumento de flujo que a su vez tuvieron diferente tiempo de escurrimiento, siendo mayor en E2 (ubicada en el río Sauce Grande luego de haber colectado las aguas del arroyo Las Mostazas y de la laguna). El máximo tiempo de escurrimiento hallado en este sector fue 12 días y coincidió con la crecida más significativa del río (13/9/2017). Esta situación probablemente se asocia a la escasa pendiente del terreno dado que el río se encuentra próximo a su desembocadura en el Océano Atlántico (Rabassa, 1982). Según Casado et al. (2016), este sector es una zona de planicies, donde se evidencia una estrecha relación entre el escurrimiento superficial y subterráneo, por lo que los excesos y déficits hídricos ocurren por progresión acumulada de anomalías de precipitación, generando una mayor duración del flujo. El tiempo de escurrimiento es típico de ríos de llanuras (Carbone et al., 2006). En este sector se desarrollan actividades agrícolas y ganaderas, que podrían verse afectadas por estos eventos de crecidas y generar grandes pérdidas económicas como ha ocurrido en otras áreas de llanura (Capriolo et al., 2008; Quiroz Londoño et al., 2013; Carrascal, 2017).

5. CONCLUSIÓN

El análisis de datos medidos en alta frecuencia permitió identificar los ciclos que afectan a los principales parámetros medidos y determinar parte de la dinámica lagunar. En general, todas las variables presentaron una marcada estacionalidad y estuvieron correlacionadas entre sí. Como era esperable, la temperatura del aire y del agua se relacionaron de forma altamente significativa. Lo mismo ocurrió al analizar el oxígeno disuelto con el nivel del agua, como así también este último con la conductividad del agua. La laguna Sauce Grande presentó un mayor nivel de agua al registrado entre febrero de 2011 y enero de 2012, como así también se observó un aumento de la temperatura del agua y del aire y una disminución de la conductividad y de la velocidad del viento. Por lo tanto, se comprobó que la laguna responde ampliamente a períodos pluviométricamente distintos. El análisis espectral permitió detectar procesos de interacción agua-atmósfera que serían imposibles de detectar con muestreos convencionales a escala mensual o bimensual. Por ejemplo, la temperatura del agua y del aire y la velocidad del viento mostraron ciclos de energía en 4 y 8 h. Estos resultados permitieron investigar las causas de esos ciclos y se determinó que eran el resultado de una circulación local de la laguna de origen geomorfológico. Estos resultados serán presentados en el Capítulo 4.

Por último, la variabilidad del caudal del río Sauce Grande responde a las precipitaciones. Durante el período de estudio, la cuenca baja presentó tres eventos de crecidas pero el de mayor magnitud ocurrió en septiembre de 2017, con un valor de caudal en E1 de $4,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mientras que en E2 fue $34,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Estos caudales fueron generados por precipitaciones intensas a lo largo de un día de 60 y 80 mm, respectivamente. En general, el tiempo de escurrimiento fue mayor en E2, dada la escasa pendiente del terreno. Estos resultados constituyen un aporte fundamental para el ordenamiento territorial, dado que es la primera vez que se monitorea el caudal en alta frecuencia en la cuenca baja y se considera el aporte del arroyo Las Mostazas como principal afluente del río Sauce Grande. Además, es importante dado que se estudió la relación de la dinámica del flujo con las precipitaciones como así también se realizó un análisis espacial de la cobertura de agua en diferentes escenarios de caudal, pero fundamentalmente ante un evento hidrometeorológico extremo, lo cual permitió conocer las áreas más afectadas ante un evento de esta magnitud.

CAPÍTULO 4

CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA LOCAL DE LA LAGUNA SAUCE GRANDE

1. INTRODUCCIÓN

Los cuerpos extensos de agua ejercen una acción condicionante y reguladora del tiempo y el clima local y en numerosas ocasiones su influencia se extiende hacia el interior del continente por decenas de kilómetros (Rafart et al., 2017). El viento diurno que sopla desde los mares o lagos hacia el continente y viceversa, se debe al desigual calentamiento entre el agua y la tierra y se denominan brisas de mar y de tierra, respectivamente (Garau, 2013; Benseny et al., 2015; van der Wiel et al., 2017). Una de las características más importantes del sistema de brisas es que la circulación opera de manera autónoma dentro de una circulación general de la atmósfera a escala sinóptica por lo que se denominan “vientos locales” (Garau, 2013). Además, solo se establecen en condiciones de gradiente bórico débil o nulo en la escala sinóptica y cuando la insolación es suficiente para que la temperatura de la superficie terrestre exceda la de la superficie del mar o del lago (Garau, 2013). Existen otras circulaciones locales denominadas brisa de valle-montaña que se producen por contrastes térmicos de similar manera a las de mar/lago-continente (Cortés Guajardo, 2018).

A escala mundial, se han realizado numerosas investigaciones sobre estas circulaciones locales. En relación con las brisas de mar, sus estudios se enfocan desde una perspectiva geográfica debido a las consecuencias que generan en las actividades económicas. En Mallorca (España) y en la estación estival, el alcance espacial y temporal de las brisas condiciona todas las esferas del asentamiento humano. Desde el punto de vista ambiental tiene repercusiones sobre las condiciones bioclimáticas, agroclimáticas, químicas y meteorológicas. Además, este fenómeno ha condicionado históricamente la localización, distribución y diseño de infraestructuras agrarias, arquitectónicas y turísticas y también ha determinado la actividad agraria y pesquera tradicional (Garau, 2013). En la región de Sergipe (Brasil), esta circulación local es un factor determinante del confort térmico humano (Anjos y Lopes, 2018). Por otra parte, en Boston (Estados Unidos) las brisas tienen consecuencias importantes en la calidad del aire, aumentando las concentraciones de ozono de las zonas urbanas (Geddes y Chance, 2018).

Los estudios sobre las brisas lagunares también se han centrado en los efectos sobre el ambiente o el hombre. En el Lago Gran Salado (Estados Unidos) estos eventos son recurrentes y tienen repercusiones sobre la calidad del aire, dado que dispersan y transportan los contaminantes (Blaylock et al., 2017). Estas consecuencias

también fueron registradas en las ciudades aledañas al lago Taihu (China) (Zhang et al., 2017). En Toronto, ante la presencia de este evento lacustre, las concentraciones de ozono se elevan en un 39 % (Wentworth et al., 2015). La brisa lagunar también fue caracterizada espacio-temporalmente en el lago Taihu (China) (Wang et al., 2017). Por otro lado, en numerosos desiertos del mundo con presencia de lagos, se han registrado brisas impulsadas por las marcadas diferencias reflectivas entre la arena y el agua promoviendo el desplazamiento de masas de aire desde el lago hacia el médano durante el día y en dirección contraria durante la noche (Zhang et al., 2013).

En Argentina, las brisas marinas y lagunares fueron objeto de numerosas investigaciones. Sin embargo, los estudios sobre las de origen marino son más numerosos y se han realizado en diferentes localidades de la provincia de Buenos Aires. En Ingeniero White y Monte Hermoso (MH) (Varela, 1982), en Mar del Plata y Necochea (García y Piccolo, 2004), en el balneario Marisol (Marino et al., 2005), en Monte Hermoso (Huamantínco Cisneros y Piccolo, 2011b), entre otros. Esos estudios destacan que el conocimiento de la dinámica y las características de las brisas es fundamental para la planificación turística de los diferentes espacios costeros (García y Piccolo, 2004; Huamantínco Cisneros y Piccolo, 2011b). Por su parte, la brisa lagunar ha sido escasamente explorada. Estos eventos se han analizado en la laguna La Salada (Pedro Luro, provincia de Buenos Aires) (Alfonso, 2018) y en la laguna de Puan (Zunino, 2018). En esta última, se encontró que la circulación local estaba caracterizada por vientos leves durante la noche y vientos fuertes durante el día con cambios de dirección del N-NE hacia el SSE producto de la presencia del sistema serrano de Ventania cercano a la laguna (Zunino, 2018). En este sentido, es importante destacar que en los diferentes ecosistemas la orografía y los contrastes térmicos modifican u originan vientos de carácter local (Zhang et al., 2013). No se han desarrollado estudios de presencia de circulaciones locales en la laguna Sauce Grande (LSG) y si la brisa de mar ingresa en la misma. Por lo expuesto, los objetivos de este capítulo son: i) analizar si se origina una circulación local atmosférica en la LSG y ii) evaluar si ingresa la brisa marina a este cuerpo de agua. Las mediciones en alta frecuencia permiten identificar estos fenómenos, dado que no se pudieron realizar radiosondeos en la costa lagunar.

2. METODO DE TRABAJO

2.1. Circulación local de la laguna SG

Como se explicó previamente, se utilizaron datos meteorológicos y limnológicos medidos en alta frecuencia con un intervalo de registro de 10 minutos por la boya

EMAC ubicada en la LSG (Figura 4.1). Se estudió el comportamiento de la temperatura del aire, del agua (°C) y el viento (velocidad y dirección del viento) a diferentes escalas temporales. Considerando lo observado en el análisis armónico de la TRF (Capítulo 3), donde las densidades espectrales presentaron un máximo en un período de 8 h en todas las variables, se estudió las series de tiempo mensuales, semanales y diarias con el objetivo de identificar patrones de circulación local relacionados a ese máximo de 8 h. El análisis se completó con mapas sinópticos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, Argentina), la base de datos Intellicast (<https://www.intellicast.com/Global>) actualmente <https://www.wunderground.com/maps/> y del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, Brasil). A partir de ellos, se buscaron días con situaciones sinópticas en la LSG de viento regional (geostrófico) leve o con condiciones de calma. Entonces, la hipótesis de trabajo es que si durante ese mismo día en el cuerpo de agua se registraba viento, el mismo era producto de las diferencias térmicas locales. Luego se estimó la temperatura de la superficie terrestre (TST) de la laguna y su área de influencia con el objetivo de determinar si se observaban cambios térmicos entre el médano costero y la laguna como para generar una circulación de viento local.



Figura 4.1. Localización de las estaciones EMAC en la zona de estudio.

2.1.1. Estimación de la temperatura de superficie terrestre (TST)

Para el cálculo de la TST se utilizaron cuatro imágenes satelitales Landsat 8 OLI-TIRS obtenidas del Servicio Geológico de Estados Unidos (United States Geological Survey -USGS-) (<https://www.usgs.gov>) (Tabla 4.1). Estas tienen una resolución temporal de

16 días y un tamaño de píxel de 30 metros en las bandas del espectro visible (bandas 1 a 7 y 9) y de 100 metros en las bandas del térmico (bandas 10 y 11). Las imágenes utilizadas en este capítulo correspondieron a fechas próximas a los eventos de identificación de una circulación local encontrados a partir del análisis exhaustivo de la información meteorológica (Tabla 4.1). Las mismas estuvieron libres de nubes y fueron representativas de un día típico de cada estación del año.

Tabla 4.1. Detalle de las imágenes satelitales utilizadas para el cálculo de la TST y fecha de los eventos estudiados de circulación local en la laguna Sauce Grande.

Fecha de la imagen satelital	Fuente	Path-Row	Fecha de la circulación local
15/10/2017	USGS	226-087	19/10/2017
3/1/2018	USGS	226-087	12/2/18
22/4/2017	USGS	226-087	25/5/2018
30/7/2018	USGS	226-087	2/7/2018

Una vez descargadas las imágenes satelitales, se realizaron las calibraciones que se describen a continuación y se estimó la TST. Inicialmente, se efectuó la corrección geométrica de las imágenes a partir de la técnica de puntos de control. Esta se realizó considerando puntos estratégicos seleccionados equidistantemente entre sí (Carmona et al., 2011).

El siguiente paso consistió en la calibración radiométrica de cada banda con el objetivo de convertir los valores digitales a datos de radiancia (L_{sat}) utilizando la ecuación 1:

$$L_{\lambda sat} = G_{\lambda} DN_{\lambda} + B_{\lambda} \quad (1)$$

donde λ indica el número de la banda y G_{λ} (Gain) y B_{λ} (Bias) son los coeficientes de transformación de niveles digitales a valores de radiancia. Luego, se convirtieron los valores resultantes de la ecuación 1 a valores de reflectancia, asumiendo una superficie lambertiana bajo condiciones libres de nubes y sin considerar los efectos de la atmósfera a partir de la ecuación 2 (Schroeder et al., 2006):

$$\rho_{\lambda TOA} = \frac{(\pi L_{\lambda sat})}{(E_{\lambda 0} d^{-2} \cos \theta_z)} \quad (2)$$

donde π representa la hipótesis de superficie Lambertiana, d es la distancia Tierra-Sol medida en unidades astronómicas (ua), $E_{\lambda 0}$ es la irradiancia solar espectral exoatmosférica ($W m^{-2} \mu m^{-1}$) y Θ_z es el ángulo cenital solar. Una vez realizada la corrección radiométrica, se aplicó la corrección atmosférica, considerando el método de sustracción de superficies oscuras (DOS) (Chávez, 1988) (ecuación 3):

$$\rho_{\lambda S} = \frac{\pi(L_{\lambda sat} - L_{\lambda p})}{(T_{\lambda v}(E_{\lambda 0}d^{-2}\cos\theta_z T_{\lambda z} + E_{down}))} \quad (3)$$

donde $L_{\lambda p}$ ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$) es la radiancia registrada como resultado de la interacción entre la radiación electromagnética y los componentes atmosféricos, $T_{\lambda v}$ es la trasmisividad atmosférica desde la superficie hacia el sensor, $T_{\lambda z}$ es la trasmisividad atmosférica en la dirección de la iluminación solar y E_{down} es la irradiancia difusa del cielo hacia abajo ($W m^{-2} \mu m^{-1}$).

Este método supone que la imagen presenta píxeles con una reflectividad cercana a cero (zonas oscuras) como lo son las aguas claras o profundas, zonas altamente forestadas, entre otras. De esta manera, los efectos de la atmósfera se pueden reconocer fácilmente en estos píxeles (Carmona et al., 2011). Para aplicar esta metodología es necesario sustraerle a cada $L_{\lambda sat}$ el valor del $L_{\lambda p}$ introducido por la atmósfera aplicando la siguiente ecuación (4):

$$L_{\lambda p} = ND_{\lambda dark}G_{\lambda} + B_{\lambda} - 0.01 \frac{(E_{\lambda 0}\cos\theta_z T_{\lambda z} T_{\lambda y})}{(d^2\pi)} \quad (4)$$

donde $ND_{\lambda dark}$ es el ND_{λ} mínimo de cada banda espectral para cada región de interés con un mínimo de 1000 píxeles. Este método considera una atmósfera Rayleigh sin aerosoles y una reflectividad del 1% para el objeto oscuro (Chávez, 1988).

$T_{\lambda z}$ y $T_{\lambda y}$ se calcularon a partir de las siguientes ecuaciones:

$$T_{\lambda v} = \exp\left(\frac{-T_{\lambda s}}{\cos\theta_z}\right) \quad (5)$$

$$T_{\lambda z} = \exp\left(\frac{-T_{\lambda r}}{\cos\theta_z}\right) \quad (6)$$

donde $T_{\lambda r}$ el espesor óptico para la dispersión Rayleigh obtenido por medio de la siguiente ecuación (Chávez, 1988)

$$T_{\lambda r} = \frac{0.008569}{(\lambda_m^4 (1 + 0.013 \lambda_m^2 + 0.013 \lambda_m^4))} \quad (7)$$

donde λ_m (en μm) es la longitud de onda de cada banda y E_{down} es un parámetro nulo dado que su contribución es insignificante (Song et al., 2001).

El próximo paso consistió en el cálculo de la temperatura de brillo a través de la ecuación inversa a ley de Planck (8):

$$Tb = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (8)$$

Donde Tb es la temperatura de brillo en grados Kelvin, L_λ es la reflectancia en el techo de la atmósfera (TOA) ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$), K1 y K2 son constantes de conversión específica para cada banda que se obtienen de los archivos de metadatos.

Posteriormente, se calculó el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y la proporción de la vegetación (PV), necesarios para el cálculo de la emisividad. El NDVI se obtuvo a través de la siguiente ecuación (9):

$$\text{NDVI} = \frac{R - \text{IR}}{R + \text{IR}} \quad (9)$$

donde R corresponde a la banda 4 (Rojo) e IR a la banda 5 (Infrarrojo cercano).

Por su parte, la PV se computó de la siguiente manera:

$$P_v = \left[\frac{(\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min})}{(\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min})} \right]^2 \quad (10)$$

siendo NDVI_{\min} los valores de NDVI del suelo desnudo y NDVI_{\max} los valores correspondientes a una cobertura completa por vegetación. La emisividad se obtuvo a través de la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v) \quad (11)$$

donde ε_v es la emisividad de la vegetación y ε_s la emisividad del suelo. P_v es la proporción de vegetación.

Una vez calculados los parámetros descriptos precedentemente, se utilizaron los datos de radiosondeo via online (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>) (Barsi et al., 2003;

Barsi et al., 2005) para obtener la radiación atmosférica ascendente (L_u), y descendente (L_d) y la transmisividad atmosférica (τ) y de esa manera completar la ecuación 12. Fueron consultados datos de hora y fecha de la imagen como así también la presión atmosférica, temperatura del aire y humedad relativa.

$$L_{sen} = [\varepsilon B(T_s + (1 - \varepsilon)L_d)] \tau + L_u \quad (12)$$

dónde L_{sen} : es la radiancia medida por el sensor ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), ε : emisividad de la superficie, B: Parámetro derivado de la Ley de Planck, T_s : temperatura de la superficie terrestre ($^{\circ}K$), L_d : radiancia atmosférica descendente ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$), τ : transmisividad atmosférica, L_u : radiancia atmosférica ascendente ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$).

Para obtener la temperatura de la superficie terrestre (TST), se calculó la inversa directa de la ETR (Jiménez-Muñoz et al. 2009):

$$B(T_s) = \frac{(L_{sen} - L_u - \tau(1 - \varepsilon)L_d)}{\tau\varepsilon} \quad (13)$$

Por último, la TST se logró aplicando la inversa de la ley de Planck.

2.2. Brisa de mar

La ocurrencia de brisa marina se identificó utilizando datos también medidos en alta frecuencia de la estación meteorológica EMAC Monte Hermoso ubicada a 200 metros del mar (Figura 4.2, Huamantínco Cisneros, 2012). La estación meteorológica y la boya ubicada en la LSG fue construida en las instalaciones del Instituto Argentino de Oceanografía (IADO-CONICET) por el Dr. Alejandro Vítale e instalada en diciembre de 2007. La frecuencia de medición es 5 minutos y el sistema de recepción de datos es similar a la boya ubicada en la laguna (Capítulo 3). Los parámetros que registra son presión atmosférica (hPa), temperatura del aire ($^{\circ}C$), radiación solar (w/m^2), humedad relativa (%), velocidad (km/h) y dirección del viento y precipitación (mm) de los cuales sólo se utilizaron la temperatura del aire, humedad relativa y viento (velocidad y dirección). Para la determinación de días con presencia de brisa de mar se analizaron los datos de temperatura y humedad buscando un descenso brusco de temperatura del aire y simultáneo aumento de la humedad relativa y cambio en la dirección y velocidad del viento utilizando la metodología propuesta por Zubillaga y Piccolo (1977a, 1977b, 1977c), García y Piccolo (2004) y Huamantínco Cisneros y Piccolo (2011). Se seleccionó un ejemplo por estación del año donde se detectó el evento de brisa marina y se consultaron los mapas sinópticos de las diversas fuentes de información (SMN, Intellicast, etc.). Para evaluar si la brisa de mar ingresa a la laguna,

se analizó si se generaban variaciones en la temperatura y la velocidad y dirección del viento lagunar durante los mismos días que se produjo el evento de brisa en MH.



Figura 4.2. Estación meteorológica EMAC ubicada en Monte Hermoso (Fuente: Humantincó Cisneros, 2012).

3. RESULTADOS

3.1. Circulación atmosférica local de la laguna SG

Como se mencionó precedentemente, el análisis armónico de los diferentes parámetros meteorológicos mostró un máximo de densidad espectral centrado en 8 h. Esto dio lugar a un análisis exhaustivo de las variables meteorológicas para identificar qué proceso generaba esa frecuencia en los parámetros. El análisis demostró que la laguna presenta un fenómeno de circulación local a escala diaria en las diferentes estaciones del año. Se observaron variaciones en la velocidad y dirección del viento y en la temperatura del aire y del agua que no se explicaban por las condiciones sinópticas regionales observadas en los mapas sinópticos. Por lo tanto, las mediciones de alta frecuencia demostraron la presencia de una circulación diaria lagunar generada por el microclima de la laguna. A continuación se presentan ejemplos estacionales.

3.1.1. Primavera

La situación sinóptica del día 19 de octubre de 2017 fue de buen tiempo, dado que en el área de la LSG se localizó un centro de alta presión (1018 hPa) que provocó la ausencia de nubosidad. La distribución de las isobaras indicaba que el viento regional fue mínimo (Figura 4.3). Por el contrario, las condiciones meteorológicas registradas por la estación meteorológica ubicada en la laguna mostraron un flujo de viento importante (Figura 4.4). La velocidad del viento presentó cambios significativos a partir de las 12. Su máximo valor se registró a las 16.3 h (44,8 km/h) y luego

disminuyó hasta alcanzar su valor mínimo a las 19 h (6,8 km/h) (Figura 4.4a). La dirección del viento no presentó cambios, durante el período mencionado, dado que predominaron los del sector WNW-NW (Figura 4.4a). La temperatura del agua aumentó debido a la interacción con la atmósfera. Además, se observó que esta variable presentó una rápida respuesta al aumento de la velocidad del viento, dado que a partir de las 12:10 y hasta las 12:40 h disminuyó, producto probablemente de la mezcla continua de la columna de agua (Figura 4.4b).

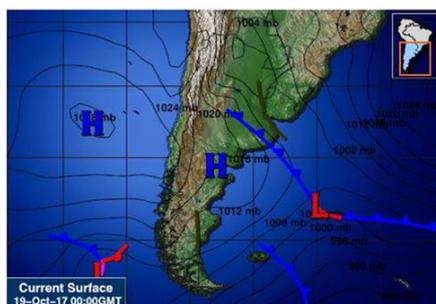


Figura 4.3. Situación sinóptica del día 19 de octubre de 2017 (Fuente: Intellicast).

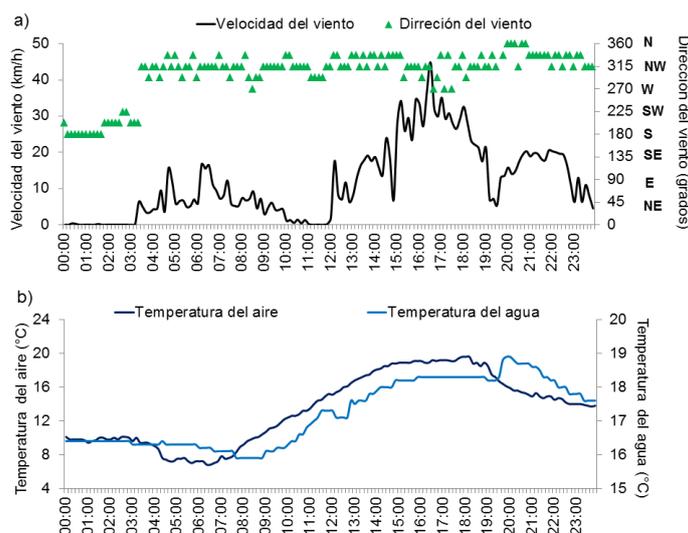


Figura 4.4. Variación diaria de los parámetros meteorológicos en la LSG durante el 19 de octubre de 2017. a) Velocidad y dirección del viento y b) temperatura del agua y del aire.

3.1.2. Verano

El día 12 de febrero de 2018 presentó una situación sinóptica estable. Un centro de alta presión (1020 hPa) se ubicó en el centro de la provincia de Buenos Aires que provocó cielo despejado y escasa circulación de viento sobre el área de estudio (Figura 4.5a y Figura 4.5b). Similarmente a lo ocurrido durante la primavera, las condiciones meteorológicas en la laguna fueron diferentes a la circulación regional

presentada en los mapas sinópticos. La velocidad media del viento durante ese día fue 18 km/h, pero a partir de las 9 h y hasta las 11.30 h, se registraron las máximas velocidades que oscilaron entre 28 km/h (9.30 h) y 40,5 km/h (9.10 h) (Figura 4.6a). La dirección del viento no registró importantes variaciones dado que las ráfagas fueron del sector WNW y NW. La temperatura del agua presentó una disminución de 0.4 °C entre las 12.30 y 13 h producto probablemente de la mayor mezcla de la columna de agua como consecuencia del incremento de la velocidad del viento (Figura 4.6b).

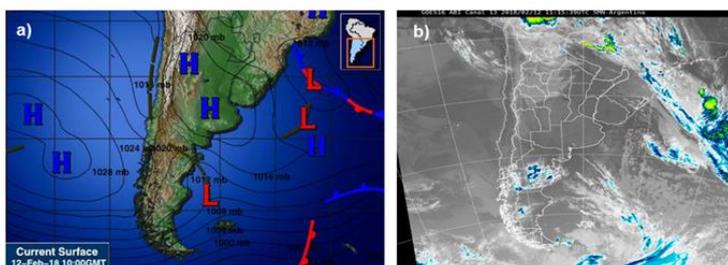


Figura 4.5. Situación sinóptica del día 12 de febrero de 2018. a) Modelo de presión atmosférica en superficie (Intellicast) y b) imagen satelital infrarroja.

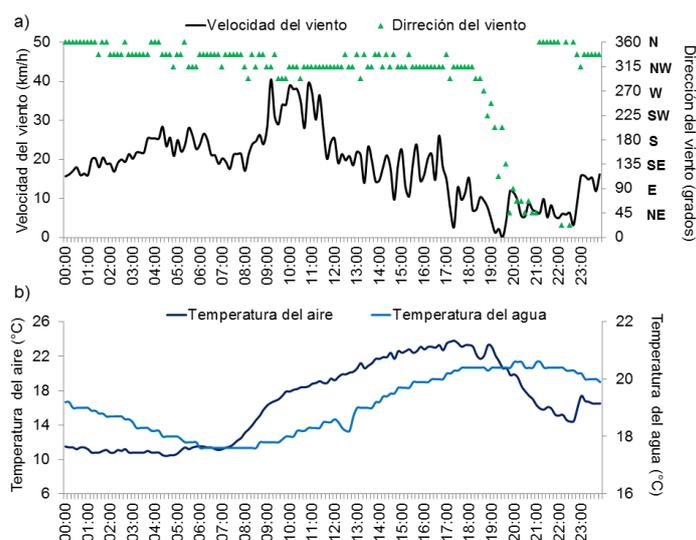


Figura 4.6. Variación diaria de los parámetros meteorológicos en la LSG durante el 12 de febrero de 2018. a) Velocidad y dirección del viento y b) temperatura del agua y del aire.

3.1.3. Otoño

El día 25 de mayo de 2018 también mostró una situación sinóptica de buen tiempo, dado que se observó la acción de un centro de alta presión (1020 hPa) ubicado al NE de la provincia de Buenos Aires (Figura 4.7a). El mismo generó un día despejado en el área de estudio y escaso viento regional (Figura 4.7b). Todas las

variables mostraron variaciones importantes a partir de las 9.30 h (Figura 4.8a). La velocidad del viento presentó un brusco aumento a partir de las 9.30 h y que se extendió hasta las 14.30 h. Durante ese período, la velocidad del viento alcanzó su máximo a las 10.30 h con un valor de 36 km/h (Figura 4.8a). La dirección del viento no cambió, dado que entre las 9.30 y 14.30 h el viento sopló del sector WNW-N (Figura 4.8a). La temperatura del agua y del aire presentaron la misma marcha a lo largo del día (Figura 4.8b).

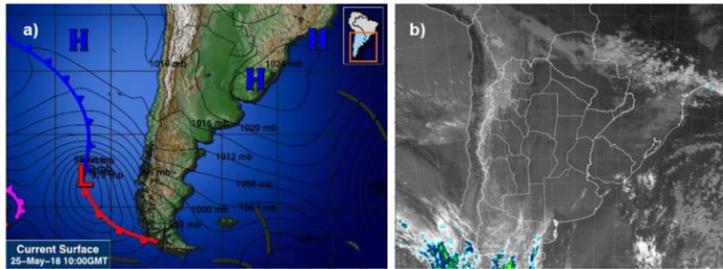


Figura 4.7. Situación sinóptica del día 25 de mayo de 2018. a) Modelo de presión atmosférica en superficie (Intellicast) y b) imagen satelital infrarroja.

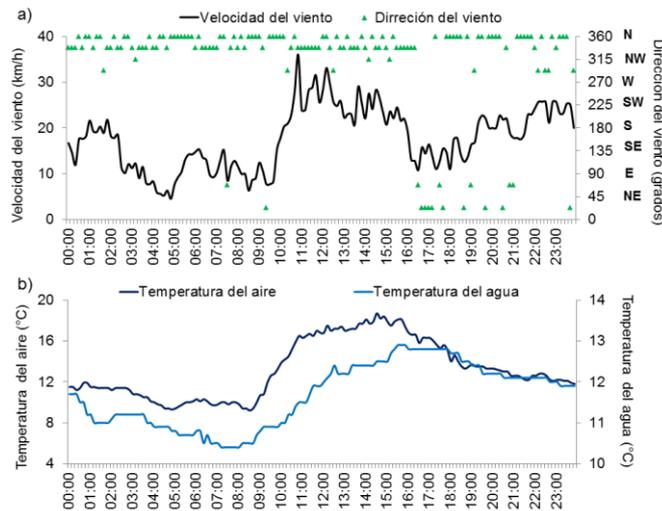


Figura 4.8. Variación diaria de los parámetros meteorológicos en la LSG durante el 25 de mayo de 2018. a) Velocidad y dirección del viento y b) temperatura del agua y del aire.

3.1.4. Invierno

El día 2 de julio de 2018 presentó condiciones de buen tiempo (escasa nubosidad y viento) sobre el área de estudio (Figura 4.9a y Figura 4.9b). Las variables mostraron cambios significativos a partir de las 9.30 h. Se observó un aumento de la velocidad del viento entre las 10 h y hasta las 16 h. Durante este período se registraron las máximas velocidades que alcanzaron los 47,5 km/h a las 15.50 h.

Además se registraron ráfagas de importante magnitud entre las 12 y las 13 h de 45 km/h (Figura 4.1a). La dirección del viento en este caso fue más fluctuante que en el resto de las estaciones del año, dado que algunas ráfagas fueron del sector WSW durante las 10 y las 16 h. Sin embargo, predominaron los del sector W (Figura 4.10a). Como ocurre naturalmente en el invierno, la temperatura del agua fue mayor que la del aire (Figura 4.10b).

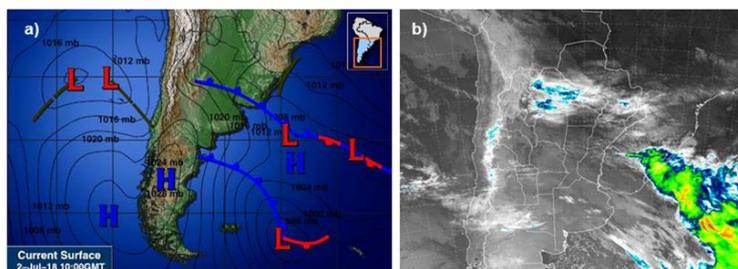


Figura 4.9. Situación sinóptica del día 2 de julio de 2018. a) Modelo de presión atmosférica en superficie (Intellicast) y b) imagen satelital infrarroja.

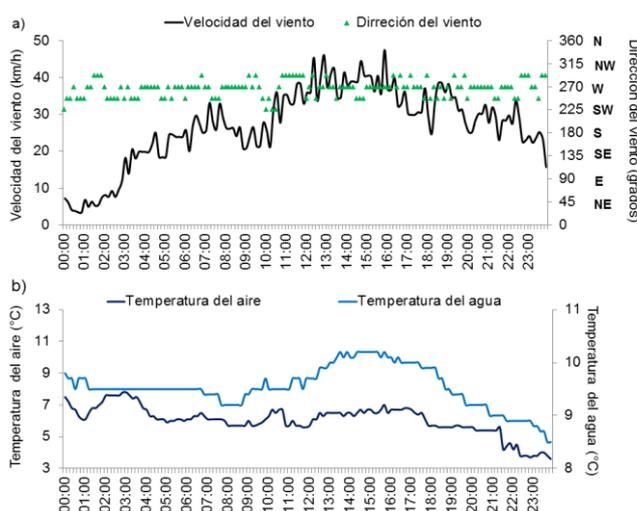


Figura 4.10. Variación diaria de los parámetros meteorológicos en la LSG durante el 2 de julio de 2018. a) Velocidad y dirección del viento y b) temperatura del agua y del aire.

Del análisis de los ejemplos precedentes se observa siempre un mismo patrón. Una circulación local que no se explica por la circulación regional. Para explicar la generación de esta circulación local se analizó la influencia del sitio donde se localiza la laguna considerando aspectos geomorfológicos.

3.2. Análisis de la Temperatura de Superficie Terrestre (TST)

La distribución espacial de la TST durante la primavera 2017 y el verano, otoño e invierno 2018 de la LSG y su área de influencia se presenta en la Figura 4.11.

Durante todas las estaciones del año, se registraron importantes diferencias de temperatura entre el cuerpo de agua y el médano que limita a la laguna (Figura 4.11). Este último presentó temperaturas ampliamente superiores a la temperatura superficial de la laguna a lo largo de todo el año. Estas diferencias fueron mayores durante el verano y menores en el invierno. De esta manera, durante la estación más cálida, el médano registró temperaturas que superaron los 28,5 °C, alcanzando valores de 39 °C mientras que en la laguna la temperatura osciló entre 18 y 21,5 °C (Figura 4.11a).

En el invierno, el médano presentó valores que oscilaron entre 8 y 8,5 °C en su superficie. Además, se registraron sectores donde esta cobertura alcanzó los 10 °C (Figura 4.11d). Por su parte, la temperatura de la laguna osciló entre 3 y 6,5 °C. En las estaciones intermedias, también se observó este mismo patrón térmico pero con menor amplitud (Figura 4.11b-c). Como se mencionó anteriormente, la laguna presentó una circulación local que se caracterizó por un aumento brusco de la velocidad del viento a partir las 9 h en el verano, otoño e invierno y a las 12 h en primavera (Figuras 4.4, 4.6, 4.8, 4.10). Por lo tanto, las significativas diferencias térmicas entre el médano (más cálido) y la laguna (más fría) explicaría la presencia de una diferencia de presión entre el médano y la laguna originando una circulación local sobre la laguna. Esto explicaría el aumento de la velocidad del viento en las horas de mayor radiación solar. Durante la noche no se observó este fenómeno. Además, es importante destacar que esta circulación se registra cuando las condiciones sinópticas regionales son de vientos mínimos, cielo despejado y escasa nubosidad.

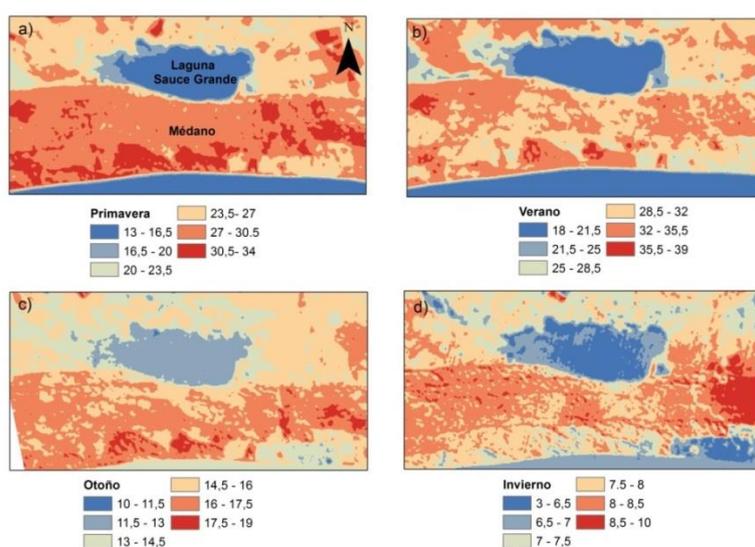


Figura 4.11. Distribución espacial de la TST durante las diferentes estaciones el año.
a) Primavera, b) verano, c) otoño y d) invierno.

3.3. Brisa de mar y su efecto sobre la circulación local de la laguna SG

La LSG se localiza a 6 km del Océano Atlántico separada del mismo por la Barrera Medanosa Austral que caracteriza la costa sur de la provincia de Buenos Aires. Estudios demuestran que la brisa de mar es un fenómeno frecuente, de fuerte intensidad y alcance inclusive en el invierno (Huamantín Cisneros y Piccolo, 2011a). A continuación se presentan cuatro ejemplos, en diferentes estaciones del año, donde se detectó la brisa de mar en MH, su ingreso en la LSG y los efectos que generó este fenómeno sobre la circulación atmosférica de la misma. El período de estudio fue marzo-diciembre de 2017.

3.3.1. Verano

Durante el día 18 de marzo de 2017 la situación sinóptica fue de buen tiempo, dado que al este de la provincia de Buenos Aires se localizaba un centro anticiclónico (1020 hPa) que generó escaso viento y ausencia de nubosidad sobre el área de estudio (Figura 4.12a y Figura 4.12b). La variación diaria de la temperatura del aire y la humedad relativa en MH y la temperatura del aire en la LSG se muestra en la Figura 4.13a, mientras que la velocidad y dirección del viento en MH y la LSG se presenta en la Figura 4.13b y 4.13c, respectivamente. Allí se observa que a pesar que toda la región presentaba buen tiempo y escaso viento en la costa se había generado la circulación local (brisa de mar) (Figura 4.13a y Figura 13b).

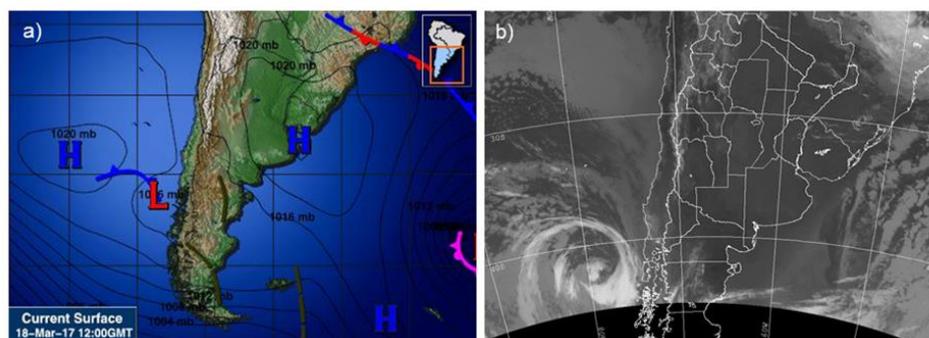


Figura 4.12. Situación sinóptica del día 18 de marzo de 2017. a) Modelo de presión atmosférica en superficie (Intellicast) y b) Imagen satelital infrarroja.

El ingreso de la brisa de mar se produjo a las 14.30 h donde se observó un brusco descenso de la temperatura del aire (-4,5 °C), con un simultáneo aumento de la humedad relativa (+21 %) y un cambio de la dirección del viento hacia el SSE junto con un aumento de su velocidad (19 km/h) (Figura 4.13a y Figura 13b). Este evento tuvo una duración de 50 minutos. Además, mostró efectos sobre la dinámica de la temperatura y el viento en la LSG 2.1 h horas más tarde. En este sitio, la dirección del

viento predominante hasta el momento que se produjo la brisa en MH era del WNW-NNW con velocidades que alcanzaron los 34 km/h (Figura 4.13c). La temperatura del aire alcanzó su máximo a las 16.30 h (25,6 °C). Sin embargo, a las 16.40 h se produjo un significativo descenso de la temperatura (-2,6 °C) y un cambio de la dirección y velocidad del viento hacia el SSE que perduró hasta las 18.30 h como consecuencia del ingreso de la brisa de mar al cuerpo de agua (Figura 4.13a y Figura 4.13c).

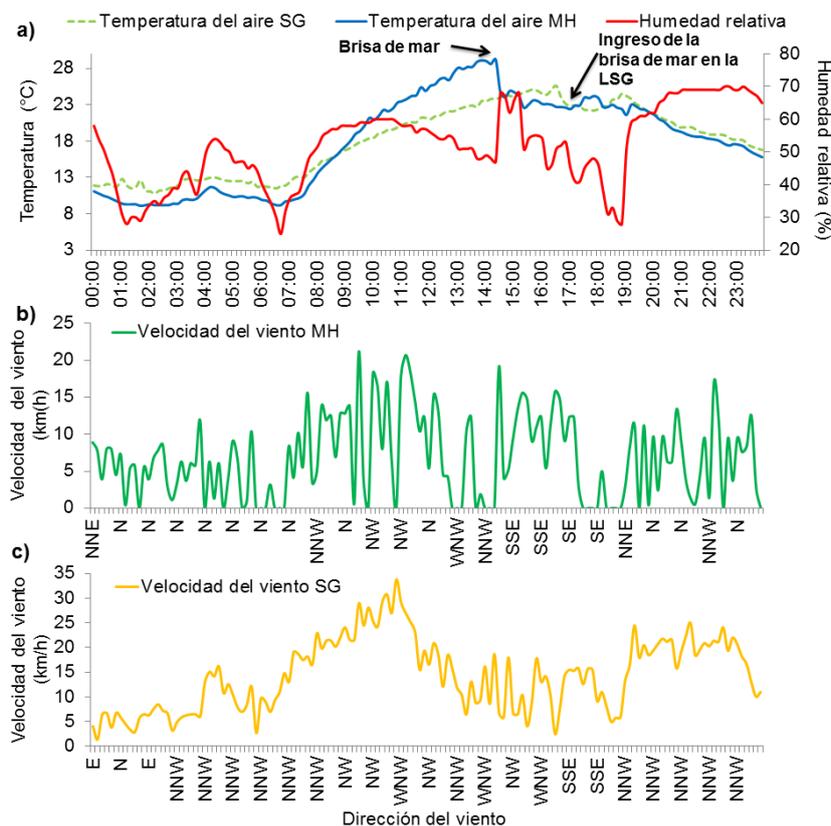


Figura 4.13. a) Variación diaria de la temperatura del aire y la humedad relativa en Monte Hermoso (MH) y la temperatura del aire en la LSG, b) velocidad y dirección del viento en MH y c) velocidad y dirección del viento en la LSG durante el día 18 de marzo de 2017.

3.3.2. Otoño

El ejemplo seleccionado de la estación otoñal es el día 6 de abril de 2017 que muestra que la región presentó condiciones atmosféricas de buen tiempo dado que al noreste de la provincia de Buenos Aires se localizó un centro anticiclónico (1016 hPa) (Figura 4.14a). Este generó vientos del sector N-NW en MH y en la LSG. En ambos sitios el cielo estuvo despejado y el viento regional fue leve (Figura 4.14b). El fenómeno de brisa marina en MH se registró a las 13.40 h y se extendió hasta las 17.30 h. Al inicio del evento, la temperatura del aire en MH disminuyó -3,3 °C, mientras

que la humedad relativa aumento un 16 % (Figura 4.15a). La dirección del viento cambió hacia el S-SW (Figura 4.15b). La brisa de mar ingresó en MH y luego llegó hasta la LSG. Su ingreso se registró en el cuerpo de agua 2.20 h más tarde, donde se observó un significativo cambio en la dirección del viento del cuadrante W hacia el S a las 16 h, con un simultáneo aumento en su velocidad lo que generó una disminución en la temperatura del aire de 1 °C (Figuras 4.15a y 4.15c).

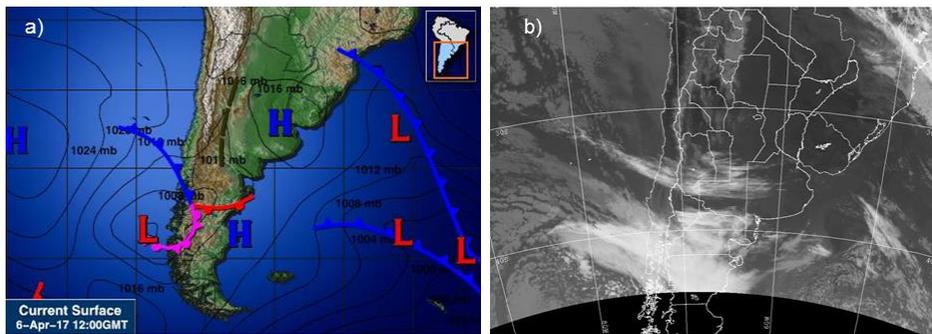


Figura 4.14. Situación sinóptica del día 6 de abril de 2017. a) Modelo de presión atmosférica en superficie (Intellicast), y b) Imagen satelital infrarroja.

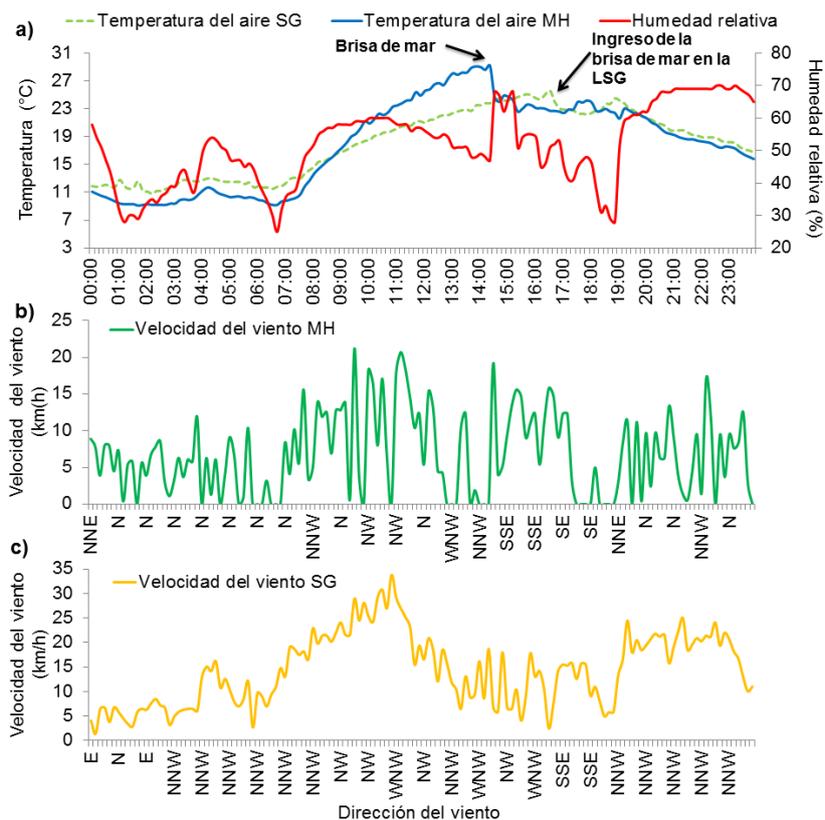


Figura 4.15. a) Variación diaria de la temperatura del aire y la humedad relativa en Monte Hermoso (MH) y la temperatura del aire en la LSG, b) velocidad y dirección del viento en MH y c) velocidad y dirección del viento en la LSG durante el día 6 de abril de 2017.

3.3.3. Invierno

El mapa e imagen satelital del día 3 de agosto de 2017 mostraron que, tanto en MH como en la LSG, la nubosidad fue escasa debido a la influencia ejercida por un centro de alta presión (1020 hPa) ubicado al norte de la provincia de Buenos Aires (Figura 4.16a y Figura 16b). El mismo provocó vientos predominantes del cuadrante Norte. Estos fueron leves como demuestra el escaso gradiente de las isobaras (Figura 4.16a). La brisa de mar en MH comenzó a las 13 h y se extendió hasta las 16:50 h (Figura 4.17a). Al ingresar este evento al continente, la humedad relativa aumentó un 28 % y la temperatura del aire disminuyó $-3,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 4.17a). La dirección del viento cambió hacia el WSW-SW con un velocidad media de $15,6\text{ km/h}$ (Figura 4.17b). Este fenómeno se registró en la LSG, 1.50 h más tarde, donde se constató un descenso de la temperatura del aire de $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ que se registró a las 14.50 h. con un paralelo cambio de dirección y un aumento brusco de la velocidad del viento del WSW (20 km/h) (Figura 4.17a y 4.17c).

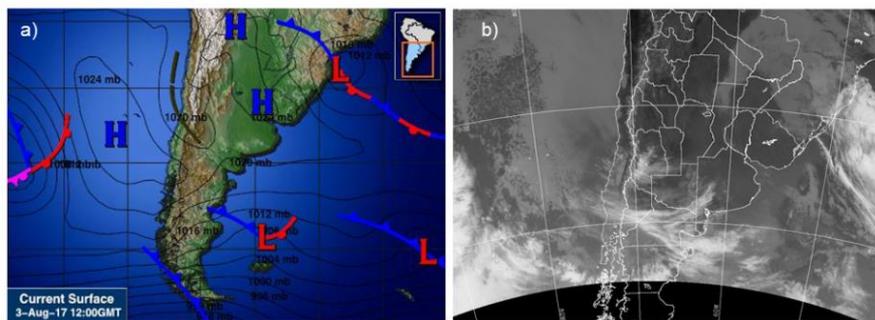


Figura 4.16. Situación sinóptica del día 3 de agosto de 2017. a) Modelo de presión atmosférica en superficie (Intellicast) y b) Imagen satelital infrarroja.

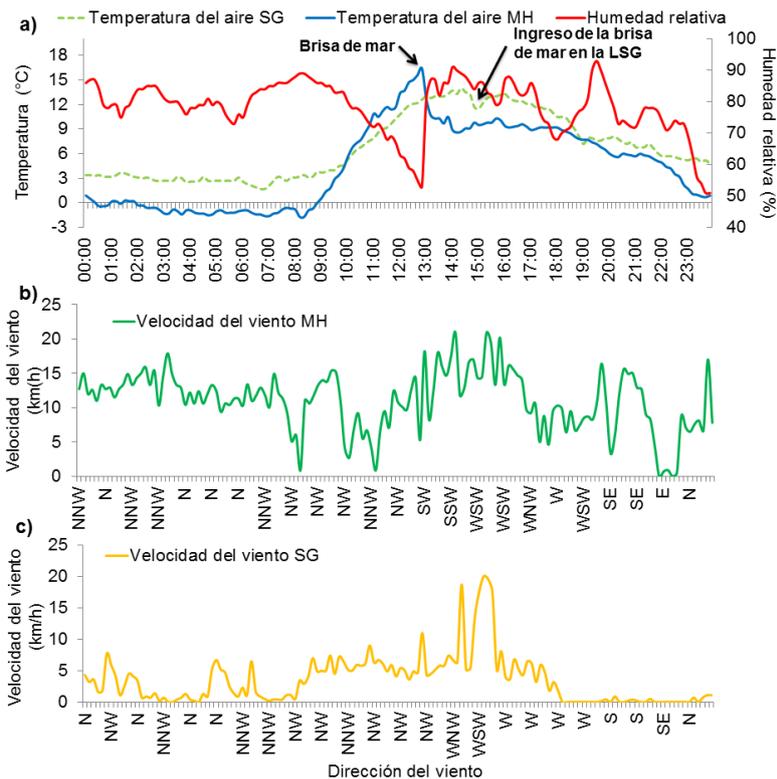


Figura 4.17. a) Variación diaria de la temperatura del aire y la humedad relativa en Monte Hermoso (MH) y la temperatura del aire en la LSG, b) velocidad y dirección del viento en MH y c) velocidad y dirección del viento en la LSG durante el día 3 de agosto de 2017.

3.3.4. Primavera

Al igual que en los ejemplos anteriores, durante el 7 de diciembre de 2017 las condiciones de la atmósfera fueron de buen tiempo, dado que al sur de la provincia de Buenos Aires se situó un centro de alta presión (cielo despejado y escaso viento regional) sobre MH y la LSG (Figura 4.18a y Figura 4.18b). En este caso, la brisa de mar se produjo a las 11 h y finalizó a las 13.10 h (Figura 4.19a). La temperatura del aire en MH descendió $-3,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que la humedad relativa aumentó 27% (Figura 4.19a). Además, la dirección del viento giró hacia el SE con una velocidad de $26,3\text{ km/h}$ (Figura 4.19b). Este evento ingresó a la laguna a las 12.10 h generando una disminución de la temperatura del aire de $-2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un aumento de la velocidad del viento del sector SE-SSE con valores que alcanzaron los 28 km/h (Figura 4.19a y 4.19c).

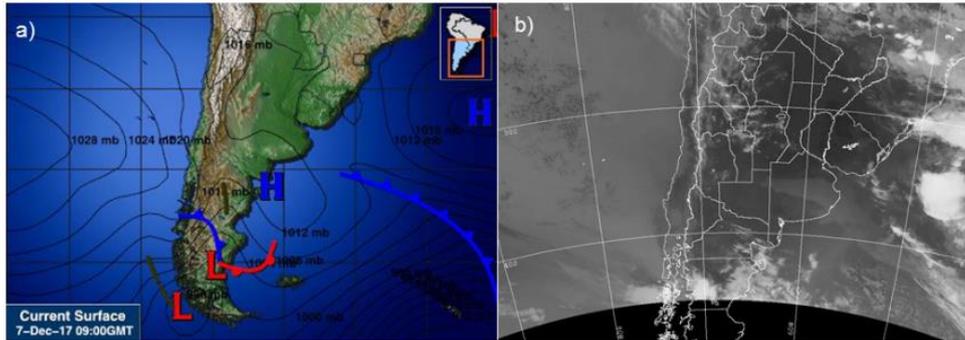


Figura 4.18. Situación sinóptica del día 7 de diciembre de 2017. a) Modelo de presión atmosférica en superficie (Intellicast), y b) Imagen satelital infrarroja.

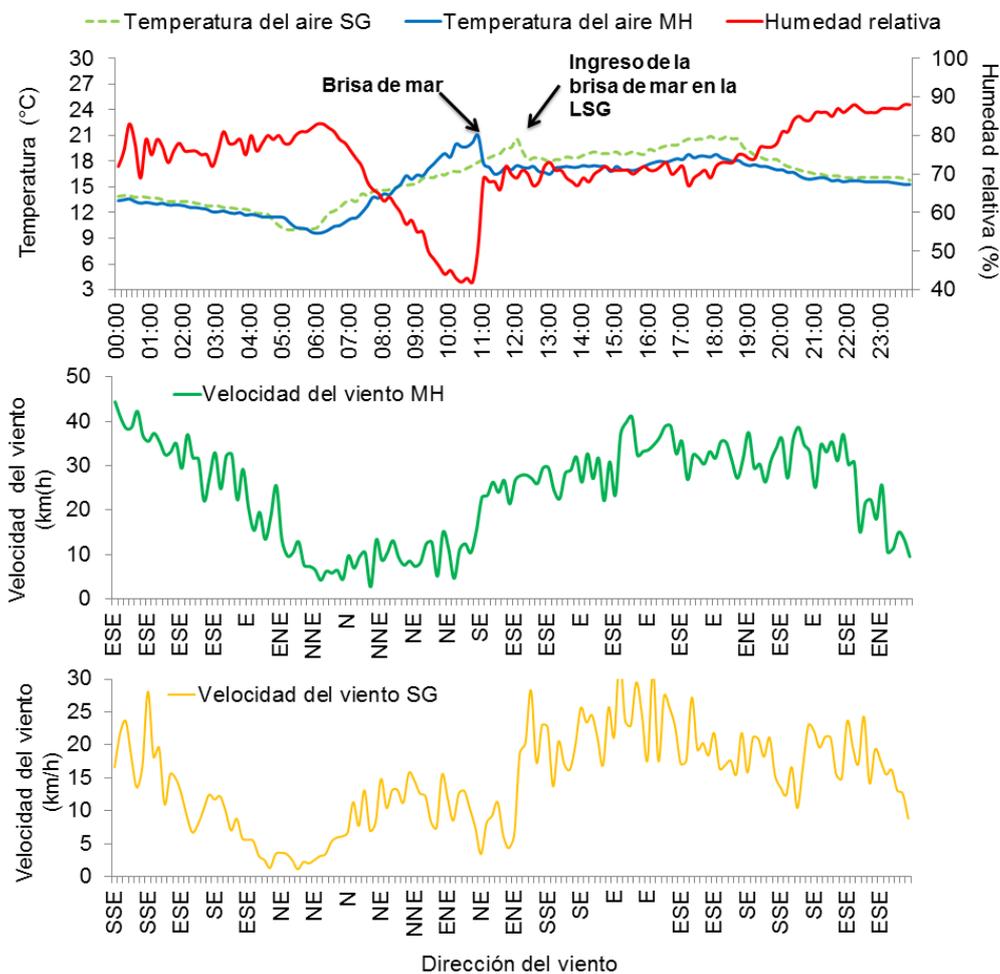


Figura 4.19. a) Variación diaria de la temperatura del aire y la humedad relativa en Monte Hermoso (MH) y la temperatura del aire en LA LSG, b) velocidad y dirección del viento en MH y c) velocidad y dirección del viento en la LSG durante el día 7 de diciembre de 2017.

4. CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN

4.1. Circulación atmosférica local de la LSG impulsada por diferencias térmicas

En este capítulo se demostró por primera vez que la LSG presenta una circulación local, caracterizada por un significativo aumento de la velocidad del viento durante las horas cercanas al mediodía. Estos eventos ocurrieron en su mayoría durante días con nula o escasa nubosidad y vientos regionales mínimos, producto de la influencia de anticiclones. Las marcadas diferencias térmicas encontradas entre la laguna (más fría) y el médano que la limita (más cálido) generan diferencias de presión y como consecuencia la formación de un viento local desde la laguna hacia el médano en horas de mayor radiación solar. Este proceso, se ha encontrado en otras regiones del mundo. Según Zhang et al. (2013) en numerosos desiertos de arena del mundo que poseen cuerpos de agua, las características reflectivas de la superficie del agua y la arena son diferentes. Esto genera que la temperatura del aire por encima y cerca del agua sea más fría que la de la arena durante el día, mientras que por la noche sucede lo contrario. Estas diferencias diurnas de temperatura crean cambios en el campo de presión y, por lo tanto, promueven el desarrollo del viento desde el lago hacia los médanos (Zhang et al., 2013). Esta situación también fue hallada en el desierto de Badain Jaran (China) que presenta a lo largo de su extensión 144 cuerpos de agua (Zhang et al., 2017). Estos autores encontraron que la velocidad del viento aumentaba en horas del mediodía (generándose una brisa desde el lago hacia la duna) y lo opuesto durante la noche, debido a las diferentes propiedades termodinámicas. En el Valle del Lago Salado de Utah también se registró este fenómeno (Clements et al., 2003; Pinto et al., 2006; Crosman y Horel, 2010), pero producto del desigual calentamiento entre las montañas y el lago durante el día y la noche. Por otra parte, en la laguna de Puan (provincia de Buenos Aires) se halló una circulación local que estuvo caracterizada por vientos de baja intensidad del N-NE durante la noche y vientos intensos del SSE durante el día (Zunino, 2018). Esta situación ocurre durante días con condiciones sinópticas regionales de buen tiempo como en los ejemplos presentados en esta tesis. Esta autora encontró que las variaciones en la velocidad del viento estaban afectadas por el sistema serrano de Ventania, produciéndose un fenómeno similar a la brisa de valle-montaña.

Considerando que la mayoría de los estudios se realizaron sobre lagos muy extensos y profundos (Clements et al., 2003; Pinto et al., 2006, Zhang et al., 2017), los resultados encontrados en este capítulo son un aporte valioso, dado que no solo se detectó la presencia de una circulación local en una laguna somera, sino que se

determinó su origen. El mismo estuvo basado en los contrastes térmicos que existen entre la laguna y la geomorfología adyacente (médano).

4.1. Efecto de ingreso de la brisa de mar sobre los parámetros meteorológicos de la LSG

La brisa de mar es un viento costero de escala local y periódico que se origina por diferencias de temperatura entre el mar y el continente (García y Piccolo, 2004; Benseny y Padilla, 2015; van der Wiel et al., 2017). Su estudio es fundamental dado que su accionar influye directamente sobre la sensación de confort percibida por el hombre (Huamantínco Cisneros, 2012). En esta tesis, se investigó este fenómeno en la ciudad costera de MH durante el período marzo-diciembre de 2017 y se analizó si este evento ingresa a la laguna. Según Humanantínco Cisneros y Piccolo (2011), quienes realizaron un estudio de este fenómeno en MH durante diciembre de 2007 y julio de 2010, las brisas más frecuentes provienen del sector ESE (26 %), seguidas del SE (18 %). También se registran brisas del sector E y S (13 %) y menores al 10 % en el resto de las direcciones de viento. Además, concluyeron que el 52,5 % de las brisas ocurrieron entre las 12 y las 14 h en coincidencia con las horas de mayor insolación. Las mismas tuvieron una duración promedio de dos horas y media, mientras que algunos eventos se extendieron hasta cuatro horas y media (Humantínco Cisneros y Piccolo, 2011).

En esta tesis, las brisas registradas durante marzo y diciembre de 2017 tuvieron una duración media de 2:40 h y las más veloces fueron las del ESE (26 km/h), ocurridas durante la primavera. Por su parte, la de menor duración se presentó en el verano (50 minutos). La dirección de las mismas fue variable pero en todos los ejemplos analizados las brisas presentaron vientos con un componente S. Por lo tanto, la caracterización de las brisas analizadas en esta tesis se encuentra dentro del patrón estudiado por Humantínco Cisneros y Piccolo (2011). Los eventos de brisa marina ocurridas en MH generaron cambios en la velocidad y dirección del viento y en la temperatura del aire de la LSG. En general, el descenso térmico fue 2,6 °C y junto con las variaciones del viento, se reflejaron aproximadamente dos horas más tarde en la laguna. Los vientos dominantes en MH y en la LSG provienen del sector N-NNW, producto de la influencia ejercida por el Anticiclón Semipermanente del Atlántico (Delgado et al., 2012; Brendel et al., 2017a). Por lo tanto, en la mayor parte de los ejemplos descritos se presentaron esas frecuencias de dirección de viento. Sin embargo, estas orientaciones se modificaron tras el ingreso de la brisa marina en la laguna. Luego de este evento, el viento sobre el cuerpo de agua presentó la misma

dirección que la brisa de mar y se produjo un aumento de la velocidad proveniente de ese sector.

El conocimiento de ambos eventos es esencial para la planificación de las actividades turísticas. Teniendo en cuenta que en la laguna se desarrollan actividades como la pesca y los deportes náuticos, su funcionamiento podría verse afectado por el incremento del viento generado por su propia circulación o bien por el desconfort térmico generado por el ingreso de masas de aire con componente S producto de la brisa marina.

CAPÍTULO 5

CALIDAD DEL AGUA DE LA CUENCA MEDIA Y BAJA DEL RÍO SAUCE GRANDE

1. INTRODUCCIÓN

Las cuencas hídricas son sistemas complejos dado que las características geomorfológicas, geográficas, climáticas, de uso del suelo y geológicas están estrechamente relacionadas (Sheng, 1992; Gil, 2009). Desde un punto de vista hidrológico, se las define como áreas de tierra donde la totalidad del agua superficial o subsuperficial es drenada por el sistema de corrientes y confluye en un mismo punto (Davie, 2008; Formica et al., 2015). Son espacios de vital importancia dado que brindan múltiples servicios, pero el más importante es el abastecimiento de agua para el consumo de la población y las actividades agrícolas e industriales (Martinez-Valdés y Villalejo-García, 2018). Estas últimas, en muchas ocasiones, modifican las características físicas, químicas y biológicas de los cursos y cuerpos de agua (Seeboonruang, 2012). La principal alteración de la calidad del agua en los ecosistemas acuáticos continentales está generada por el aporte de nutrientes, favoreciendo los procesos de eutrofización de sus aguas (Carpenter et al., 2011) con consecuencias sobre algunas actividades humanas tales como la pesca, la recreación, el suministro de agua potable, entre otras (Carpenter et al., 2011).

La calidad del agua de las cuencas hidrográficas ha sido objeto de numerosos estudios con diferentes objetivos. En la cuenca del río Jequetepeque (4372 km², Perú) se determinó la calidad de agua para el uso agrícola tras la medición de la conductividad eléctrica, pH, salinidad, oxígeno disuelto, sólidos totales disueltos y temperatura del agua (Padilla, 2016). El fósforo y nitrógeno sumado a las variables descritas anteriormente fueron medidas a lo largo de 67 sitios en los ríos de la cuenca del lago Taihu (36.895 km², China) con el objetivo de analizar su calidad y la variación espacio-temporal de los parámetros estudiados (Wu et al., 2018). En ese mismo país, se realizó un estudio integral de todos los cursos y cuerpos de agua que conforman la cuenca del lago Poyang (China) e incluyó el análisis de 14 variables limnológicas en 29 sitios de muestreo. Esta investigación permitió determinar la fuente de contaminación de los ecosistemas acuáticos de esa cuenca (Duan et al., 2016). En la cuenca del río Klang, (1.288 km², Malasia) se monitoreó la calidad del agua en 20 estaciones de medición (Mohamed et al., 2015). Para ello, se analizaron siete parámetros limnológicos que permitieron comprender su dinámica temporal y espacial. Estos autores concluyeron que es fundamental implementar planes de manejo para la cuenca, dado el efecto que tienen las actividades agrícolas sobre la calidad del agua

de los ríos. Estudios similares se han realizado en Uruguay tras el monitoreo de la calidad del agua de una laguna eutrófica (Laguna Sauce, Maldonado) y de sus sistemas fluviales asociados (Crisci et al., 2017).

En el área de regadío del río Mendoza (Argentina) se analizaron las variables limnológicas con el objetivo de evaluar las variaciones espacio-temporales y relacionarlos con las actividades agrícolas, humanas e industriales (Morábito et al., 2005). Además, en la cuenca de los ríos Ceballos y Salsipuedes (provincia de Córdoba, Argentina) se analizó la calidad del agua dado que constituyen la principal fuente de abastecimiento para el consumo humano y la recreación en las ciudades de la zona. Los resultados evidenciaron una marcada influencia antrópica sobre el medio natural (Formica et al., 2015).

La Región Pampeana es una vasta llanura que presenta ríos, arroyos y lagunas de diferente extensión (Bohn, 2009). En ella, la calidad del agua de sus ecosistemas acuáticos ha sido ampliamente investigada dado que la agricultura y la industria, las principales actividades económicas, han generado el deterioro de sus recursos hídricos producto del aporte de nitrógeno y fósforo (Torti et al., 2014). Por ejemplo, en la sub-cuenca del río Reconquista (provincia de Buenos Aires) se demostró que la calidad del agua de sus arroyos está afectada por las descargas residuales industriales (Basílico et al., 2016), mientras que en la cuenca del río Gualeguaychú (provincia de Entre Ríos) la principal fuente de contaminación proviene de los agroquímicos y los fertilizantes utilizados. Esto ocurre fundamentalmente en períodos de intensas precipitaciones, dado que al aumentar la cantidad de partículas de suelo que son arrastradas hacia los ríos y arroyos, se produce una mayor turbidez de los mismos (Juárez et al., 2016).

Los cuerpos de agua, principalmente los someros, han sido ampliamente estudiados en la Región Pampeana. Entre las investigaciones más recientes y desarrolladas en el sur de esta región se destacan los realizados en las lagunas de Encadenadas del Oeste y sus arroyos asociados (Geraldi, 2009), laguna Sauce Grande (Fornerón, 2012; Ferrer et al., 2012; Baleani et al., 2017; Alfonso et al., 2018), laguna de Puan (Zunino, 2018), laguna La Salada (Alfonso, 2018), entre otros. En todos ellos se estudiaron las características físicas, químicas y biológicas. En la cuenca del río Sauce Grande las investigaciones fueron realizadas fundamentalmente en su sector alto, dada la importancia socio-económica que tiene el dique Paso de las Piedras en la provisión de agua potable a más de 360.000 habitantes. En muchas ocasiones, la eutrofización generó que el suministro de agua no cumpla con todos los

requerimientos para su consumo. Espósito et al. (2016) analizaron la contaminación natural y la eutrofización del arroyo El Divisorio que descarga sus aguas en este dique y encontró que el nitrógeno y el fósforo producen los disturbios más significativos en el sistema acuático durante los períodos de mayor escorrentía superficial (primavera y verano). Por su parte, Orioli et al. (2008) también realizaron estudios limnológicos en el tramo alto de la cuenca del río Sauce Grande para caracterizar la calidad del agua del embalse y de sus afluentes. En la cuenca media y baja las investigaciones son menos frecuentes. La mayoría de ellas se centraron en el cuerpo de agua más extenso de la cuenca baja (laguna Sauce Grande) (Fornerón, 2012, Ferrer et al., 2012; Baleani et al., 2017; Alfonso et al., 2018) mientras que Cony (2018) realizó una caracterización limnológica de la laguna y del río Sauce Grande en el sector más cercano a la descarga del mismo en el cuerpo de agua. Sin embargo, no existen estudios que realicen una caracterización limnológica de todos los ríos del sector medio y bajo en sus distintos tramos, fundamentalmente del arroyo Las Mostazas, el cual es afluente del río Sauce Grande y de la zona más próxima a la descarga del río en el Mar Argentino. Por lo tanto, el objetivo del presente capítulo fue analizar la variación espacio-temporal de las principales variables limnológicas a lo largo de los diferentes ríos y arroyos de la cuenca media y baja del río Sauce Grande como así también en la laguna homónima.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Sitios y frecuencia de los muestreos y medición

Se realizaron cuatro campañas de muestreo y medición a lo largo de las diferentes estaciones del año (abril-diciembre de 2016) (Tabla 5.1). El número de sitios para recolectar la información se estableció teniendo en cuenta el área de las diferentes partes de la cuenca. Dado que la cuenca baja tiene una extensión superior que la cuenca media (Figura 5.1) se seleccionó un mayor número de sitios. De esta manera, se eligieron seis en el sector bajo y dos en el medio, contabilizado un total de ocho sitios de muestreo (Figura 5.1, Tabla 5.2).

En el río Sauce Grande se consideraron cuatro sitios (RSG1, RSG2, RSG3, RSG4), dos sobre el arroyo Las Mostazas (LMZ1 y las MZ2), uno sobre el arroyo Las Cortaderas (LC) y uno sobre la laguna SG (LSG) (Figura 5.1 y Figura 5.2). En cada campaña se siguió el mismo itinerario de viaje. El primer sitio de muestreo fue el río Sauce Grande (RSG1) (cuenca media) luego de drenar 8 kilómetros aguas abajo del dique Paso de las Piedras (Figura 5.1). El segundo fue sobre el arroyo Las Cortaderas (LC) (cuenca baja) a 16 km de su nacimiento. El tercer punto fue en el arroyo Las

Mostazas (LM1) (cuenca baja), mientras que el cuarto fue sobre el arroyo Las Mostazas luego de haber colectado las aguas del arroyo Las Cortaderas (LMZ2) (cuenca baja). El quinto sitio de muestreo fue el río Sauce Grande luego de su desembocadura de la laguna homónima y la confluencia del arroyo Las Mostazas (RSG4), siendo el sexto la laguna SG (cuenca baja) (Figura 5.1). Por último, los puntos siete y ocho también se situaron sobre el río Sauce Grande, pero el denominado RSG3 se encuentra más cercano a la laguna (16 km aproximadamente) y en la cuenca baja, mientras que el denominado RSG2, se posicionó a 32 km de la laguna SG y se ubicó sobre sobre la cuenca media (Figura 5.1).

Tabla 5.1. Fechas de las diferentes campañas de muestreo.

Fecha de muestreo	Estación
27/04/2016	Otoño
18/07/2016	Invierno
28/09/2016	Primavera
28/12/2016	Verano

Tabla 5.2. Localización geográfica de los ocho sitios de muestreo y medición en la cuenca media y baja del río Sauce Grande.

SITIO DE MUESTREO	LATITUD	LONGITUD
RSG1	-38.486342°	-61.785304°
RSG2	-38.762528°	-61.712036°
RSG3	-38.881666°	-61.59983°
RSG4	-38.946222°	-61.242914°
LMZ1	-38.65588°	-61.327607°
LMZ2	-38.761393°	-61.341645°
LC	-38.450763°	-61.461747°
LSG	-38.938383°	-61.354232°

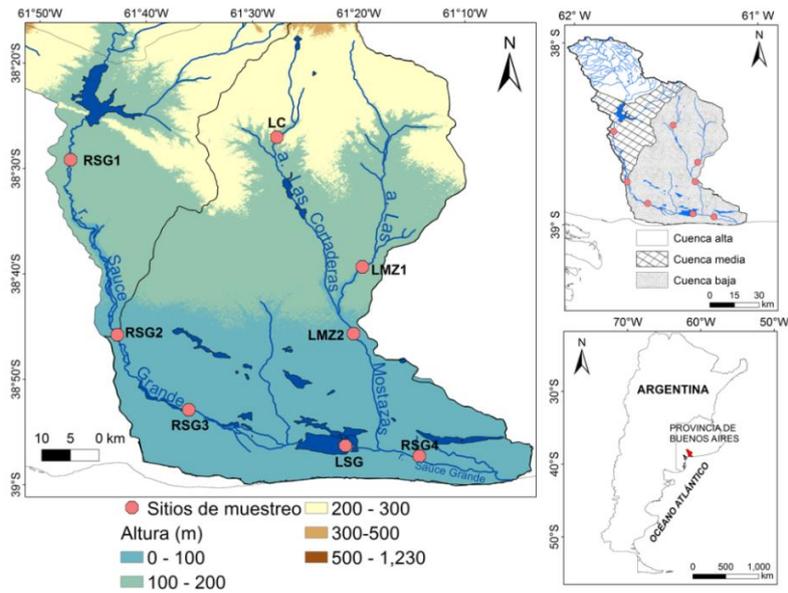


Figura 5.1. Localización de los sitios de muestreo y medición en la cuenca media y baja del río Sauce Grande.

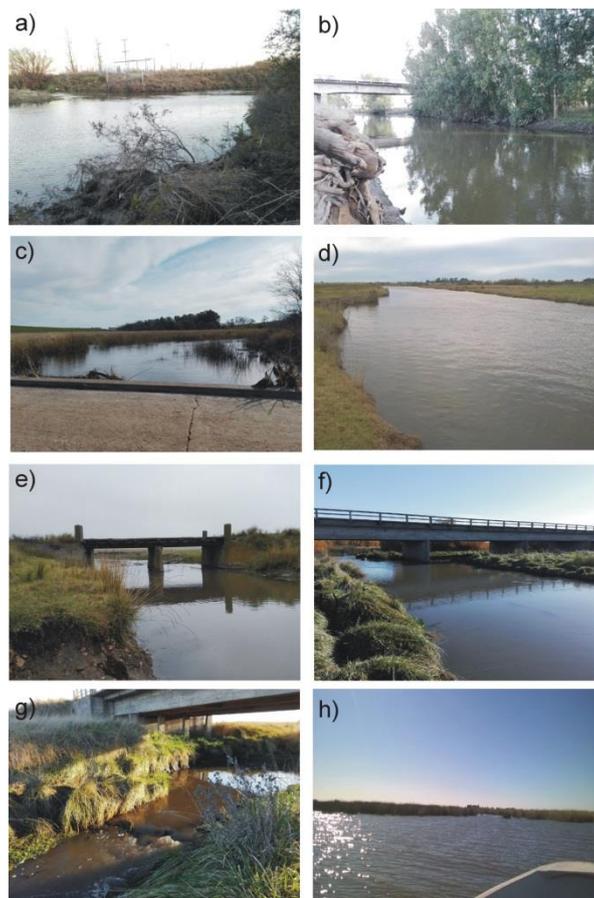


Figura 5.2. Sitios de muestreo y medición en la cuenca media y baja del río Sauce Grande. a) RSG1, b) RSG2, c) RSG3, d) RSG4, e) LMZ1, f) LMZ2, e) LC y h) LSG.

2.2. Mediciones limnológicas

En cada uno de los sitios seleccionados se midieron parámetros físico-químicos de manera sub-superficial (15-20 cm), utilizando una sonda multiparamétrica HORIBA U10®. La misma fue calibrada antes de cada campaña. Los parámetros registrados fueron temperatura del agua (°C), concentración de oxígeno disuelto (OD, mg L⁻¹), pH y conductividad eléctrica (CE, mS cm⁻¹). A partir de los valores de CE, se calculó la salinidad (S) siguiendo la metodología propuesta por Richards (1990) (1):

$$S \text{ (mg L}^{-1}\text{)} = CE \text{ (mS cm}^{-1}\text{)} * 640 \quad (1)$$

Para clasificar los ambientes estudiados según su concentración de OD se utilizó la clasificación propuesta por la Cátedra de Limnología de la UBA (2000) (Tabla 5.3).

Tabla 5.3. Clasificación de un cuerpo de agua según la concentración de OD propuesto por la Cátedra de Limnología de la UBA (2000).

Categorías	OD (mg L ⁻¹)
Rico	> 7
Moderadamente rico	5 - 7
Débil	3 - 5
Pobre	1 - 3
Anóxico	< 1

Por otro lado, en cada uno de los puntos estipulados se tomaron muestras de agua para la determinación de seston (mg L⁻¹), materia orgánica particulada (MOP, mg L⁻¹), nutrientes (mg L⁻¹) y concentración de clorofila a (Cl a, µg L⁻¹). Las muestras de agua también fueron obtenidas a 15-20 cm de profundidad. Se utilizaron bidones de polietileno de 5 L de capacidad que fueron acondicionados previamente. Las muestras fueron refrigeradas en una heladera portátil hasta su posterior procesamiento en el laboratorio.

Para la determinación de sólidos totales en suspensión (seston) se filtró el agua de las muestras recolectadas. El volumen filtrado dependió de cada sitio y de las condiciones del día de medición. En la laguna fue entre 140 y 300 ml, mientras que en los ríos, entre 100 y 1960 ml. Se utilizaron filtros Whatman GF/F 45 mm de diámetro que fueron muflados a 450 °C durante 1,5 h y luego pesados con una balanza analítica previo a cada campaña. Luego del filtrado, fueron secados en estufa a 60 °C hasta que alcanzaron un peso constante (24 h, aproximadamente). La concentración final de seston se obtuvo por diferencia de peso entre el filtro secado en estufa y el peso inicial. Posteriormente, para estimar la concentración de MOP, los filtros que contenían el material seco fueron colocados en la mufla a 530 °C durante 3 h y luego fueron

pesados nuevamente. Por diferencia de peso entre el filtro secado en estufa y el peso del filtro después de la mufla se obtuvo la concentración de MOP.

Para la determinación de la concentración de nutrientes, el agua fue filtrada utilizando los mismos filtros que para la determinación de seston y MOP. Las muestras fueron conservadas a -20 °C hasta el momento de su procesamiento. La determinación de nitrógeno total (NT) se realizó a través del método semi-micro Kjeldahl, mientras que el fósforo total (PT) se realizó a partir de la digestión en medio ácido y determinación por espectrometría de emisión por plasma. Las determinaciones fueron realizadas por el laboratorio de Análisis Químicos LANAQUI (CONICET-UNS).

Para determinar la concentración de Cl a se filtraron entre 30 y 63 ml de agua utilizando filtros de 25 mm de diámetro (Whatman GF/F) hasta su saturación. El método para determinar este parámetro fue el espectrofluorométrico (Marker, 1980). Cada filtro fue colocado en un tubo tipo Falcon utilizando 8 ml de acetona 90 % como solvente de extracción. Posteriormente, las muestras fueron centrifugadas y por último se realizó su lectura, utilizando un Fluorómetro TURNER, previamente calibrado con extracto de Cl a pura.

Para analizar el estado trófico de la laguna Sauce Grande (LSG) se utilizó la clasificación realizada por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 1982) y el Índice de Estado Trófico (IET) propuesto por Carlson (1983). Ambas metodologías consideran tres parámetros fundamentales: la profundidad de visión del disco de Secchi (TDS), la concentración de Cl a y la concentración de PT. El IET fue calculado de la siguiente manera:

$$IET (TDS) = 60 - 14,41 * \ln (TDS) \quad (2)$$

$$IET (Cl a) = 9,81 * \ln (Cl a) + 30,6 \quad (3)$$

$$IET (PT) = 14,42 * \ln (PT) + 4,15 \quad (4)$$

De acuerdo con los valores que alcanzan el IET, el cuerpo de agua puede ser clasificado de cuatro maneras: Oligotrófico (IET < 30), Mesotrófico (IET > 30 - < 60), Eutrófico (IET > 60 - < 90) e Hipereutrófico (IET > 90). Por otro lado, la OCDE define cinco categorías diferentes del estado trófico de un cuerpo de agua. El criterio de clasificación se presenta en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Categorías tróficas de un cuerpo de agua según la OCDE (1982).

Categoría	\bar{x} Cl a ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Cl a máxima ($\mu\text{g L}^{-1}$)	\bar{x} TDS (m)	TDS mínima (m)	PT ($\mu\text{g L}^{-1}$)
Ultraoligotrófico	≤ 1	$\leq 2,5$	≥ 12	$\leq 1,5$	≤ 4
Oligotrófico	$\leq 2,5$	≤ 8	≥ 6	≥ 3	≤ 10
Mesotrófico	2,5 - 8	8 - 25	6 - 3	3 - 15	10-35
Eutrófico	8 - 25	25 - 75	3 - 1,5	1,5 - 0,7	35-100
Hipereutrófico	≥ 25	≥ 75	$\leq 1,5$	$\leq 0,7$	≥ 100

2.3. Análisis de los datos

Para determinar las relaciones entre las variables limnológicas se realizó un análisis de correlación de Spearman, mientras que para identificar la existencia de patrones espaciales se aplicó un análisis de conglomerados. Por otro lado, se aplicó un análisis componentes principales (ACP) con el objetivo de detectar las variables limnológicas más importantes que determinan la calidad del agua de los ambientes analizados. Estas tres técnicas fueron realizadas en los softwares Infostat (versión estudiantil) y SPSS. Para realizar el análisis de conglomerados se empleó el método jerárquico de Ward (Ward, 1963) con un intervalo de distancia euclidiana al cuadrado como medida de disimilaridad. Esta técnica ha sido ampliamente utilizada en estudios limnológicos de cuencas hidrográficas del mundo (Azhar, et al., 2015; Chow et al., 2016; Duan et al., 2016).

3. RESULTADOS

3.1. Variables limnológicas en la cuenca media y baja del río Sauce Grande

3.1.1. pH

El promedio anual de pH de todos los sitios analizados fue $9,6 \pm 0,1$. La LSG fue la que presentó el mayor valor de pH medio (9,9), seguido del sitio LMZ1, mientras que el mínimo fue registrado en el punto RSG2 (9,4) (Figura 5.3a). Sin embargo, todos los puntos muestreados a lo largo de la cuenca media y baja presentaron condiciones alcalinas.

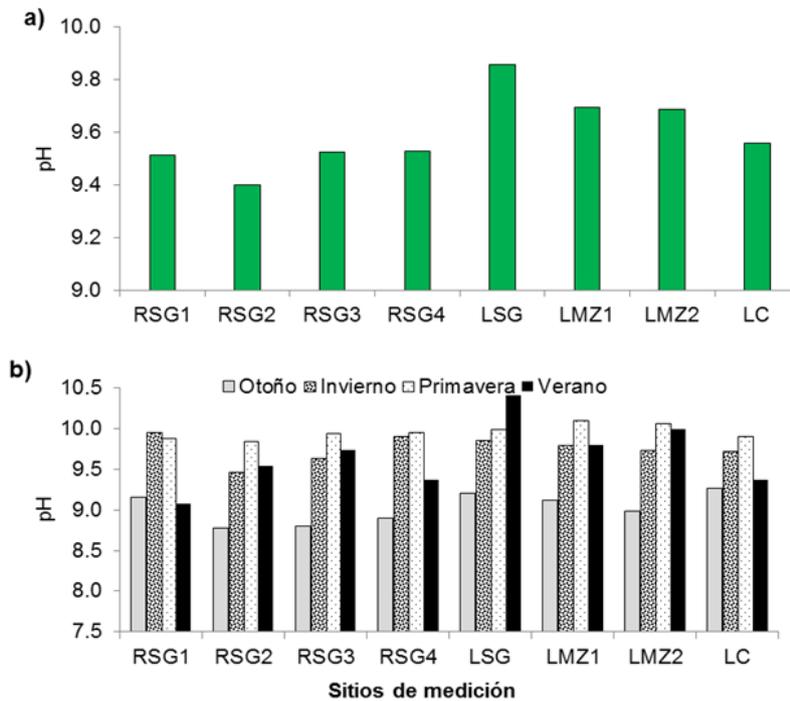


Figura 5.3. pH en los sitios de medición de la cuenca media y baja del río Sauce Grande. a) pH medio durante el período de estudio y b) pH estacional.

Por otra parte, se encontró un significativo patrón espacial (Figura 5.3a). Los valores de pH fueron levemente superiores sobre el arroyo LMZ y LC (9,7) que a lo largo del RSG antes de su ingreso en la laguna homónima (RSG1, RSG2, RSG2, RSG3) (9,5) (Figura 5.3a). Estacionalmente esta variable fue mayor durante la primavera ($10 \pm 0,1$) y menor durante el otoño ($9 \pm 0,2$) El valor máximo registrado fue durante el verano en la LSG (10,4), mientras que el mínimo fue en el RSG2, durante el otoño (8,8) (Figura 5.3b).

3.1.2. Oxígeno disuelto

El valor medio anual de oxígeno disuelto (OD) de todos los ambientes analizados fue $5,8 \pm 0,7 \text{ mg L}^{-1}$. Teniendo en cuenta la clasificación propuesta por la Cátedra de Limnología de la UBA (2000) y considerando su promedio anual los sitios muestreados se clasificaron como moderadamente ricos en OD.

Este parámetro también mostró un significativo patrón espacial a lo largo del (Figura 5.4a). Fue aumentando a medida el RSG drena sus aguas hacia la LSG (Figura 5.4a). Además, fue escasamente inferior en los sitios de medición sobre el RSG antes y luego de su desembocadura en la laguna (RSG1, RSG2, RSG3, RSG4) (valor medio: $5,6 \text{ mg L}^{-1}$) que en los analizados sobre el arroyo Las Mostazas (LMZ1,

LMZ2) y Las Cortaderas (LC) (6 mg L^{-1}). La LSG presentó un valor medio de $6,3 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 5.4a).

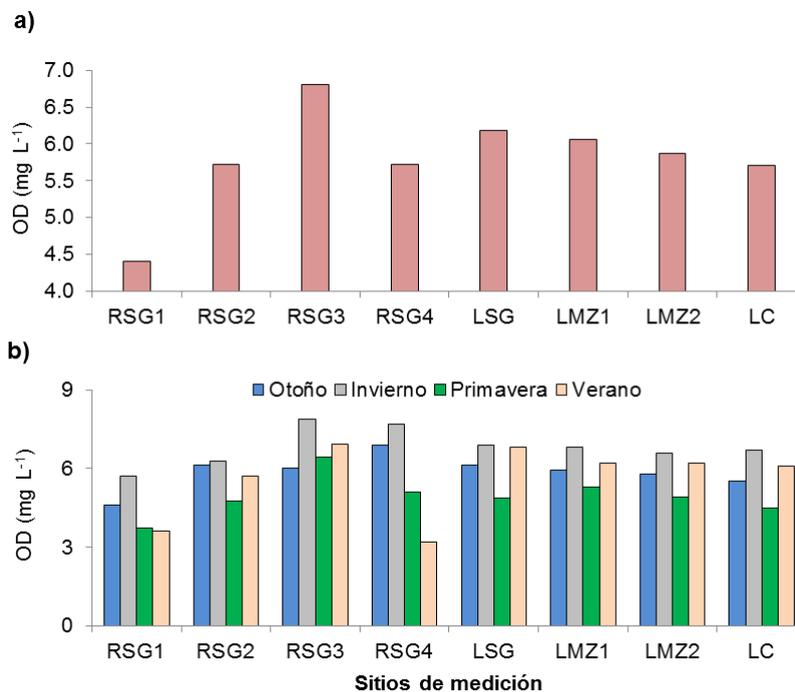


Figura 5.4. Oxígeno disuelto (OD) en los sitios de medición de la cuenca media y baja del río Sauce Grande. a) Valor medio de OD durante el período de estudio y b) OD estacional.

El OD tuvo una marcada estacionalidad. Fue mayor en el invierno (valor medio: $6,8 \text{ mg L}^{-1}$), y menor en la primavera (valor medio: $4,9 \text{ mg L}^{-1}$) (Figura 5.4b). En el resto de las estaciones el promedio fue $5,9 \text{ mg L}^{-1}$. El máximo valor fue registrado en el sitio RSG3 durante el invierno ($7,8 \text{ mg L}^{-1}$, rico en oxígeno), mientras que mínimo valor en el verano ($3,2 \text{ mg L}^{-1}$, débil concentración de OD) en sector más cercano a la descarga del RSG en el Océano Atlántico (RSG4) (Figura 5.4b).

3.1.3. Temperatura del agua

El valor medio de temperatura del agua de todos los sitios analizados fue $14,2 \pm 5,9 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 5.5), presentando un valor máximo de $25,7 \text{ }^\circ\text{C}$ en el sitio RSG3, durante el verano y un mínimo de $5,8 \text{ }^\circ\text{C}$ en el arroyo LC, durante el invierno. Este parámetro presentó una variabilidad claramente estacional. El verano fue la estación que registró el máximo valor medio ($23 \text{ }^\circ\text{C}$), mientras que el invierno el mínimo ($7,8 \text{ }^\circ\text{C}$) (Figura 5.5).

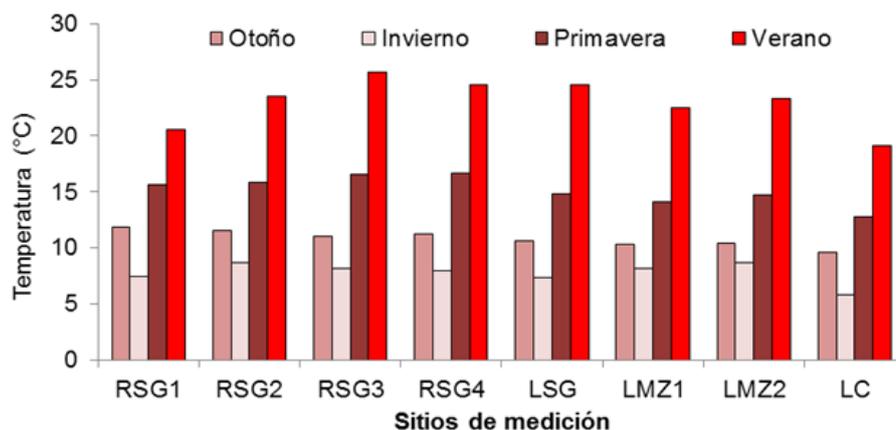


Figura 5.5. Temperatura del agua estacional en los sitios de medición de la cuenca media y baja del río Sauce Grande.

Se observaron diferencias espaciales de este parámetro. El RSG, antes de su desembocadura en la laguna homónima (RSG1, RSG2, RSG3) fue más cálido que el arroyo LMZ (LMZ1, LMZ2) y LC (14,7 °C y 13,3 °C, respectivamente) (Figura 5.5). La LSG presentó un promedio anual de 14,3 °C, mientras que en el punto más cercano a su descarga en el mar (RSG4), el valor de temperatura del agua anual fue 15,1 °C. Por lo tanto, el patrón espacial se caracterizó por tener valores bajos en el RSG hasta la LSG y altos en su desembocadura (RSG4) (Figura 5.5). Cabe señalar que no se observó un marcado patrón espacial en los arroyos LC y LMZ.

3.1.4. Conductividad eléctrica

El promedio anual de conductividad eléctrica (CE) fue $1,9 \pm 0,2 \text{ ms cm}^{-1}$, mientras que el de salinidad (S) fue $1,2 \pm 0,1 \text{ g L}^{-1}$. Se observó un marcado gradiente espacial. El mismo estuvo caracterizado por un aumento de la CE (y como consecuencia de la S) desde el primer punto de medición sobre el RSG (RSG1) hacia la LSG (Figura 5.6a). El valor medio anual de CE en el sitio RSG1 fue $1,1 \text{ ms cm}^{-1}$. Estos valores fueron mayores en la LSG (CE anual $2,7 \text{ ms cm}^{-1}$, S anual $1,7 \text{ g L}^{-1}$) y superior en el sector más cercano a la descarga en el Océano Atlántico (RSG4) ($2,9 \text{ ms cm}^{-1}$) (Figura 5.6a). A lo largo de los puntos medidos sobre el arroyo LMZ, también se registró una marcada variación espacial. La CE fue mayor en el sitio denominado LMZ2 ($2,3 \text{ ms cm}^{-1}$) (Figura 5.6a). Estacionalmente fue mayor en el otoño y fue disminuyendo gradualmente hacia el verano (valor medio de CE: $2,1 \text{ ms cm}^{-1}$, S: $1,3 \text{ g L}^{-1}$ y CE: $1,7 \text{ ms cm}^{-1}$, S: $1,1 \text{ g L}^{-1}$, respectivamente) (Figura 5.6b).

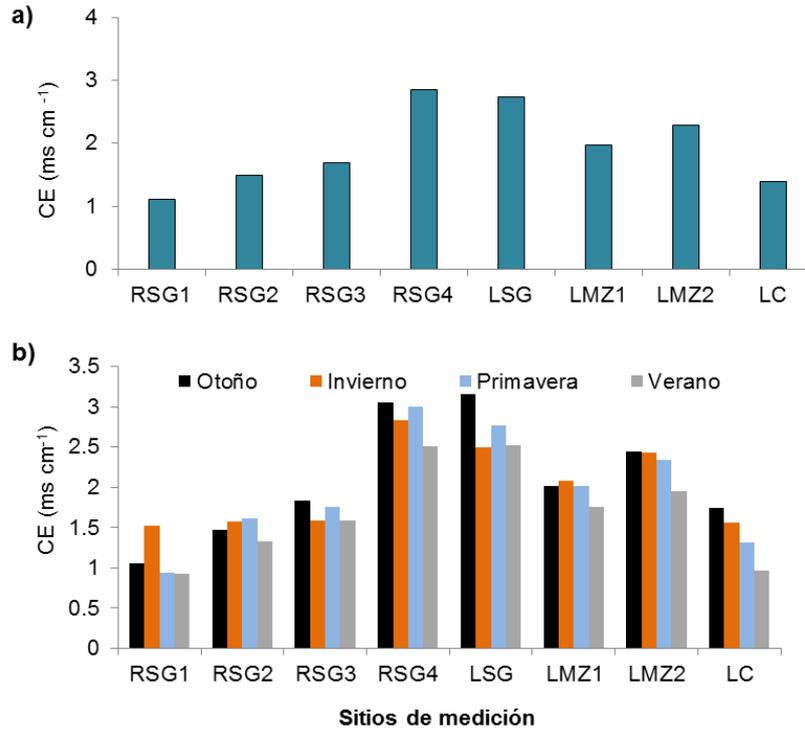


Figura 5.6. Conductividad eléctrica (CE) en los sitios de medición de la cuenca media y baja del río Sauce Grande. a) Valor medio durante el período de estudio y b) CE estacional.

3.1.5. Sestón y MOP

La concentración media de sestón de todos los ambientes muestreados durante el período de estudio fue $27,3 \text{ mg L}^{-1}$, mientras que la de MOP fue $13,8 \text{ mg L}^{-1}$. Se detectó una marcada diferenciación espacial. En los tres sitios de medición sobre el río SG antes de su ingreso en la laguna (RSG1, RSG2, RSG3), se presentaron las menores concentraciones de sestón y MOP de todos los puntos analizados (Figura 5.7a). Por otra parte, conforme el río SG aguas abajo del dique Paso de las Piedras recorre una mayor extensión e ingresa en la laguna, la concentración de sestón fue aumentando (RSG1: 3 mg L^{-1} , RSG2: $6,2 \text{ mg L}^{-1}$, RSG3: $6,7 \text{ mg L}^{-1}$), hasta llegar a $55,9 \text{ mg L}^{-1}$ en el cuerpo de agua (Figura 5.7a). El río SG luego de su salida de la laguna y de haber colectado las aguas del arroyo Las Mostazas (RSG4), presentó una concentración media de sestón de $21,3 \text{ mg L}^{-1}$ que resultó elevada. El arroyo LC presentó la máxima concentración media de sestón de la cuenca media y baja ($57,5 \text{ mg L}^{-1}$), indicando que es el más turbio (Figura 5.7a). A su vez, este sitio registró valores altos durante el otoño y el verano ($>80 \text{ mg L}^{-1}$). La LSG tuvo un máximo de sestón en el verano seguido de la primavera (80 y 63 mg L^{-1} , respectivamente) (Figura 5.7b).

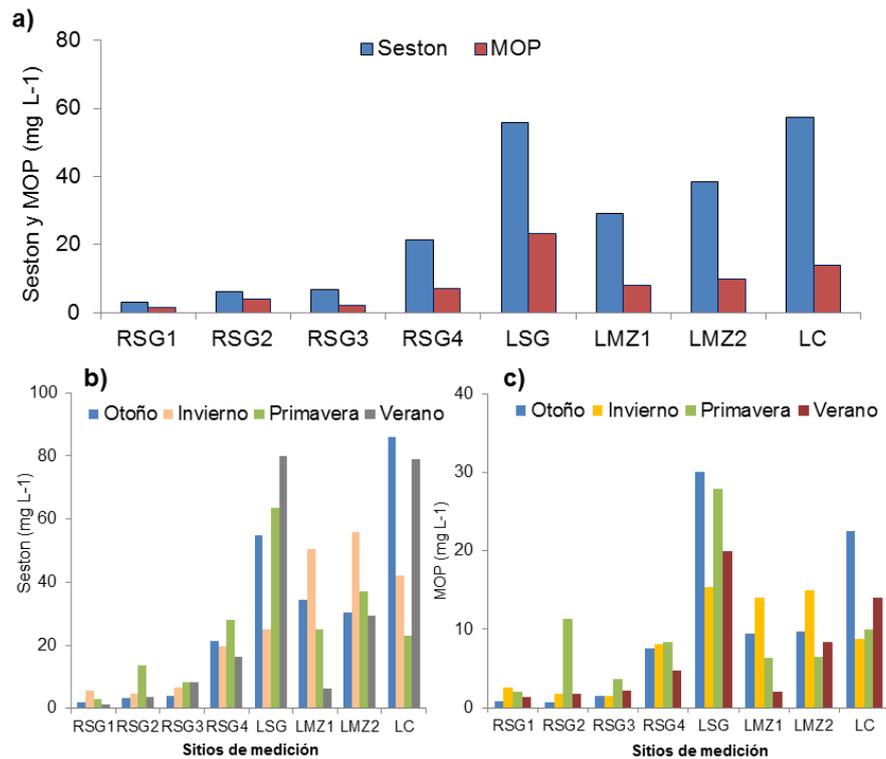


Figura 5.7. Seston y Materia Orgánica Particulada en los sitios de medición de la cuenca media y baja del río Sauce Grande. a) Valor medio de ambos parámetros durante el período de estudio, b) seston estacional y c) MOP estacional.

3.1.6. Nutrientes

La concentración promedio de Nitrógeno Total (NT) de todos los sitios analizados fue $13,6 \pm 6,3 \text{ mg L}^{-1}$. Se evidenció un significativo patrón espacial de este nutriente durante el período de estudio. El mismo, se caracterizó por una disminución de su concentración a medida el RSG va recorriendo mayor extensión e ingresa a la laguna homónima (Figura 5.8a). El NT medio en el sitio más distal de la laguna (RSG1) fue 17 mg L^{-1} , mientras que en el RSG2 fue de $12,9 \text{ mg L}^{-1}$ y en el más cercano al cuerpo de agua fue $11,2 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 5.8a). Este último valor fue similar a lo encontrado en la LSG. Además, se registró un comportamiento diferente en los sectores analizados a lo largo de los arroyos LMZ1, LMZ2 y LC. La concentración media de NT en estos sitios fue mayor que las encontradas a lo largo del RSG antes de su ingreso en la laguna ($14,7$ vs $13,7 \text{ mg L}^{-1}$) y fue aumentando conforme el arroyo LMZ se encuentra más cerca de confluir con el RSG. En el sitio LMZ2 (que colectó las aguas del arroyo LC), el valor promedio de NT fue 15 mg L^{-1} . El NT se mantuvo elevado en el punto de medición más cercano a la desembocadura del río SG en el mar (RSG4). El mismo fue de $12,4 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 5.8a).

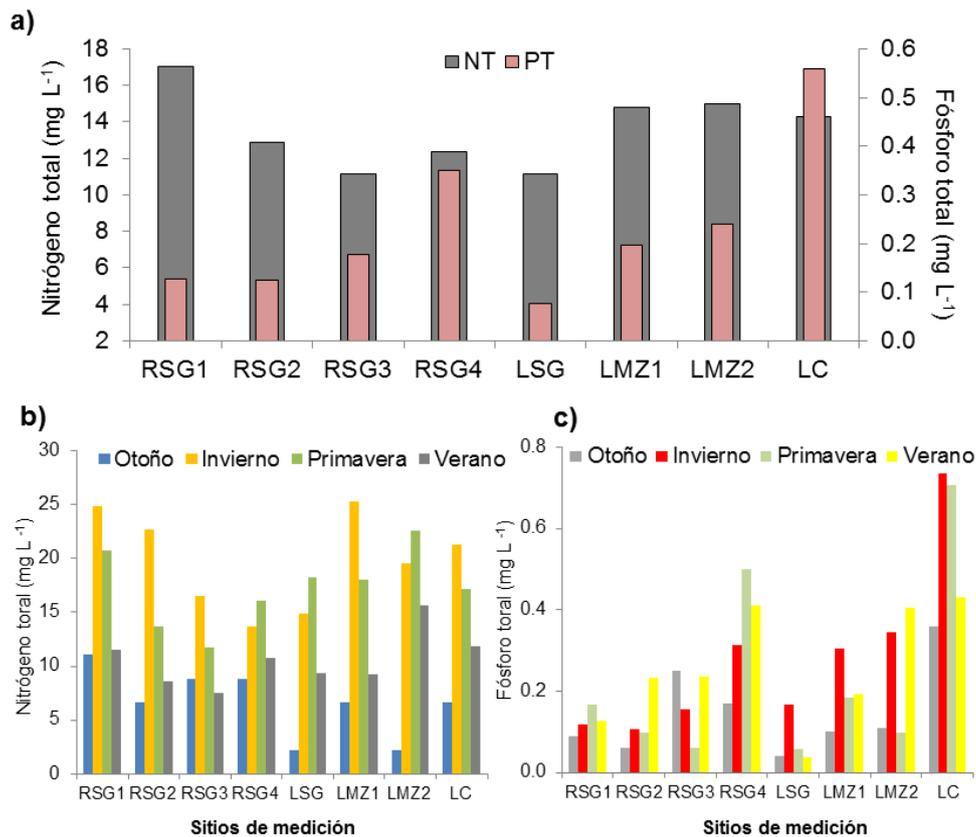


Figura 5.8. Nitrógeno (NT) y Fósforo total (PT) en los sitios de medición de la cuenca media y baja del río Sauce Grande. a) Valor medio de ambos nutrientes durante el período de estudio, b) y c) NT y PT estacional, respectivamente.

Los valores de NT mostraron una marcada estacionalidad de sus valores (Figura 5.8b). La mayor concentración se encontró durante el invierno y la primavera (19,9 y 17,3 mg L⁻¹, respectivamente), mientras que la menor en el otoño (6,6 mg L⁻¹) (Figura 5.8b). Teniendo en cuenta la variación espacial del NT, el máximo valor fue registrado en el arroyo Las Mostazas (LMZ1) (25,3 mg L⁻¹), durante la estación más fría, mientras que el mínimo en la laguna SG y el arroyo LC, durante el otoño (2,2 mg L⁻¹) (Figura 5.8b). En el caso de la LSG, el cuerpo de agua más extenso de la cuenca baja, la máxima concentración de NT se encontró en la primavera (18,2 mg L⁻¹) (Figura 5.8b).

Por otro lado, la concentración media de PT de todos los puntos muestreados fue más baja que la encontrada en el NT (0,2 ± 0,1 mg L⁻¹) (Figura 5.8a). Durante el período de estudio, el PT se mantuvo similar en los sitios RSG1 y RSG2 (0,1 mg L⁻¹) y aumentó escasamente en el RSG3 (0,2 mg L⁻¹). En la laguna se registró el mismo valor que en los dos primeros lugares (Figura 5.8a). El PT fue significativamente mayor en la cuenca de drenaje del arroyo LMZ. Se destaca el arroyo LC por presentar el valor medio más alto de PT de todos los sitios analizados (0,6 mg L⁻¹) (Figura 5.8a).

Estacionalmente, la concentración de PT fue mayor durante el invierno ($0,3 \pm 0,2 \text{ mg L}^{-1}$) (Figura 5.8c) y presentó valores altos durante la primavera ($0,23 \text{ mg L}^{-1}$). El valor medio estuvo influenciado por el arroyo LC quien presentó $0,7 \text{ mg L}^{-1}$. La LSG presento gran variabilidad de PT a lo largo del período de estudio. En este sitio, durante todo el año el PT fue menor a $0,06 \text{ mg L}^{-1}$ y se elevó considerablemente en el invierno ($0,17 \text{ mg L}^{-1}$) (Figura 5.8c).

3.2. Correlación de Spearman

A lo largo de la cuenca media y baja del RSG se observó que el pH y el NT estuvieron correlacionados de manera positiva ($r^2 = 0,60$, $p < 0,01$). La CE presentó una fuerte correlación positiva con el seston y la MOP ($r^2 = 0,54$, $p < 0,01$) (Tabla 5.5). Estas dos últimas variables también se correlacionaron positivamente con alto grado de ajuste ($r^2 = 0,89$, $p < 0,01$). El OD se relacionó inversamente con la TAG ($r^2 = -0,44$, $p < 0,05$). Por último, el PT no se correlacionó significativamente con el resto de las variables (Tabla 5.5).

Tabla 5.5. Matriz de correlación de Spearman de las variables limnológicas obtenidas en los ocho sitios de medición a lo largo de la cuenca media y baja del río SG. CE: conductividad eléctrica, OD: oxígeno disuelto, TAG: temperatura del agua, MOP: materia orgánica particulada, PT: Fósforo total y NT: Nitrógeno total. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$.

	pH	CE	SESTON	OD	TAG	MOP	PT	NT
pH	1	0.20	0.26	-0.04	0.19	0.28	0.02	0.60**
CE	0.20	1	0.54**	0.30	-0.11	0.55**	-0.09	-0.12
SESTON	0.26	0.54**	1	0.19	-0.14	0.89**	0.15	0.05
OD	-0.04	0.30	0.19	1	-0.44*	0.12	0.04	-0.04
TAG	0.19	-0.11	-0.14	-0.44*	1	-0.17	-0.02	-0.29
MOP	0.28	0.55**	0.89**	0.12	-0.17	1	0.08	0.04
PT	0.02	-0.09	0.15	0.04	-0.02	0.08	1	0.20
NT	0.60**	-0.12	0.05	-0.04	-0.29	0.04	0.20	1

3.3. Análisis de componentes principales (ACP)

Los dos primeros componentes obtenidos a partir del ACP explican el 29,6 y 21,5 % de la varianza total, respectivamente (Figura 5.9). Las variables que contribuyeron al primer componente (C1) fueron la MOP, seston y CE, mientras que el NT y pH fueron las más importantes en el segundo componente (C2) (Figura 5,9, Tabla 5.6). La disposición de las variables y su relación con los sitios de medición y la fecha de muestreo se presentan en la Figura 5.9. A lo largo del C1 los sitios de muestreo se ordenaron de acuerdo con su elevado contenido de seston y MOP,

destacándose la LSG en verano y primavera y el arroyo LC, en otoño. Además, la LSG, el arroyo LC y el RSG4 fueron los de mayor CE. Por el contrario, los sitios RSG1, RSG2, RSG3 (antes de su ingreso en la LSG) mostraron bajos valores de CE, MOP y seston en el otoño y el verano (Figura 5.9).

El C2 reflejó una marcada diferenciación estacional del NT, dado que fue elevado durante el invierno y la primavera y lo opuesto se registró en el verano y el otoño. El arroyo LC, LMZ1, RSG (en sus tres sitios antes del ingreso a la laguna) fueron los de mayor concentración de NT durante el invierno, mientras que la LSG, el RSG4 y el arroyo LMZ2 fueron los más importantes durante la primavera. El pH, la segunda variable de mayor peso en el C2, agrupó a la mayor parte de los sitios de medición durante la primavera, excepto la LSG, dado que su valor máximo fue registrado en el verano.

Tabla 5.6. Matriz de componentes principales. Los valores en negrita corresponden a las variables más importantes en cada eje.

Variables	C1	C2
pH	0.18	0.57
CE	0.51	-0.16
SESTON	0.56	0.02
OD	0.25	-0.07
TAG	-0.18	-0.07
MOP	0.59	-0.08
PT	0.04	0.40
NT	-0.07	0.69

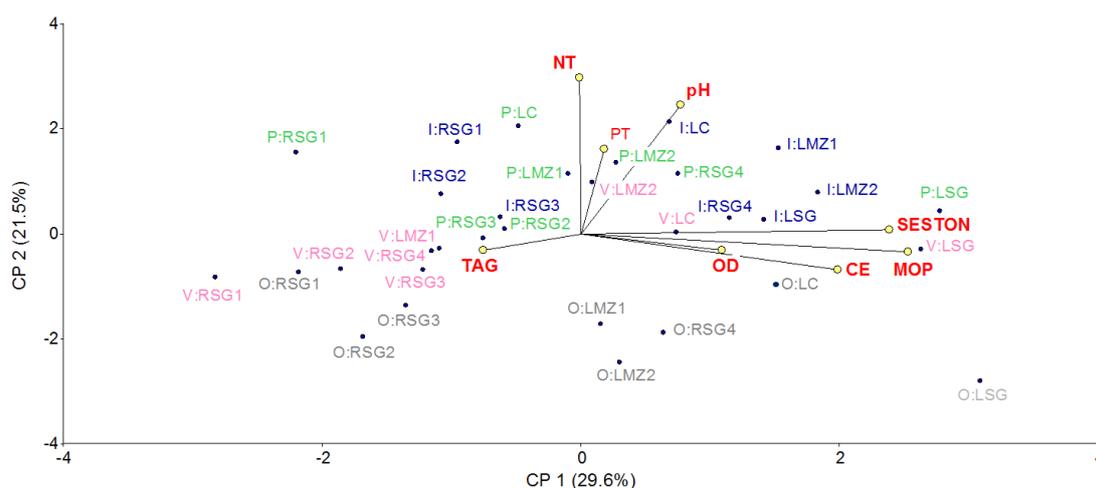


Figura 5.9. Distribución de las variables limnológicas y los sitios de muestreo en los dos primeros componentes del Análisis de Componentes Principales (ACP).

3.4. Análisis de conglomerados

Los ocho sitios de medición a lo largo de la cuenca media y baja del RSG se agruparon en tres conglomerados teniendo en cuenta la dinámica de las variables limnológicas medidas de manera estacional (Figura 5.10). El grupo 1 estuvo conformado sólo por el arroyo LC. Sus principales diferencias se basan en su elevado contenido de seston, MOP y fundamentalmente de PT. El grupo 2 estuvo representado por los dos sitios sobre el arroyo Las Mostazas (LMZ1 y LMZ2), la LSG y el RSG4. Su agrupamiento estuvo en función de sus elevados valores de CE y menor concentración anual que el grupo 1 de seston, MOP, NT y PT. Por otro lado, el grupo 3 se conformó por los tres sitios medidos en el RSG antes de su ingreso en la laguna homónima. Estos ambientes se diferenciaron del resto, dado principalmente su escasa concentración de seston y MOP, bajo PT e intermedia concentración de NT.

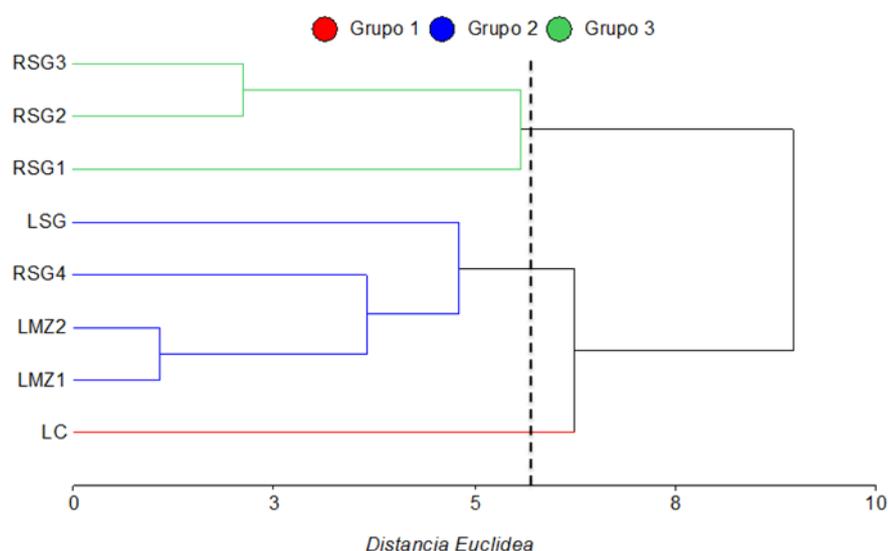


Figura 5.10. Agrupamiento obtenido a partir de la medición limnológica estacional en la cuenca media y baja del río Sauce Grande.

3.5. Clorofila a y profundidad del disco Secchi

La concentración media de Cl a de la LSG durante el período de estudio fue $31,3 \pm 21,9 \mu\text{g L}^{-1}$. La dinámica estacional fue marcada, con valores máximos durante el verano ($64,1 \mu\text{g L}^{-1}$) y mínimos en el otoño ($17,8 \mu\text{g L}^{-1}$) (Figura 5.11). La profundidad de visión del disco Secchi fue $0,4 \pm 0,3 \text{ m}$ y manifestó relación con la Cl a, fundamentalmente en verano, dado que se redujo la visión del disco producto de las altas tasas de Cl a (Figura 5.11).

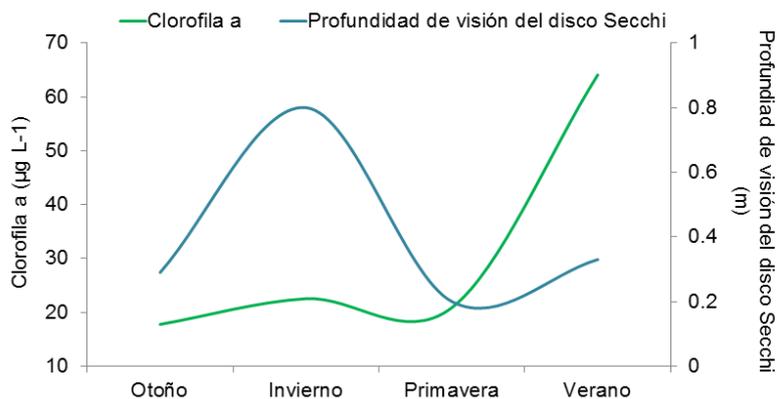


Figura 5.11. Variación estacional de la Cl a y la profundidad de visión del disco Secchi en la laguna Sauce Grande.

3.6. Estado trófico de la laguna Sauce Grande

Como se mencionó anteriormente, para evaluar el estado trófico de la LSG se calcularon los índices tróficos basados en los valores medios de Cl a, profundidad de visión del disco Secchi y PT siguiendo la metodología propuesta por Carlson (1983). Los valores obtenidos y su correspondiente clasificación se muestran en la Tabla 5.7. El IET (Cl a) osciló entre 58,8 (otoño) y 101,4 (verano) indicando condiciones de mesotrofia a hipereutrofia, respectivamente. Durante el invierno y la primavera, el cuerpo de agua se clasificó como eutrófico. Por otra parte, el IET (TSD) mostró que la LSG fue eutrófica durante todas las estaciones analizadas. Los mismos fluctuaron entre 63,2 y 83,2 (Tabla 5.7). Un comportamiento similar se observó cuando se analizó el IET (PT). La laguna no presentó diferencias estacionales cuando se aplicó el IET (PT), clasificándolo a lo largo de todo el período de estudio como hipereutrófico (Tabla 5.7).

Tabla 5.7. Estado trófico estacional de la laguna Sauce Grande según la metodología propuesta por Carlson (1983).

Estación	IET(Cl a)		IET (TDS)		IET (PT)	
Otoño	58,8	Mesotrófico	77,8	Eutrófico	113	Hipereutrófico
Invierno	61,1	Eutrófico	63,2	Eutrófico	133,9	Hipereutrófico
Primavera	60,4	Eutrófico	83,2	Eutrófico	118,9	Hipereutrófico
Verano	101,4	Hipereutrófico	76	Eutrófico	113	Hipereutrófico

Según la clasificación propuesta por la OCDE (1982) y considerando el valor medio de concentración de Cl a, la laguna se clasificó como mesotrófica mientras que, teniendo en cuenta el máximo Cl a, el estado fue eutrófico. Esta última categoría también se obtuvo cuando se analizaron los valores medios anuales de PT. Por último,

el valor medio y mínimo anual de TDS (0,4 y 0,2, respectivamente) permitió definir a la laguna como hipereutrófica.

4. DISCUSIÓN

En el presente capítulo se analizó el comportamiento de las variables limnológicas en los todos los cursos de agua de la cuenca media y baja del río Sauce Grande (RSG), como así también el cuerpo de agua más extenso que presenta la cuenca baja, la laguna Sauce Grande (LSG), durante las diferentes estaciones del año 2016. En general, los parámetros analizados a lo largo de los ocho sitios de muestreo presentaron un marcado patrón espacio-temporal. En el período de estudio, el pH medio fue mayor en la laguna que en el resto de los cursos de agua y el máximo valor fue hallado durante el verano en la LSG (10,4). Esta situación podría estar causada por la alta actividad fotosintética que presenta este cuerpo de agua (fundamentalmente de cianobacterias) (Cony et al., 2016) durante el verano (Alfonso et al., 2018; Tabla 5.7). Según Elisio (2017), los cuerpos de agua eutróficos pueden alcanzar valores de pH cercanos a 10 en condiciones de eutrofia y de florecimientos cianobacterianos. Los valores de pH indicaron condiciones alcalinas en todos los ambientes muestreados pero su valor medio, sumado a posibles floraciones de algas durante períodos extensos, podría condicionar la biota acuática (Wurts y Durborow, 1992). La LSG también fue clasificada como alcalina, en otros períodos de estudios. Por ejemplo, septiembre 2008-diciembre 2010 (Fornerón, 2012), junio-noviembre de 2010 (Baleani et al., 2017) y abril de 2012-julio de 2015 (Ferrer et al., 2012; Cony et al., 2016; Cony, 2018). Esta clasificación de pH es una característica típica de las lagunas de la Región Pampeana (Sosnovsky y Quirós, 2006; Izaguirre et al., 2012; Alfonso, 2018; Zunino, 2018).

El OD es uno de los parámetros más importante a tener en cuenta en los cursos de agua y lagunas dado que es esencial para el metabolismo de todos los organismos acuáticos que presentan respiración aeróbica (Díaz et al., 2005; Alfonso et al., 2018). La concentración media de OD y la temperatura del agua de todos los ambientes analizados también presentó una marcada estacionalidad. Fue mayor durante el invierno y menor durante la primavera dado su relación con la temperatura del agua. Teniendo en cuenta el valor medio en todos los sitios medidos ($5,8 \text{ mg L}^{-1}$), se los considera moderadamente ricos en oxígeno (Cátedra de Limnología de la UBA, 2000). Además, este valor representa una condición aceptable para la vida de la gran mayoría de especies de peces y otros organismos acuáticos (Goyenola, 2007).

La LSG y el RSG luego de su descarga de la laguna (RSG4) fueron los que presentaron la mayor concentración de sales (2,7-2,9 g L⁻¹, respectivamente). Este patrón se explicaría por la dinámica de escurrimiento superficial de la cuenca. Por su margen izquierda, el RSG drena sus aguas desde el Paso de las Piedras hacia la LSG e ingresa por el oeste, mientras que, por el este presenta su salida del cuerpo de agua. Luego, el curso sigue con similar rumbo para recibir por el norte, el arroyo LMZ y en conjunto atraviesan la barrera medanosa hacia su desembocadura en el mar (Melo, 2004). Por lo tanto, la acumulación de sales en la LSG y en el RSG4 se produciría porque ambos sitios están ubicados en los sectores de menor altura lo que generaría la acumulación las sales provenientes de toda la cuenca (Figura 5.1). Por otro lado, el arroyo LMZ a lo largo de los sitios denominados LMZ1 y LMZ2, presentó mayor concentración de sales que el RSG antes de su ingreso en el cuerpo de agua (RSG1, RSG2, RSG3) (Figura 5.6). Este proceso podría estar asociado al efecto del uso del suelo urbano dado que, a 5 km del curso de agua medido, se encuentra la ciudad de Coronel Dorrego. Los efectos de las ciudades sobre la concentración de sales en los cursos de agua fueron estudiados en otras cuencas del mundo y a escala nacional y presentan el mismo patrón espacial que lo demostrado en esta tesis. Por ejemplo, en el río Bermúdez en Costa Rica (Castro et al., 1996), en la cuenca del río Senguer (Patagonia Argentina) (Scordo, 2018a), en la cuenca del arroyo del Gato y del Pescado (noreste de la provincia de Buenos Aires) (Kruse et al., 2003), entre otras.

Los cuerpos de agua de la Región Pampeana son altamente fluctuantes en sus valores de S y su variación presenta estrecha relación con el régimen de precipitación (Quirós et al., 2006). Además, se pueden clasificar en subsalinas (0,5 a 3 g L⁻¹), hiposalinas (3 a 20 g L⁻¹), mesosalinas (20 a 50 g L⁻¹) e hipersalinas (> 50 g L⁻¹) (Hammer, 1986). Durante el período de estudio, la LSG se clasificó como subsalina dado que el valor medio fue 1,75 g L⁻¹ y la precipitación presentó una diferencia con respecto al valor medio de -90 mm. Sin embargo, se encontraron marcadas diferencias con respecto a lo estudiado por Fornerón (2012) durante un período de extrema sequía (septiembre de 2008-diciembre de 2010). El déficit hídrico del área de influencia de la laguna osciló entre -70 mm en el año 2010 y -286 mm durante el año 2008 (Capítulo 2). Esta autora registró un valor medio de salinidad de 4,6 g L⁻¹, lo que permite afirmar la marcada variabilidad de este parámetro en función del régimen pluviométrico. Esta relación también fue hallada en la laguna La Salada (provincia de Buenos Aires), donde los niveles de S fluctuaron en función del ingreso de agua regulado por la apertura y cierre de las compuertas de los canales derivados del río Colorado (Alfonso, 2018). En la laguna de Puan (provincia de Buenos Aires) se

registró un descenso de la conductividad y salinidad del agua como consecuencia de las fluctuaciones en las precipitaciones (Zunino, 2018).

El seston es la mezcla del material particulado en el agua, que incluye tanto las partículas vivas como las no vivas (Wetzel, 2001). El agua contiene sólidos disueltos y sólidos en suspensión (seston) y es indicador del grado de turbidez de los cuerpos de agua (Fornerón, 2012; Zunino, 2018). Esta variable mostró un marcado patrón espacial: conforme el río SG recorre mayor extensión dentro de la cuenca baja (desde el sitio RSG1 hasta el RSG3), la concentración de seston fue aumentando hasta alcanzar su máximo valor medio en la LSG (que actúa como colectora del material particulado en suspensión transportado por el RSG) lo que demuestra que este parámetro se relaciona, al igual que la CE, con dinámica de escurrimiento superficial que presenta la cuenca. Estacionalmente se observó que el valor medio de seston de todos los sitios analizados fue mayor en el otoño ($29,5 \text{ mg L}^{-1}$) y menor durante la primavera ($25,2 \text{ mg L}^{-1}$). En abril y septiembre (fechas en las cuales se realizaron esas campañas) la precipitación registrada en el área de influencia de la cuenca fue 36 y 13 mm, respectivamente. Como consecuencia, el incremento del monto de precipitación y de esorrentía superficial, favorecería el arrastre de material particulado generando mayor concentración de seston en abril de 2016 y lo opuesto en el muestreo realizado en septiembre de ese mismo año. Similares resultados fueron encontrados en otras cuencas hidrográficas del mundo como por ejemplo en la cuenca del río Corbeira (NW de España) (Rodríguez-Blanco et al., 2010) y en la cuenca alta del río Bermejo (Argentina) (Moraña, 2013). Por otro lado, es importante destacar que el arroyo LC fue el que presentó la mayor concentración de seston y, como consecuencia, fue el más turbio de todos los ambientes muestreados (valor medio: $57,5 \text{ mg L}^{-1}$). El pico de seston registrado en el verano (80 mg L^{-1}) probablemente se relacione con la presencia de una alta biomasa fitoplanctónica al igual a lo que ocurre en ríos y cuerpos de agua de la Región Pampeana (Ferrer et al., 2012; O'Farrel, 1992). Además, se observó la influencia de este pequeño curso de agua sobre la concentración de seston del arroyo LMZ, dado que antes de su unión con el mismo presentó un valor promedio de $29,1 \text{ mg L}^{-1}$, mientras que luego de colectar las aguas del arroyo LC fue $38,3 \text{ mg L}^{-1}$. Por su parte, la LSG también presentó elevadas concentraciones de seston durante todo el período de estudio ($55,9 \text{ mg L}^{-1}$), lo que demuestra su alto grado de turbidez, principalmente en verano, lo que podría asociarse al desarrollo de fitoplancton (Ferrer et al., 2012; Cony et al., 2014). El valor medio de seston es inferior a lo encontrado por Fornerón (2012) durante septiembre de 2008-diciembre de 2010 y Baleani et al. (2017) en el período junio-diciembre de 2010 (períodos de extrema sequía). Estos autores

registraron un valor medio de seston de 294 mg L⁻¹ y 310 mg L⁻¹, lo que permite afirmar que este parámetro es altamente fluctuante en función de los montos de precipitación.

La Región Pampeana es una vasta planicie y es la más importante del país, dado que no solo presenta la mayor proporción de población, sino que también concentra las actividades agrícolas e industriales más extensas del territorio nacional (Feijóo y Lombardo, 2007; Torti et al., 2014). Esta situación ha generado el deterioro de la calidad del agua de las lagunas y los sistemas lóticos producto del excesivo aporte de nitrógeno y fósforo a estos ambientes (Torti et al., 2014). La principal consecuencia del ingreso de nutrientes a los cursos y cuerpos de agua es la eutrofización (Quirós, 2002) que, a su vez, eleva la actividad fotosintética, generando mayor producción de algas y como consecuencia, aumentando la turbidez del agua (Smith y Smith, 2001; Zunino, 2018). Esta región ha experimentado una gran transformación espacial. En las últimas cuatro décadas se desarrolló un proceso de agriculturización que se caracterizó por la introducción del cultivo de soja, en detrimento de la actividad ganadera, que ha sido desplazada hacia zonas marginales (Darder et al. 2012). La mayor producción agrícola generó incorporación de nuevas tecnologías y el aumento del uso de fertilizantes (Quirós et al., 2006). En la cuenca media y baja del RSG se encontró una mayor concentración de nitrógeno que de fósforo total (13,6 y 0,23 mg L⁻¹, respectivamente). Además, se observaron significativas diferencias espaciales y temporales. En promedio, a lo largo de los arroyos LMZ y LC, ambos nutrientes presentaron mayor concentración que en los sitios de medición antes de su ingreso en la LSG (RSG1, RSG2, RSG3) (NT: 14,7 y 13,7 mg L⁻¹, respectivamente; PT: 0,1 y 0,2 mg L⁻¹, respectivamente). En el caso del cuerpo de agua, los valores de NT y PT se mantuvieron bajos con respecto a los cursos de agua (NT: 11 y PT: 0,1 mg L⁻¹), mientras que en el sector más cercano a la desembocadura del RSG en el mar (RSG4), se observó el aporte de nutrientes proveniente del arroyo LMZ, dado que los valores de NT y PT fueron elevados (12,4 y 0,3 mg L⁻¹). Por otra parte, se registró una marcada estacionalidad de estos nutrientes a lo largo del período de estudio. Ambos fueron máximos en invierno seguido de la primavera. El cultivo de trigo es el que ocupa mayor extensión en la cuenca media y baja del RSG (Brendel et al., 2019). Para aumentar su rendimiento se aplican fertilizantes nitrogenados y fosforados en la siembra (junio-julio) y la maduración (septiembre-octubre) (Barbieri et al., 2009; Suñer y Galantini, 2012) por lo que estas prácticas, en conjunto por escurrimiento superficial de la cuenca, generaría el incremento de los nutrientes durante estas dos estaciones del año.

En las lagunas de la Región Pampeana las condiciones de eutrofia se producen por la elevada concentración de materia orgánica y nutrientes (Quiros, 2002; Dangavs, 2005). Considerando los índices que se aplicaron para evaluar el estado trófico de la LSG (Carlson, 1983) se observó una variación en las categorías de este cuerpo de agua, teniendo en cuenta el valor de Cl_a . La laguna se clasificó como mesotrófica durante el otoño mientras que, durante el invierno y la primavera, como eutrófica. En el verano, los valores de Cl_a aumentaron y se definió como hipereutrófica. Teniendo en cuenta la visión de profundidad del disco de Secchi y PT, la laguna se clasificó como eutrófica e hipereutrófica, respectivamente. Este cuerpo de agua fue categorizado como eutrófico (según su contenido de Cl_a) durante el otoño de 2010 (Ferrer et al., 2012) y junio-diciembre de 2010 (Baleani et al., 2017) y no se modificó su definición durante abril-septiembre de 2014, cuando se la evaluó utilizando la concentración de Cl_a y PT (Cony et al., 2016). Sin embargo, en esta tesis aplicando el índice que contiene PT, la laguna se definió como hipereutrófica evidenciando una mayor carga de nutrientes con respecto a otros estudios previamente realizados.

5. CONCLUSIÓN

En el presente capítulo se analizó la dinámica espacio-temporal de las variables limnológicas en ocho sitios de medición a lo largo de la cuenca media y baja de la cuenca del RSG. Los resultados obtenidos sirven de referencia para futuras investigaciones biológicas, físicas y químicas, dado que es la primera vez que se desarrolla un estudio limnológico que comprenda el RSG antes y después de laguna homónima como así también el arroyo Las Mostazas, Las Cortaderas y en un sector cercano a la desembocadura del RSG en Océano Atlántico. El análisis de conglomerados, que consideró los parámetros limnológicos más importantes (CE, seston, MOP, NT y PT) permitió determinar que la cuenca presenta tres unidades espaciales bien diferenciadas: i) el RSG antes de su ingreso en la laguna, ii) el arroyo LC y iii) el arroyo LMZ en conjunto con la laguna y el sitio más cercano a la descarga del río en Océano Atlántico.

La CE presentó un marcado patrón espacial, dado que aumentó a medida el río dreña sus aguas hacia la LSG y en el sector más cercano a la desembocadura del RSG en el Océano Atlántico. Esta situación se relacionó probablemente por la dinámica propia de escurrimiento superficial de la cuenca, desde las zonas de mayor elevación hacia las de menor, pero en el caso del arroyo Las Mostazas, por el uso de suelo urbano. La concentración de seston y la MOP también reflejó un patrón espacial que se relacionó con las características de escurrimiento de la cuenca: fue mayor a

medida el RSG drena sus aguas hacia la LSG y se registró en otoño, en coincidencia de las elevadas precipitaciones registradas. Los máximos valores de seston hallados en este cuerpo de agua y en el arroyo LC, durante el verano, se relacionaría con el desarrollo de fitoplancton. En el caso de la laguna, la elevada CI a encontrada durante esta estación permitiría inferir esta relación. Sin embargo, sería fundamental realizar un monitoreo de los organismos acuáticos sobre el arroyo LC para establecer una relación más precisa. Es importante destacar que la LSG presento valores altos seston durante todo el período de estudio. Sin embargo, fue menor al reportado en otras investigaciones sobre este mismo cuerpo de agua durante un período extremadamente seco, lo que indicaría que este parámetro es altamente fluctuante con respecto al nivel de agua. Al igual que el seston, la CE también se modificó con respecto a la profundidad de la misma dado que los hallados en esta tesis fueron significativamente menores que los reportados durante un ciclo seco.

El pH fue alcalino en todos los ambientes estudiados. El máximo valor fue registrado en la LSG durante el verano lo que podría estar asociado, como en el caso del seston, a la alta actividad fotosintética que presenta dicho cuerpo de agua en la estación más cálida. Teniendo en cuenta el valor medio de OD, todos los ambientes analizados se clasificaron como moderadamente ricos en oxígeno y su valor es aceptable para la gran mayoría de peces y organismos acuáticos. El NT fue más elevado que el PT y se encontraron diferencias espaciales y temporales de estos nutrientes. Ambos fueron máximos en invierno seguido de la primavera en coincidencia con la aplicación de fertilizantes en el trigo, principal cultivo de la cuenca.

CAPÍTULO 6

COBERTURAS DEL SUELO DE LA CUENCA DEL RÍO SAUCE GRANDE

1. INTRODUCCIÓN

La clasificación de las coberturas del suelo es fundamental para establecer un manejo sustentable de los recursos naturales, principalmente en los paisajes complejos y heterogéneos, como aquellos localizados en las regiones semiáridas (Alrababah y Alhamad, 2006). En ellos, el éxito en la producción de cultivos depende en gran medida del régimen de precipitaciones. Además, los eventos extremos de precipitación son cada vez más frecuentes y de mayor magnitud, afectando el desarrollo de los cultivos (Benniou y Bahlouli, 2015). En una cuenca hidrográfica, la obtención de un mapa de coberturas del suelo con gran precisión es una herramienta muy útil para la evaluación de la erosión hídrica, el manejo de las prácticas agrícolas, la selección del sitio de cultivos, entre otras (Saadat et al., 2011).

La teledetección proporciona información valiosa para clasificar las coberturas de la tierra y para analizar sus cambios espacio-temporales (Rodríguez-Galiano y Chica-Rivas, 2014; Rawat y Kumar, 2015) en áreas agrícolas, forestales, urbanas e industriales, entre otras (Kolios y Stylios, 2013). Para obtener un mapa de coberturas del suelo preciso es necesario considerar varios factores, tales como: la complejidad del paisaje, las imágenes satelitales utilizadas y los métodos de clasificación que se emplearán (Manandhar et al., 2009). Actualmente, existe una gran variedad de imágenes satelitales que favorecen el monitoreo de las coberturas del suelo y sus cambios espacio-temporales a escalas global, regional y local. En este contexto, las plataformas satelitales Landsat y sus sensores a bordo, como el Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) y Operational Land Imager (OLI), son los más utilizados para estos fines (Jia et al., 2014; Chen et al., 2015) dado que permiten realizar estudios precisos de estos cambios, debido a su resolución espacial y temporal, la disponibilidad, la cobertura y la calidad los datos proporcionados (Kolios y Stylios, 2013). Por ejemplo, este satélite ha sido utilizado para monitorear los rendimientos de los cultivos (Doraiswamy et al., 2004; Lobell, 2013), analizar la cobertura forestal (Niraula et al., 2013; Song et al., 2015), comprender la dinámica de la vegetación (Jing et al., 2011; Brendel et al., 2017b; Robinson et al., 2017), evaluar cambios en las coberturas del suelo (Xiuwan, 2002; Guerschman et al., 2003; Manandhar et al., 2009; Kolios y Stylios, 2013; Brendel et al., 2019), analizar el clima urbano (Ferrelli et al., 2016b; Pal y Ziaul, 2017) y la dinámica de los cuerpos de agua (Tulbure y Broich, 2013; Pekel et al., 2016; Brendel et al., 2017b), entre otros.

En la literatura son escasos los estudios de clasificación de coberturas del suelo en regiones semiáridas comparando varios métodos y utilizando diferentes conjuntos de datos. Es importante considerar que un mapa de coberturas del suelo es el resultado de uno o más métodos de clasificación y que su selección es esencial para obtener un mapa con alta precisión estadística. Esta selección depende de la experiencia del usuario y del nivel de conocimiento, así como de la capacidad del algoritmo para clasificar correctamente la cobertura del suelo (Rodríguez-Galiano y Chica-Rivas, 2014). Existen numerosos métodos para clasificarlas. Entre ellos, se destacan el de Máxima Verosimilitud (MAL, por sus siglas en inglés) (Guerschman et al., 2003; Fornerón, 2012; Kolios y Stylios, 2013; Brendel et al., 2019), Paralelepípedo (PAR) (Chen et al., 2015; Pal y Ziaul, 2017; Brendel et al., 2019), método de Mínima Distancia (MID, por sus siglas en inglés) (Castillejo–González et al., 2009; Chen et al., 2015; Brendel et al., 2019), Distancia de Mahalanobis (MAD, por sus siglas en inglés) (Chen et al., 2015; Pal y Ziaul, 2017; Brendel et al., 2019), ISODATA (Aliaga, 2018; Brendel et al., 2019), entre otros. Estos métodos pueden clasificar las coberturas de la tierra usando diferentes conjuntos de datos, tales como las bandas espectrales o los índices espectrales (Xiuwan, 2002; Szantoi et al., 2013; Mushore et al., 2017). Por ejemplo, Xiuwan (2002) analizó el cambio en las coberturas del suelo en la costa occidental de Corea, utilizando diferentes métodos supervisados y no supervisados con dos conjuntos de datos (bandas y NDVI). Szantoi et al. (2013) aplicaron dos métodos de clasificación supervisados basados en bandas espectrales, NDVI y características de texturas para clasificar los humedales del Parque Nacional de los Everglades (Florida). Por otro lado, Saadat et al. (2011) generó un mapa temático utilizando el método MAD sobre NDVI en la cuenca del río Golestan (Irán). En el suroeste de la Región Pampeana (Argentina), se realizó un estudio similar pero utilizando el método MAL y NDVI (Guerschman et al., 2003). Sin embargo, la incorporación de varios índices espectrales calculados a partir de imágenes Landsat es fundamental para aumentar la precisión en la clasificación de las cubiertas terrestres, principalmente en cuencas hidrográficas con desarrollo de actividades agropecuarias. Su aplicación permite analizar los cambios espacio-temporales y monitorear tendencias actuales, pasadas y futuras.

En este contexto, este capítulo tiene dos objetivos. Por un lado, evaluar la efectividad de diferentes métodos de clasificación supervisada y no supervisada utilizando dos conjuntos de datos: bandas e índices espectrales del satélite Landsat para la obtención de un mapa de coberturas del suelo de gran precisión en la cuenca del río Sauce Grande. Por el otro, analizar la variación espacio-temporal de las

coberturas del suelo durante el período 2000-2016, generadas a partir del método y del conjunto de datos determinado como el más preciso.

2. MÉTODO DE TRABAJO

Para determinar las coberturas del suelo de la cuenca del río Sauce Grande, se analizó información provista por imágenes satelitales Landsat e información obtenida en el campo. Las salidas al terreno estuvieron orientadas a generar información espacial (o muestras) necesarias para: (i), comprender el comportamiento espectral de cada cobertura del suelo (ii), localizar muestras espaciales a partir de la utilización de un GPS, (iii) aumentar el tamaño de las muestras espaciales mediante el cálculo de varios índices espectrales, (iv), evaluar estas nuevas muestras y (v), obtener información multitemporal de las coberturas de la tierra mediante el procesamiento de imágenes satelitales y su validación con encuestas a los agricultores de la cuenca y estadísticas agrícolas nacionales.

2.1. Procesamiento digital de imágenes satelitales

Se utilizaron un total de 40 imágenes satelitales Landsat provistas por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), de las cuales, ocho correspondieron al satélite Landsat 8 OLI-TIRS (L8) (Path 226 y Row 87) y 32 al Landsat 5 TM (L5) y Landsat 7 ETM+ (L7) (Path 226, Row 86 y Path 226 y Row 87, respectivamente) (Tabla 6.1). Las imágenes del L8 del año 2016 se procesaron para determinar las coberturas y validarlas con mediciones a campo, mientras que las del L5 y L7 y L8 (2014), se utilizaron para estudiar la variación espacio-temporal de las coberturas del suelo durante el período 2000-2016 (descrito en la sección 2.4). Se utilizó una imagen por estación del año y en el caso de las L8, fueron elegidas en función de la fecha más cercana a la toma de datos con el radiómetro en el campo (descrito en la sección 2.2). Además, se seleccionaron aquellas libres de nubes. Las imágenes L7 fueron corregidas dado el error de escaneo que presentan. Para ello, se aplicó la técnica de interpolación SLC-Off (Scan Line Corrector) (Pringle et al., 2009). Posteriormente, se realizaron las calibraciones geométrica, radiométrica y atmosférica de todas las imágenes siguiendo los pasos descritos en el Capítulo 4.

Tabla 6.1. Imágenes satelitales utilizadas.

Año	Descripción	Estación
2001	LE72260862001124EDC00	Otoño
	LE72260872001124EDC00	
	LE72260862001220AGS01	Invierno
	LE72260872001236EDC00	
	LT52260862001324COA00	Primavera
	LT52260872001324COA00	
LT52260862002007COA00	Verano	
LT52260872002007COA00		
2003	LE72260862003146EDC00	Otoño
	LE72260872003146EDC00	
	LT52260862003202CUB00	Invierno
	LT52260872003202CUB00	
	LT52260862003330CUB00	Primavera
	LT52260872003330CUB00	
LT52260862004013COA00	Verano	
LT52260872004013COA00		
2005	LT52260862005079COA01	Otoño
	LT52260872005079COA01	
	LT52260862005207COA01	Invierno
	LT52260872005207COA01	
	LT52260862005287CUB00	Primavera
	LT52260872005287COA01	
LE72260862006010EDC00	Verano	
LE72260872006010EDC00		
2009	LE72260862009098EDC00	Otoño
	LE72260872009098EDC00	
	LT52260862009266COA00	Invierno
	LT52260872009266COA00	
	LT52260862009314CUB00	Primavera
	LT52260872009314CUB00	
LT52260862009346COA01	Verano	
LT52260872009346COA01		
2014	LC82260872014104LGN00	Otoño
	LC82260872014216LGN00	Invierno
	LC82260872014312LGN00	Primavera
	LC82260872015011LGN00	Verano
2016	LC82260862015107LGN00	Otoño
	LC82260872016190LGN00	Invierno
	LC82260872016302LGN00	Primavera
	LC82260872017016LGN00	Verano

2.2. Trabajo de campo. Muestras geo-referenciadas para clasificar las coberturas del suelo

La cuenca del río Sauce Grande presenta una marcada heterogeneidad geomorfológica, por lo que las coberturas del suelo fueron analizadas en sus tres áreas más importantes: afloramiento, llanura y médano (Figura 6.1). La metodología se dividió en dos pasos (Figura 6.2). El primero consistió en la creación de muestras geo-referenciadas denominadas ROIs 1. Para ello, se seleccionaron sitios de medición

a partir de la composición de color RGB de las diferentes bandas del L8 (2016). Las ROIs 1 presentaron una extensión de 2.537 píxeles en el afloramiento, 145.910 en la llanura y 3.929 en el médano. Posteriormente, esas ROIs fueron verificadas en el campo, identificando las coberturas del suelo que se presentan en la Tabla 6.2. Además, durante las salidas al terreno se recopiló información sobre la dinámica temporal de los cultivos. Para ello se realizaron encuestas personales a un total de 45 agricultores de la cuenca (ver Anexo 1), aplicando un muestreo no probabilístico o dirigido (Hernández Sampieri, 2003). Este procedimiento arrojó información multitemporal sobre los tipos de cobertura del suelo durante los últimos 20 años.

En la salida a campo se adquirieron firmas espectrales de cada una de las coberturas del suelo descritas en la Tabla 6.2. Para ello, se utilizó el radiómetro Ocean Optics USB2000+. El mismo permite analizar la reflectancia espectral de 200 a 1100 *nm* con un ancho de banda de 0,34 *nm*. Las firmas espectrales fueron realizadas durante el verano y la primavera (2016) dado que en estas estaciones del año los cultivos de verano y de invierno se encuentran en la etapa de floración y por lo tanto, presentan mayor vigorosidad (Figura 6.3).

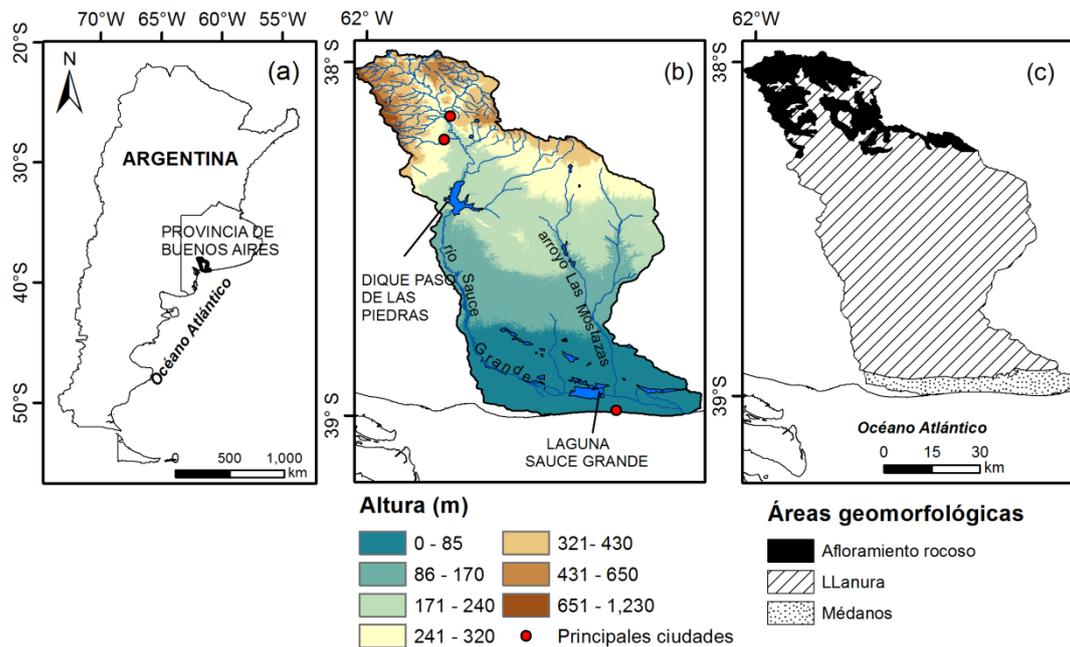


Figura 6.1. a) Localización de la cuenca del río Sauce Grande, b) topografía y c) áreas geomorfológicas (modificado de Brendel et al., 2019).

Cultivos	De verano	Áreas con cultivos sembrados entre mediados de octubre y mediados de noviembre (primavera) y cosechados en marzo (principios de otoño) (ej.: girasol, maíz y soja).	Llanura y afloramiento	
	De invierno	Áreas con cultivos sembrados desde mediados de junio hasta finales de agosto (invierno) y cosechados a finales de diciembre o principios de enero (principios de verano). Ej: trigo, cebada, avena, entre otros.		
Agua		Cuerpos de agua. Ej: lagos y reservorios.	Llanura y médano	
Médano	Médano descubierto	Dunas sin cobertura vegetal y alta capacidad de movilidad.	Médano	
	Médano semi-vegetado.	Médano cubierto de vegetación en un 50 %. Las especies predominantes son <i>Baccharis divaricata</i> , <i>Tessaria absinthioides</i> , <i>Senecio bergii</i> , <i>Hyalis argentea</i> y gramíneas (<i>Poa lanuginosa</i> , <i>Imperata brasiliensis</i> , <i>Schizachyrium spicatum</i> , <i>Panicum urvilleanum</i>).		
	Médano vegetado	Médano cubierto 100 % de vegetación.		
Roca	Roca expuesta	Roca con escasa o nula vegetación	Afloramiento	
	Roca vegetada	Roca cubierta por pastos (<i>Paspalum quadrefarium</i> , <i>Cortaderia selloana</i> , <i>Eryngium sp.</i>) y árboles (<i>Pinus halepensis</i> , <i>Acacia</i> , <i>Eucalyptus</i>)		



Figura 6.3. Adquisición de firmas espectrales con el radiómetro Ocean Optics USB2000+.

El segundo paso consistió en la creación de las ROIs 2. Para ello, se consideraron las regiones de interés previamente identificadas y denominadas como ROIs 1 junto con el cálculo de seis índices espectrales, realizados a partir de las imágenes satelitales. Los mismos fueron: índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de vegetación mejorado (EVI), índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), índice de vegetación modificado ajustado al suelo (MSAVI), índice normalizado de la diferencia de humedad (NDMI), e índice diferencial de agua normalizado (NDWI) (Tabla 6.3). Su cálculo permitió comprender el comportamiento espectral de cada cobertura del suelo para aumentar la extensión de las ROIs 1 con el objetivo de mejorar la identificación de estas coberturas, reduciendo su error de estimación y precisión (Brendel et al., 2019). En este sentido, las ROIs 2 presentaron una extensión 710 % mayor que las ROIs 1 (209,155 píxeles en el afloramiento, 692,274 en la llanura y 181,201 en el médano). El área de los mismos fue validada con una nueva salida al terreno.

Tabla 6.3. Índices espectrales calculados.

Índice	Ecuación	Autores
NDVI	$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$ Donde NIR: infrarrojo cercano y R: banda del rojo	Rouse et al. (1974)
EVI	$EVI = \left(\frac{NIR - R}{NIR + C_1 * R - C_2 * B + L} \right)$ Donde NIR: infrarrojo cercano, R: banda del rojo, C_1 (6) y C_2 (7,5) son coeficientes que corrigen la dispersión atmosférica, L (1) es un factor de corrección del suelo y B: banda del azul.	Liu and Huete (1995)
SAVI	$SAVI = \left(\frac{NIR - R}{(NIR + R + L) * (1 + L)} \right)$ Donde NIR: infrarrojo cercano, R: banda del rojo y L (0,5) es una factor de corrección del suelo.	Huete (1988)
MSAVI	$MSAVI = \frac{2 * NIR + 1 - \sqrt{(2 * NIR + 1)^2 - 8 * NIR - R}}{2}$ Donde NIR: infrarrojo cercano, R: banda del rojo	Qi et al. (1994)
NDMI	$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$ Donde NIR: infrarrojo cercano y SWIR: infrarrojo medio	Wilson y Sader (2002)
NDWI	$NDWI = \frac{G - NIR}{G + NIR}$ Donde NIR: infrarrojo cercano y G: banda del verde	McFeeters (1996)

2.3. Métodos de clasificación

Se aplicaron diversos métodos de clasificación supervisada y no supervisada sobre las ROIs 1 (GPS y bandas) y las ROIs 2 (índices) con el objetivo de, por un lado, identificar el algoritmo que presente mejor precisión para generar el mapa de cobertura del suelo y por el otro, determinar la mejora que presentó el aumento del muestreo espacial de las regiones de interés (ROIs 1 vs. ROIs 2). Este procedimiento, se llevó a cabo utilizando el software ENVI 5.1. Dentro de los algoritmos supervisados se aplicaron ocho métodos: Máxima Verosimilitud (MAL, por sus siglas en inglés), Paralelepípedo (PAR), Mínima Distancia (MID, por sus siglas en inglés), Distancia de Mahalanobis (MAD, por sus siglas en inglés), Codificación Binaria (BE, por sus siglas en inglés) y Mapeador de Ángulo Espectral (SAM, por sus siglas en inglés). Los métodos no supervisados aplicados fueron ISODATA y K-Means. Como resultado, se obtuvieron dos mapas. Uno basado en bandas y el otro en índices.

Para evaluar la precisión de cada método de clasificación se realizó una matriz de confusión pixel a pixel. La misma está compuesta por dos métricas: la precisión general (P) (que contiene la precisión del productor, PP y la precisión del usuario, PU) (Smits et al., 1999) y el coeficiente Kappa (CK) (Congalton y Mead, 1983). La P indica el porcentaje de píxeles correctamente clasificados, mientras que la PP muestra la probabilidad de que un píxel clasificado represente esa categoría en la realidad. Por otro lado, la PU indica qué tan bien se clasificó el conjunto de píxeles de entrenamiento (Rogan et al., 2003). El CK es una medida de exactitud basada en las diferencias entre los datos de clasificación y los de referencia comparada con la precisión derivada de un clasificador aleatorio (Congalton, 2001). Este índice varía entre 0 y 1. Los valores inferiores a 0,4 corresponden a un acuerdo pobre, mientras que los que oscilan entre 0,4 a 0,55 son aceptables. Los que varían entre 0,55 y 0,7, representan un buen ajuste. Por otro lado, de 0,7 a 0,85 se considera un muy buen ajuste y los superiores a 0,85 uno excelente (Monserud y Leemans, 1992).

2.4. Variación espacio-temporal de las coberturas del suelo durante el período 2000-2016.

Para analizar los cambios en las coberturas del suelo se utilizaron 40 imágenes satelitales L5, L7 y L8 (Tabla 6.1). Las mismas no presentaron nubes y se seleccionó una imagen por estación de los siguientes años: 2000, 2003, 2005, 2009, 2014 y 2016. Como se mencionó anteriormente, las ROIs 1 fueron validadas con las encuestas realizadas a los agricultores de la cuenca. Las encuestas se centraron en obtener información de los diferentes tipos de cultivos que los agricultores sembraron en los últimos 20 años (ver Anexo 1). Los cambios temporales fueron verificados a partir de las Estimaciones Agrícolas Nacionales (SIIA) perteneciente al Ministerio de Agroindustria (<https://www.agroindustria.gob.ar/datosabiertos/>). Además, se consultó la estadística de precipitaciones del área de estudio (Capítulo 2).

Con las ROIs generadas en cada año se aplicó el método más preciso en cada área geomorfológica y se clasificaron las coberturas del suelo durante el período 2000-2016. Además, se realizó la matriz de confusión (P, PP y PU) y el coeficiente Kappa para cada uno de los años analizados y finalmente, se realizó el análisis espacio-temporal de las coberturas del suelo en cada una de las áreas de la cuenca.

3. RESULTADOS

3.1. Comportamiento espectral de las coberturas del suelo

El comportamiento espectral de las diez coberturas del suelo medidas a campo se presenta en la Figura 6.4. Las mismas sirvieron de base para conformar las ROIs 1. Para analizar la diferencia entre las coberturas del suelo, se subdividió el espectro electromagnético en Visible (V) (Figura 6.4b) y en Infrarrojo cercano (IRC) (Figura 6.4c). El agua presentó un comportamiento típico con baja reflectancia en todo el espectro y picos en los 500-600 nm (3 %), mientras que en el IRC, esta cobertura mostró reflectancia de 0 % (Figura 6.4c). Las coberturas de suelo sin vegetación (médano descubierto y roca expuesta) tuvieron un comportamiento similar en todo el espectro y fueron fácilmente identificadas en el IRC con reflectancia del 15 y 9 %, respectivamente (Figura 6.4).

Por otro lado, el médano semi-descubierto y la roca vegetada mostraron valores altos en el IRC (20 y 21%, respectivamente) (Figura 6.4c). El médano vegetado presentó el mismo comportamiento que la roca vegetada y el médano semi-vegetado pero con valores más altos en el IRC (30 %). La vegetación riparia fue la que obtuvo los valores de reflectancia más altos en el IRC (81 %) seguida de los cultivos de verano (46 %) y los cultivos de invierno (40 %). Por último, el pastizal presentó valores intermedios de reflectancia (36 %) (Figura 6.4c).

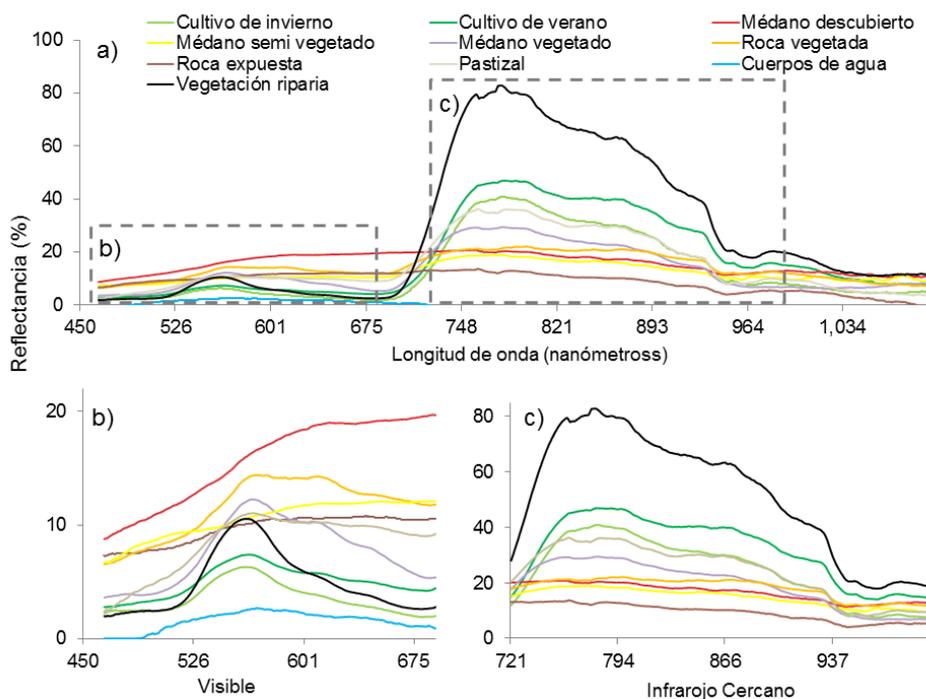


Figura 6.4. a) Comportamiento espectral de cada cobertura del suelo de la cuenca del río Sauce Grande, b) espectro visible y c) Infrarrojo Cercano (modificado de Brendel et al., 2019).

3.2. Comportamiento anual y estacional de los índices espectrales

Una vez analizado el comportamiento espectral de las coberturas del suelo medidas con el radiómetro, se evaluó la dinámica de las mismas a partir del cálculo de índices espectrales. Esto permitió generar las ROIs 2. Estos índices utilizaron información de V y del IRC. Los cuerpos de agua presentaron valores de negativos de NDVI ($-0,25 \pm 0,16$) y NDWI ($0,34 \pm 0,21$) y positivos de NDMI ($0,55 \pm 0,04$) durante todo el año (Figura 6.5, Tabla 6.4). Por otro lado, los cultivos de invierno y verano tuvieron un valor anual similar para todos los índices. Sin embargo, se diferenciaron por su comportamiento estacional (Tabla 6.4). Los cultivos de invierno mostraron valores bajos de EVI (0,18) y NDVI (0,2) durante el verano y altos durante la primavera (0,71 y 0,72, respectivamente). Además, el NDMI fue alto y positivo solo en la primavera (0,35) y el NDWI tuvo los valores más bajos durante esta misma estación ($-0,62$). Por otra parte, los cultivos de veranos presentaron valores altos de NDVI (0,57), EVI (0,56) y SAVI (0,38) durante el verano mientras que el NDWI presentó los valores más bajos en esta estación ($-0,52$). Finalmente, el NDMI solo fue positivo en el verano (Tabla 6.4).

La vegetación riparia mostró un comportamiento homogéneo en todos los índices (Figura 6.5, Tabla 6.4). En particular, el NDVI, EVI y MSAVI fueron positivos y altos en todas las estaciones ($0,6 \pm 0,09$, $0,55 \pm 0,09$, $0,94 \pm 0,04$, respectivamente). Además, el NDWI fue negativo durante todo el año ($-0,5 \pm 0,08$) (Tabla 6.4). El pastizal presentó valores constantes de NDVI ($0,27 \pm 0,04$), EVI ($0,23 \pm 0,04$), SAVI ($0,16 \pm 0,03$) y MSAVI ($0,84 \pm 0,08$) en todas las estaciones (Figura 6.5). Por otro lado, la roca expuesta obtuvo valores altos y homogéneos de MSAVI ($0,91 \pm 0,03$) y NDMI cercano a cero en todas las estaciones ($-0,04 \pm 0,04$) mientras que la roca vegetada presentó la misma dinámica pero con valores de NDVI y EVI más altos ($0,47 \pm 0,08$ y $0,43 \pm 0,07$) durante todo el año (Figura 6.5, Tabla 6.4). Además, el MSAVI fue superior en la roca vegetada que en la expuesta ($0,99 \pm 0,004$).

El médano vegetado mostró similar comportamiento al de la roca vegetada. Esta cobertura se caracterizó por presentar valores altos y homogéneos de NDVI y EVI ($0,46 \pm 0,05$ y $0,4 \pm 0,06$) y valores constantes y altos de MSAVI ($0,96 \pm 0,07$) pero con mayor variación interestacional que la roca vegetada (Tabla 6.4). El índice NDMI fue positivo durante todas las estaciones ($0,13 \pm 0,02$) pero se diferenció de la roca vegetada dado que esta presentó valores de NDMI negativos durante el verano (Figura 6.5, Tabla 6.4).

Por otra parte, el médano descubierto mostró valores de NDVI y EVI bajos y constantes (0,07 y 0,05, respectivamente), el MSAVI fue relativamente alto (0,72 ± 0,01), el SAVI y el NDMI mostraron valores bajos (0,04 y 0, respectivamente) en todas las estaciones del año (Tabla 6.4). Finalmente, el médano semi-vegetado evidenció un comportamiento espectral entre el médano descubierto y el semi-vegetado. Los valores de NDVI y EVI fueron más altos en el médano descubierto mientras que inferiores en el semi-vegetado durante todas las estaciones (Tabla 6.4).

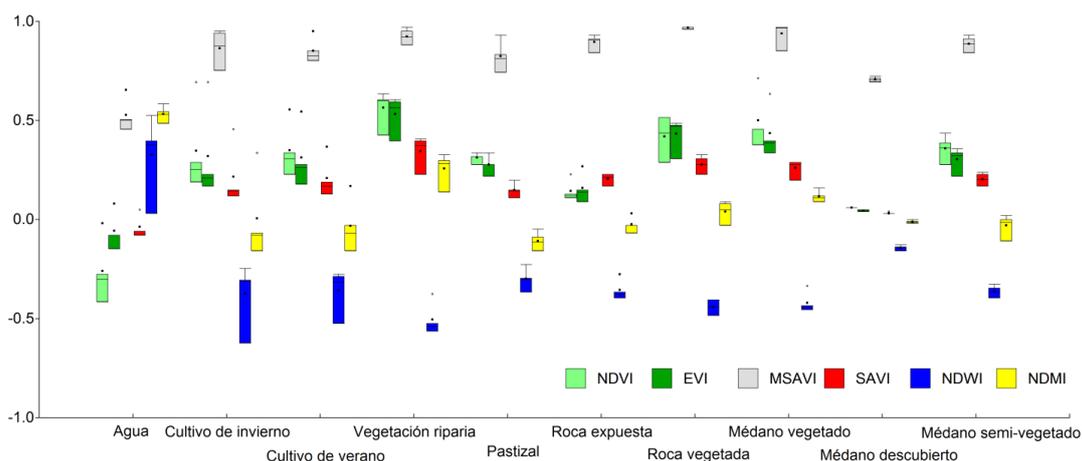


Figura 6.5. Valor medio anual de los índices espectrales en cada cobertura del suelo de la cuenca del río Sauce Grande.

Tabla 6.4. Valor medio estacional de los índices espectrales en cada cobertura del suelo de la cuenca del río Sauce Grande. AG: agua, CI: cultivo de invierno, CV: cultivo de verano, VR: vegetación riparia, P: pastizal, RE: roca expuesta, RV: roca vegetada, MV: médano vegetado, MD: médano descubierto, MSV: médano semi-vegetado.

Indices	Estación	AG	CI	CV	VR	P	RE	RV	MV	MD	MSV
NDVI	A	-0,01	0,30	0,35	0,61	0,29	0,24	0,53	0,53	0,07	0,45
	W	-0,41	0,23	0,29	0,44	0,23	0,32	0,43	0,39	0,07	0,35
	SP	-0,27	0,71	0,24	0,65	0,25	0,22	0,53	0,47	0,07	0,40
	SU	-0,32	0,20	0,57	0,62	0,33	0,34	0,37	0,47	0,07	0,29
EVI	A	0,09	0,24	0,29	0,55	0,23	0,26	0,48	0,45	0,05	0,37
	W	-0,14	0,20	0,26	0,41	0,19	0,30	0,43	0,35	0,06	0,32
	SP	-0,07	0,72	0,19	0,62	0,21	0,24	0,48	0,39	0,05	0,35
	SU	-0,07	0,18	0,56	0,61	0,29	0,28	0,32	0,41	0,06	0,23
MSAVI	A	0,67	0,83	0,87	0,90	0,81	0,92	0,98	0,99	0,71	0,93
	W	0,47	0,77	0,82	0,91	0,76	0,86	0,99	0,87	0,71	0,86
	SP	0,51	0,96	0,82	0,99	0,85	0,95	0,99	0,98	0,73	0,95
	SU	0,52	0,97	0,97	0,97	0,95	0,93	0,99	0,99	0,74	0,88

SAVI	A	0,06	0,16	0,20	0,36	0,16	0,24	0,32	0,30	0,04	0,25
	W	-0,07	0,13	0,16	0,24	0,12	0,18	0,26	0,21	0,04	0,19
	SP	-0,05	0,47	0,14	0,41	0,15	0,24	0,34	0,28	0,04	0,24
	SU	-0,05	0,15	0,38	0,42	0,21	0,21	0,24	0,30	0,05	0,18
NDWI	A	0,04	-0,30	-0,34	-0,52	-0,29	-0,38	-0,47	-0,45	-0,13	-0,39
	W	0,54	-0,24	-0,27	-0,37	-0,22	-0,27	-0,40	-0,33	-0,12	-0,32
	SP	0,37	-0,62	-0,28	-0,55	-0,30	-0,39	-0,48	-0,43	-0,14	-0,38
	SU	0,41	-0,31	-0,52	-0,56	-0,36	-0,36	-0,40	-0,45	-0,15	-0,34
NDMI	A	0,56	-0,08	-0,02	0,28	-0,08	0,04	0,10	0,17	0,00	0,03
	W	0,60	-0,15	-0,10	0,15	-0,15	-0,02	0,03	0,11	0,01	-0,02
	SP	0,50	0,35	-0,15	0,34	-0,13	-0,02	0,09	0,10	-0,01	0,01
	SU	0,53	-0,06	0,18	0,31	-0,04	-0,06	-0,02	0,13	-0,01	-0,10

3.3. Precisión de los métodos de clasificación supervisados y no supervisados

Se calculó la precisión general (P) y el coeficiente Kappa (CK) de cada uno de los métodos supervisados y no supervisados, utilizando los dos conjuntos de datos obtenidos (ROIs 1 y ROIs 2) en las tres áreas geomorfológicas que presenta la cuenca: médano (Figura 6.6), llanura (Figura 6.7) y afloramiento (Figura 6.8). El primer conjunto de datos (ROIs 1) corresponde a los resultados obtenidos con las radiancias calculadas para cada banda del L8 (ROIs 1) y el segundo se derivó de los índices (ROIs 2). La clasificación mostró mayor precisión cuando los métodos (supervisados y no supervisados) se aplicaron a los datos de los índices espectrales (ROIs 2) que al de las bandas (ROIs 1). Como era de esperar, los métodos de clasificación supervisados presentaron una mayor precisión que los no supervisados.

La mayor diferencia se obtuvo cuando se aplicó el método PAR. Por ejemplo, en el médano, utilizando los datos de las bandas (ROIs 1), el PAR mostró una P de 51 % y un CK de 0,3 mientras que estos resultados aumentaron hasta el 98,6 % y 0,97 cuando se utilizó la base de datos proveniente de los índices. Estos resultados indicaron un excelente acuerdo (Figura 6.6a). Por otro lado, el método MAD mostró la mayor P y CK cuando se aplicaron los dos conjuntos de datos (Figura 6.6a). Sin embargo, se obtuvo un leve incremento en la precisión de la clasificación dado que, utilizando los datos de las bandas, se obtuvo una P de 99,5 % y un KC de 0,99 mientras que, utilizando índices, la P fue 99,7 % y el CK fue 0,99 (Figura 6.6a). Los métodos no supervisados mostraron los valores más bajos de P y CK cuando se aplicaron a ambos conjuntos. Los resultados de estos algoritmos representaron una clasificación pobre o muy mala (Figura 6.6a).

La precisión del productor (PP) y la precisión del usuario (PU) también aumentaron cuando la clasificación se basó en índices y utilizando métodos

supervisados (Tabla 6.5 y Tabla 6.6). Por ejemplo, en el caso del método MAD (el mejor para discriminar las coberturas del suelo en el médano), la PP y la PU fueron superiores al 95,8 y 93 %, respectivamente en todas las coberturas discriminadas (Tabla 6.5 y Tabla 6.6).

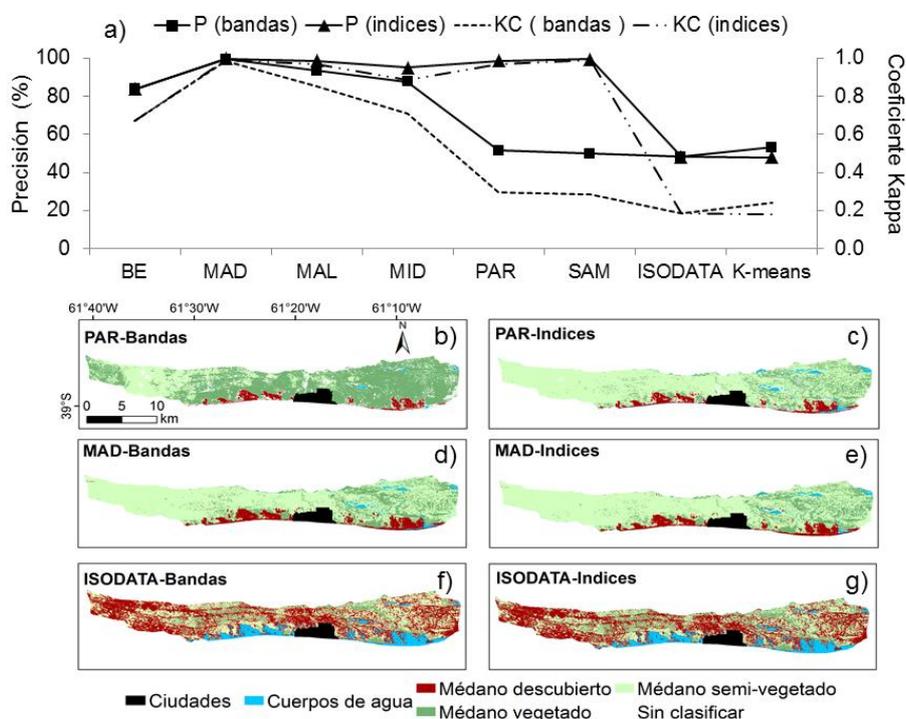


Figura 6.6. a) Precisión y coeficiente Kappa de todos los métodos de clasificación utilizados sobre bandas e índices. Resultados de la clasificación de la cobertura de la tierra según métodos supervisados (b-e) y no supervisados (f-g) en el médano (modificado de Brendel et al., 2019).

Tabla 6.5. Precisión del productor de los ocho métodos de clasificación utilizados sobre bandas (B) e índices (I) en el médano.

Cobertura del suelo	Conjunto de Datos	Métodos							
		MAL	PAR	MID	MAD	BE	SAM	K-M	ISO
Agua	B	63,7	34,9	94,9	86,5	92,3	52,4	71,8	71,8
	I	100	99,1	94,9	95,8	92,3	96,2	71,7	71,7
Médano vegetado	B	99,8	96,7	65	99,3	85,8	22,1	32,5	32,5
	I	98,7	98,0	96,6	99,9	90	99,1	32,5	32,5
Médano semi-vegetado	B	92,5	39,7	91	99,8	81,2	52,3	13,1	13,1
	I	98,7	99	94,2	99,9	81,2	99,7	56,5	56,5
Médano descubierto	B	98,1	76,9	96,6	98,7	99,8	90	56,1	56,1
	I	99	96,9	99,8	99,3	99,8	99,7	19	19

Tabla 6.6. Precisión del usuario de los ocho métodos de clasificación utilizados sobre bandas (B) e índices (I) en el médano.

Cobertura del suelo	Conjunto de datos	Métodos							
		MAL	PAR	MID	MAD	BE	SAM	K-M	ISO
Agua	B	85,7	84,1	88	91,8	92,1	100	14,9	14,9
	I	91,2	99,8	92,1	94	92,1	91,9	14,9	14,9
Médano vegetado	B	69,9	26,4	58,3	99,5	48,6	100	25,8	25,8
	I	94,5	98	77,9	99,9	50,6	99	53,4	53,5
Médano semi-vegetado	B	100	99,8	93	99,5	97,6	100	11,8	11,8
	I	100	100	99,6	99,9	97,6	100	98	98
Médano descubierto	B	100	100	99,9	99,4	90,1	100	98	98
	I	100	100	95,6	99,8	90,1	98,5	98	98

En la llanura, el método PAR presentó los valores más bajos de P y CK utilizando las bandas (Figura 6.7a). La P fue 84,2 % y el CK fue 0,71 aumentando hasta el 87,2 % y 0,76, respectivamente, cuando se aplicó la clasificación por índices (Figura 6.7a). En esta sub-área geomorfológica, el método MAD presentó un excelente ajuste cuando se utilizaron ambos conjuntos de datos (Figura 6.7f y Figura 6.7g). De esta manera, cuando se consideraron las bandas, la P obtenida fue 96,3 % y el CK fue 0,93, mientras que con los índices la P fue 98,6 % y CK, 0,97 (Figura 6.7a). Sin embargo, el algoritmo MAL, aplicado a los índices, mejoró los resultados y fue el que mejor representó las coberturas de la tierra en esta área (Figura 6.7b y Figura 6.7c). La P fluctuó de 92,6 % utilizando bandas a 98,9 % cuando se aplicaron los índices mientras que, el CK varió de 0,86 a 0,98, respectivamente. Además, todas las coberturas analizadas presentaron valores de PP y PU superiores a 95,4 y 91 %, respectivamente (Tabla 6.7 y Tabla 6.8). Por otro lado, los métodos no supervisados también mejoraron su precisión cuando se aplicó el conjunto de índices alcanzando una P de 70 % y un CK de hasta 0,5 (Figura 6.7a). A pesar de la mejora, la clasificación indicó sólo un buen acuerdo.

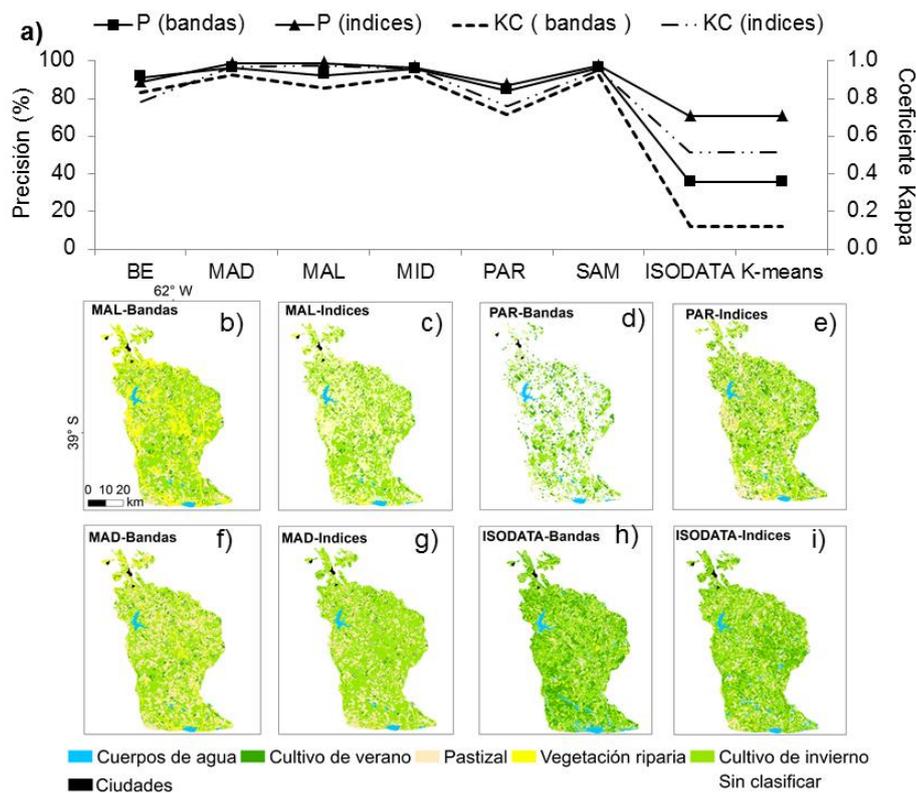


Figura 6.7. a) Precisión y coeficiente Kappa de todos los métodos de clasificación utilizados sobre bandas e índices. Resultados de la clasificación de la cobertura de la tierra según métodos supervisados (b-g) y no supervisados (h-i) en la llanura (modificado de Brendel et al., 2019).

Tabla 6.7. Precisión del productor de los ocho métodos de clasificación utilizados sobre bandas (B) e índices (I) en la llanura.

Cobertura del suelo	Conjunto de datos	Métodos							
		MAL	PAR	MID	MAD	BE	SAM	K-M	ISO
Vegetación riparia	B	99,7	87,6	94,7	97,7	51,1	95	7,2	7,2
	I	100	74,6	88,5	99,7	94,2	95	2,1	2,1
Cultivo de verano	B	94,3	93,6	91,2	90,2	93,2	90,2	8,9	8,9
	I	98,5	94,4	91,5	88,2	92	93,7	38,8	38,8
Cultivo de invierno	B	99,1	94,3	98,1	98,2	97,4	98,2	34	34
	I	100	89,1	98,3	100	98,7	99,5	73,9	73,9
Pastizal	B	70,5	72,7	88,7	92,3	65,6	92,3	14,4	14,4
	I	95,4	91,5	95,2	93,5	49,5	93,7	64,3	64,3
Agua	B	82,1	72,7	95,2	92,5	92,1	92,5	99,3	99,3
	I	99,7	91,5	91,8	96,9	92,9	91	87,9	87,9

Tabla 6.8. Precisión del usuario de los ocho métodos de clasificación utilizados sobre bandas (B) e índices (I) en la llanura.

Cobertura del suelo	Conjunto de datos	Métodos							
		MAL	PAR	MID	MAD	BE	SAM	K-M	ISO
Vegetación riparia	B	36,2	71,1	56,0	56,9	47,6	56,9	8,7	8,7
	I	96,1	99,4	74,7	95,8	19,2	65,5	0,9	0,9
Cultivo de verano	B	50,4	35,0	74,3	80,6	44,3	80,6	1	1
	I	91,0	34,5	83,8	88,2	42,7	82,1	46,7	46,7
Cultivo de invierno	B	99,9	99,8	99,7	99,5	98,8	99,5	68,8	68,8
	I	100	99,9	99,5	98,8	99,5	97,3	95,8	95,8
Pastizal	B	98,4	91,6	92,1	93,7	92,8	94	34,8	34,8
	I	99,4	99,1	90,4	96,1	82,8	97,3	74	74
Agua	B	99,5	100	99,4	99,4	99,7	99,4	83,2	83,2
	I	100	99,9	99,9	99,8	99,8	100	61	61

En el afloramiento, y en concordancia con los resultados de la clasificación obtenida en el médano, el método MAD fue el más apropiado para clasificar las coberturas suelo de esta área (Figura 6.8). La P fue 83,6 % y el CK fue 0,71 cuando se utilizaron las bandas y aumentaron hasta el 93,4 % y 0,88, respectivamente utilizando el conjunto de índices (Figura 6.8a). Estos resultados permitieron obtener una excelente clasificación (Figura 6.8c). Esta situación también se reflejó en la PP y la PU de las coberturas del suelo dado que los valores aumentaron cuando la clasificación se basó en índices (Tabla 6.9 y Tabla 6.10).

En esta sub-área geomorfológica, el algoritmo BE fue el método supervisado que presentó los valores más bajos de P y KC (Figura 6.8a). Incluso utilizando índices, la clasificación resultó en un acuerdo muy pobre (P: 13,8 % y KC: 0,1) (Figura 6.8d). Los métodos no supervisados mostraron los resultados de P y KC más bajos (29,4 % y 0,05, respectivamente) cuando se aplicó el conjunto de bandas (Figura 6.8a y Figura 6.8f). Su precisión mejoró, al igual que en lo mencionado anteriormente, cuando la clasificación se basó en índices (P: 72,3 % y KC: 0,53) (Figura 6.8a y Figura 6.8g).

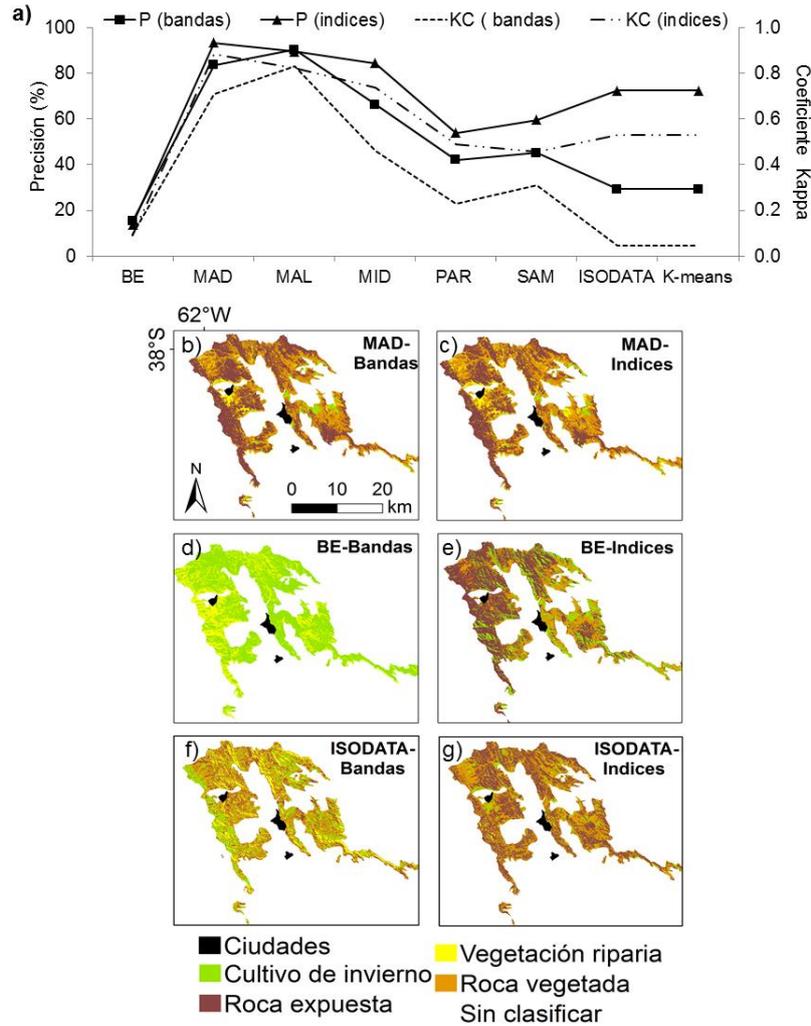


Figura 6.8. a) Precisión y coeficiente Kappa de todos los métodos de clasificación utilizados sobre bandas e índices. Resultados de la clasificación de la cobertura de la tierra según métodos supervisados (b-e) y no supervisados (f-g) en el afloramiento (modificado de Brendel et al., 2019).

Tabla 6.9. Precisión del productor de los ocho métodos de clasificación utilizados sobre bandas (B) e índices (I) en el afloramiento.

Cobertura del suelo	Conjunto de datos	Métodos							
		MAL	PAR	MID	MAD	BE	SAM	K-M	ISO
Vegetación riparia	B	72,7	23,3	55,3	61,2	88	24,1	13,2	13,2
	I	83	27,8	77,6	85,2	27,8	51	0,1	0,1
Cultivo de invierno	B	64,8	82,5	51,9	52,4	68	6	33,7	33,7
	I	66,2	36,8	66,3	76,4	36,8	31,6	8	8
Roca expuesta	B	64,4	61,9	67	91,9	9,2	41,7	23,5	23,5
	I	68,5	11,7	84,4	96,2	11,7	50,7	86,4	86,4
Roca vegetada	B	76,8	0,3	72,9	78,1	10,1	71,9	55,8	55,8
	I	77,1	7,6	90,2	94,7	7,6	91	91,5	91,5

Tabla 6.10. Precisión del usuario de los ocho métodos de clasificación utilizados sobre bandas (B) e índices (I) en el afloramiento.

Cobertura del suelo	Conjunto de datos	Métodos							
		MAL	PAR	MID	MAD	BE	SAM	K-M	ISO
Vegetación riparia	B	76,1	79,8	41	95,1	42,9	99	11,6	11,6
	I	77,5	100	93	96,3	100	91,8	1,9	1,9
Cultivo de invierno	B	46,9	2,6	44,7	43	1,7	35,7	2,8	2,8
	I	39,1	13,8	33,4	61,2	13,8	32,1	5,3	5,3
Roca expuesta	B	96,7	94	90,1	91,5	53,9	96,4	60	60
	I	98,0	100,0	96,8	98,1	100	99	1,1	1,1
Roca vegetada	B	75,0	89,2	51,3	65,9	51,9	80,7	32,8	32,8
	I	79,5	100	65	83,5	100	80,1	54,4	54,4

Finalmente, se obtuvo un mapa de las coberturas de la tierra de la cuenca del río Sauce Grande que presentó el mejor método de clasificación de cada área geomorfológica utilizando como base de su clasificación, el conjunto de índices espectrales. Por lo tanto, se utilizó el método MAD en el médano y el afloramiento mientras que el algoritmo MAL, en la llanura (Figura 6.9).

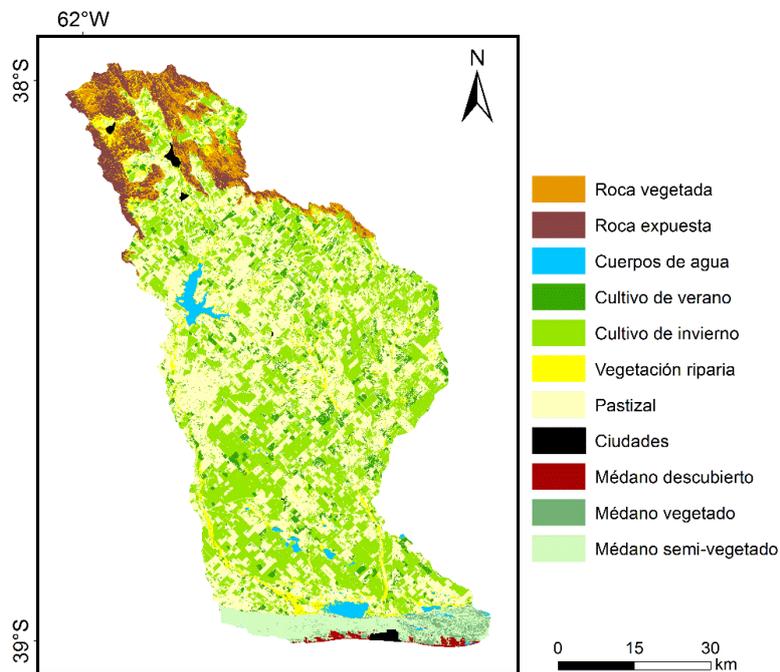


Figura 6.9. Mapa de las coberturas del suelo de la cuenca del río Sauce Grande utilizando el método de mayor precisión basado en índices espectrales (modificado de Brendel et al., 2019).

3.4. Variación espacio-temporal de las coberturas del suelo

La evolución temporal de las coberturas de la tierra y la precisión y coeficiente Kappa en las tres áreas geomorfológicas de la cuenca se muestra en la Figura 6.10: afloramiento (Figura 6.10a y Figura 6.10d), llanura (Figura 6.10b y Figura 6.10e) y médano (Figura 6.10c y Figura 6.10f) durante el período 2001-2016.

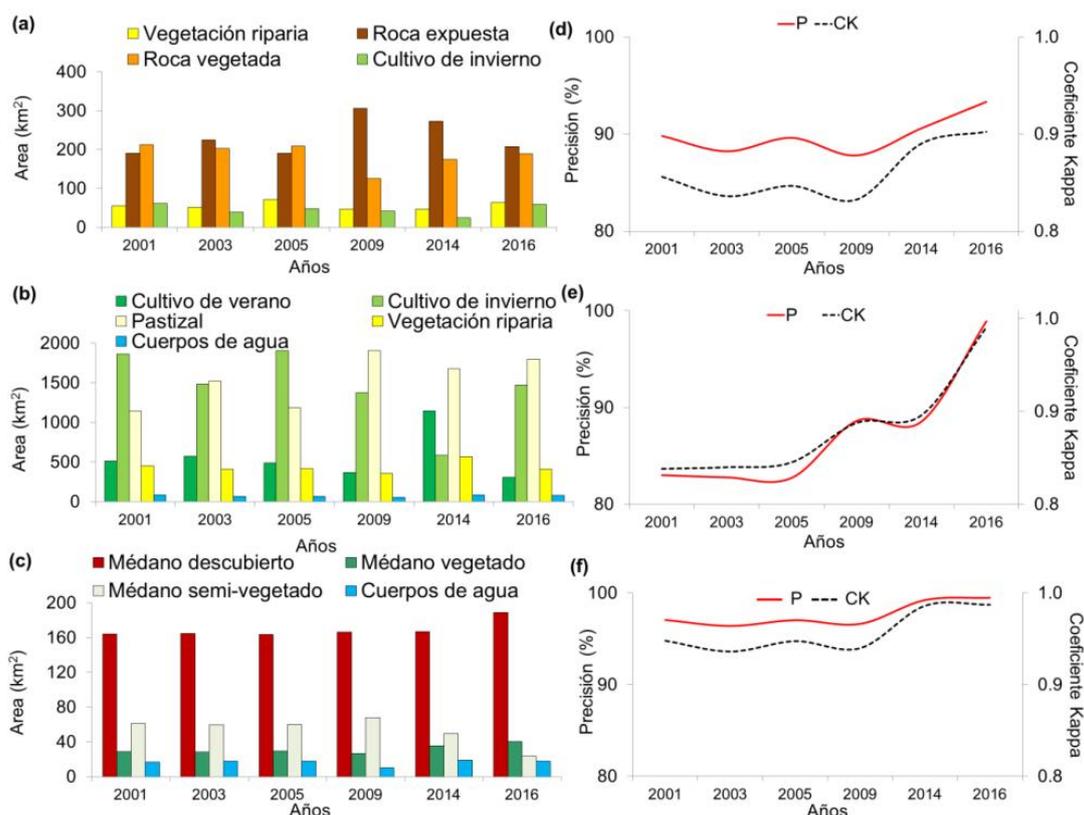


Figura 6.10. Variación espacio-temporal de las coberturas del suelo y su precisión en las tres áreas geomorfológicas de la cuenca del río Sauce Grande: afloramiento (a-d), llanura (b-e) y médano (c-f) durante el período 2001-2016 (modificado de Brendel et al., 2019).

En el afloramiento, la cobertura de la tierra dominante durante el período analizado fue la roca expuesta (231,9 km², 44,8 %) seguido de las roca vegetada (185 km², 35,8 %) mientras que, la vegetación riparia y el cultivo de invierno, fueron las coberturas menos frecuentes (55,1 y 45,1 km², respectivamente) (Figura 6.10a). Además, se observaron variaciones interanuales de las coberturas durante el período de estudio. Por ejemplo, el cultivo de invierno presentó un máximo en el año 2001 (61,1 km²) y un mínimo en 2014 (23,8 km²). En los otros años esta cobertura osciló entre 39,5 km² (2003) y 55,1 km² (2009) (Figura 6.10a). Por otro lado, la vegetación riparia presentó el valor más alto en 2005 (70,4 km²), seguida en 2016 (63,1 km²) y el más bajo en 2009 (45,7 km²). Durante este último año, la roca expuesta presentó el

área más extensa del período de estudio (305,6 km²) mientras que su menor área ocurrió durante el año 2001 (190 km²) (Figura 6.10a). La roca vegetada presentó la situación opuesta a la roca expuesta dado que su máximo se observó en 2001 (212 km²) y su mínimo en 2009 (124,8 km²). Por otra parte, la P y el CK presentaron valores superiores a 88 % y 0,8, respectivamente (Figura 6.10d). Estos resultados indicaron un excelente ajuste de las coberturas del suelo en esta área geomorfológica.

En la llanura, el cultivo fue la cobertura más frecuente del período con una extensión de 2009 km² (49,6 %), de los cuales 1445 km² (35,7 %) fueron de invierno y 564 km² (13,9 %) de verano (Figura 6.10b). El pastizal ocupó una extensión media de 1538 km² (38 %), mientras que la vegetación riparia fue 433 km² (10,7 %). El agua fue la que registró menor cobertura (70,6 km², 1,7 %). En esta área geomorfológica, las coberturas del suelo también presentaron fluctuaciones interanuales. Por ejemplo, el área de cultivo de invierno fue máxima en 2005 (1909,3 km² 61,1 km²) y mínima en 2014 (584,9 km²). Los cultivos de verano presentaron mayor área durante el año 2014 (1903,3 km²) mientras que la mínima ocurrió en 2009 (365,6 km²) (Figura 6.10). La vegetación riparia presentó la misma tendencia que el cultivo de verano dado que presentó su máxima extensión durante el año 2014 (564,5 km²)

. La cobertura pastizal mostró lo opuesto al cultivo de verano dado que su área máxima se produjo en 2009 (1906 km²) y su mínimo valor en 2001 (1146 km²). Por último, los cuerpos de agua también fueron altamente fluctuantes. El área de estos osciló entre 52,6 km² (2009) y 81,6 km² (2001) (Figura 6.10b). La P y el CK fue mayor durante el año 2016 (98,9 %, 0,98, respectivamente) lo que indicó un excelente ajuste del método de clasificación de las coberturas del suelo (Figura 6.10e). Durante el resto de los años, estas métricas fueron superiores al 82 % y 0,8, respectivamente lo que arrojó un muy buen ajuste de los resultados (Figura 6.10e).

En el área geomorfológica médano, la cobertura médano descubierto fue la predominante durante el período de estudio (169,1 km², 60 %), seguido del médano semi-vegetado (53,7 km², 21 %) (Figura 6.10c). Por su parte, el médano vegetado presentó una extensión media de 31,5 km² (12,4 %), mientras que el agua fue la cobertura menos frecuente (16,7 km², 6,6 %). Las coberturas del suelo no presentaron una significativa variación interanual como en lo ocurrido en afloramiento y en la llanura, excepto en los cuerpos de agua (Figura 6.10c). Esta cobertura fue mínima durante el año 2009 (10,2 km²) y máxima en el año 2014 (19,1 km²). Finalmente, las métricas de precisión fueron más alta durante 2016, al igual que en el resto de las áreas geomorfológicas (P: 99,5 % y CK: 0,99) (Figura 6.10f). Además, durante todo el período de estudio ambas presentaron valores superiores de P del 96 % y de CK de

0,93, lo que demostró una excelente clasificación de las coberturas del suelo en el médano (Figura 6.10f).

4. DISCUSIÓN

El monitoreo de las coberturas del suelo requiere de métodos robustos de clasificación que permitan la generación de un mapa con alta precisión (Rodríguez-Galiano y Chica-Rivas, 2014). En este capítulo, el cálculo de los seis índices espectrales permitió obtener mayor precisión en la clasificación de las coberturas del suelo que la obtenida a partir del análisis de las bandas espectrales. Los resultados de la matriz de confusión permitieron seleccionar el método más apropiado para clasificar las coberturas del suelo de la cuenca del río Sauce Grande. El método MAL fue el que representó las coberturas del suelo con mayor veracidad en la llanura arrojando una precisión del 98,9 % mientras que, el algoritmo PAR, fue el menos preciso. En este sentido, el algoritmo MAL es uno de los más empleados para realizar clasificaciones dado su capacidad para representarlas con gran exactitud (Anurogo et al., 2018). En el afloramiento y el médano, el método MAD fue considerado el más exacto mientras que, el BE, fue el que presentó el menor ajuste. En este sentido, Pal y Ziaul (2017) también utilizaron el método MAD en la clasificación de las coberturas del suelo de India con información obtenida de Landsat, encontrando una excelente precisión y coeficiente Kappa (86,6 % y 0,84, respectivamente).

En la literatura, se encuentran numerosas investigaciones que indican que la utilización de índices espectrales para la clasificación de las coberturas del suelo arroja resultados más precisos. El índice más aplicado para esta determinación ha sido el NDVI (Guerschman et al. 2003; Szantoi et al., 2013; Mushore et al., 2017). Por ejemplo, Szantoi et al. (2013) demostraron que la clasificación basada en el NDVI incrementó su precisión en un 2,1 %. Por otro lado, Guerschman et al. (2003) realizó una clasificación de las coberturas del suelo del sudoeste de la Región Pampeana empleando el método de MAL utilizando NDVI de imágenes satelitales Landsat. La precisión de sus resultados fue 58,3 %. Sumado a ello, Mushore et al. (2017) también demostraron que aplicando un conjunto de índices calculados con Landsat 8 (NDVI, NDWI, NDBal and NDBI) mejoraron la precisión general en un 2,8 % (de 82,7 a 85,5 %) en comparación con el uso de la reflectividad de las bandas. Por otro lado, Xiuwan (2002) comparó la precisión de diversos métodos de clasificación derivados de los datos de Landsat TM utilizando dos conjuntos de datos: uno obtenido de los análisis de la reflectancia de las bandas y el otro, incluido el NDVI. Este autor logró una P de 92,8 y 93,3 % cuando la clasificación de la cobertura del suelo se realizó con bandas y

con NDVI, respectivamente. En este capítulo, se demostró la tendencia mencionada anteriormente. La utilización de seis índices espectrales calculados estacionalmente (NDVI, NDWI, NDMI, EVI, SAVI y MSAVI) permitió obtener valores más altos de precisión debido a que el área de las regiones de interés se incrementó 700 % (ROIs 1 vs. ROIs 2).

El análisis de los índices calculados con imágenes satelitales Landsat permitió conocer el comportamiento espectral de cada cobertura del suelo a lo largo del año. Como consecuencia, la información derivada de los índices mejoró la precisión del productor y del usuario (PP y PU, respectivamente), en relación con otros estudios. Por ejemplo, Guerschman et al. (2003) encontraron valores de PP y PU para los cuerpos de agua de 92 y 99 %, respectivamente utilizando NDVI. En este capítulo, cuando fueron utilizados más índices espectrales, los resultados de ambas métricas arrojaron valores de 100 % para esa cobertura. La misma tendencia fue encontrada al analizar los cultivos de verano e invierno y los pastizales: el incremento de la PP con respecto a lo obtenido en el sudoeste de la Región Pampeana por Guerschman et al. (2003) fue 13, 15,5 y 15,3 % respectivamente mientras que la mejora de la PU fue 21, 15 y 13,4, % respectivamente. Por otro lado, en África, el pastizal presentó las mismas características reflectivas que las presentes en la cuenca del río Sauce Grande (Mushore et al., 2017). Sin embargo, estos autores utilizaron tres índices para determinar esa cobertura (NDVI, NDWI, NDBal) y sus resultados fueron considerablemente menores que los alcanzados en este capítulo dado que la PP fue 82,6 % y la PU fue 80,8 % mientras que los obtenidos en la presente investigación fueron 95,7 y 99,4 %, respectivamente.

En las regiones semiáridas, los mapas de la coberturas del suelo son herramientas muy útiles para el manejo de cuencas hidrográficas dado que permiten evaluar con precisión la erosión del suelo, tomar decisiones con respecto a que tierras son más adecuadas para la agricultura sostenible o la forma en la cual se deben llevar a cabo las prácticas agrícolas, entre otros (Saadat et al., 2011). Para obtener el mapa de coberturas del suelo de la cuenca del río Sauce Grande y su variación espacio-temporal durante el período 2000-2016 se aplicó el método más preciso para clasificarlas: MAD en el afloramiento y médano y MAL en la llanura utilizando el conjunto de índices espectrales. Como resultado del análisis espacio-temporal de las coberturas del suelo se obtuvo que la llanura es el área más productiva de la cuenca dado el desarrollo de los cultivos, principalmente los de invierno. Sumado a ello, los cultivos de la cuenca y los de la mayor parte de su área de influencia se realizan principalmente bajo condiciones de secano (Brendel et al., 2017b). Según Holzman et

al. (2014), la principal causa de la inestabilidad en el rendimiento de los cultivos de secano es la dependencia de la variabilidad de la humedad del suelo dado que los mismos se cultivan sin riego.

Además, es importante considerar que los regímenes pluviométricos son variables, tanto espacial como temporalmente, ocasionando condiciones extremas de sequías e inundaciones que desencadenan importantes impactos sociales y económicos (Aliaga et al., 2017). Las coberturas de la cuenca presentaron importantes fluctuaciones interanuales, especialmente los cultivos, que se vieron afectados por la alternancia de años secos y húmedos. En este sentido, la menor área de cultivos de invierno se registró en 2014. Durante ese año, la precipitación anual fue 355 mm mayor que el valor medio en el sector norte de la cuenca (Coronel Suárez) y de 202 mm en el sector sur (Bahía Blanca) (Capítulo 2), concentrándose principalmente en el invierno. Esta situación generó que los agricultores decidan no sembrar cultivos de invierno debido a los excesos de agua (Agrofy, 2014). Por el contrario, durante la primavera de 2014, las condiciones pluviométricas fueron óptimas para sembrar cultivos de verano y, como consecuencia, se registró el máximo área de cultivos de verano durante el período de estudio.

Durante el año 2009, en la cuenca y en toda su área de influencia, se extendió una sequía severa (Capítulo 2). En el sector norte de la cuenca, la precipitación anual fue -330 mm menor que el valor medio mientras que en el sector sur fue -145 mm (Capítulo 2). Sin embargo, los cultivos de invierno fueron implantados normalmente a pesar de la sequía regional dado que los resultados mostraron un área muy cercana al valor medio. Como consecuencia, los rendimientos de los cultivos de invierno (principalmente el trigo) mostró reducciones del orden del 52 % en el sector sur de la cuenca y del 20 % en el sector norte generando drásticos impactos en la economía local (SIIA, 2015; Brendel et al., 2017b). Como en la mayor parte de los países en desarrollo, la economía depende estrechamente de la producción de cultivos, especialmente los de secano, quienes son vulnerables a la variabilidad climática (Mulenga et al., 2017). En este contexto, el conocimiento de las coberturas del suelo y su variación espacio-temporal en las regiones semiáridas adquiere importancia dado que estos cambios determinan la vulnerabilidad de estos espacios y sus habitantes a los factores climáticos, económicos y políticos. Estas variaciones tan aceleradas de las coberturas del suelo afectan la biodiversidad y la sostenibilidad de los ecosistemas circundantes, incluida la calidad de vida de la población (Schulz et al., 2010; Gilani et al., 2015).

5. CONCLUSIÓN

En este capítulo se aplicaron diferentes métodos supervisados y no supervisados de clasificación de coberturas del suelo sobre dos bases de datos diferentes: la primera basada en la reflectividad de las bandas y la segunda sobre seis índices espectrales calculados con información satelital provista por el satélite Landsat. La combinación de los índices y el mejor método en cada área geomorfológica permitió determinar con excelente precisión las coberturas del suelo de la cuenca del río Sauce Grande. El método más exacto para clasificar las coberturas del suelo en la llanura fue el MAL mientras que en el médano y el afloramiento fue el MAD utilizando como base de la clasificación los índices espectrales que mejoraron la precisión del productor y del usuario con respecto a las bandas. Además, esta metodología se aplicó para conocer las variaciones espaciotemporales de las coberturas del suelo durante el periodo 2000-2016. Tras su análisis se observó que la superficie de las coberturas del suelo con presencia de vegetación y particularmente los cultivos fluctuó en función de los montos de precipitación. Por ejemplo, el año 2014 presentó la menor área de cultivos de invierno como consecuencia de los excesos hídricos ocurridos antes de la siembra de los mismos, mientras que se registró la mayor área de los cultivos de verano producto de las precipitaciones óptimas durante su período de implantación. A su vez, estos últimos presentaron la menor superficie durante el año seco (2009) y como consecuencia el pastizal presentó el área más elevada. El mapa obtenido sirvió de base para conocer la distribución de las coberturas del suelo medidas *in situ* y poder contrastarlo con el escenario óptimo que se presenta en el Capítulo siguiente.

Este tipo de análisis es esencial en las cuencas hidrográficas, principalmente las que presentan cultivos de secano y alternancia de eventos extremos de precipitación, como la analizada, dado que el conocimiento obtenido de forma rápida y precisa de la variación de las coberturas del suelo, provee información vital sobre las condiciones pasadas y presentes y podría ser utilizado para predecir con precisión las tendencias futuras.

CAPÍTULO 7

VULNERABILIDAD ECO-AMBIENTAL Y ESTRATEGIAS DE MANEJO SUSTENTABLE DEL TERRITORIO EN LA CUENCA DEL RÍO SAUCE GRANDE

1. INTRODUCCIÓN

Los usos del suelo orientados a producir bienes y servicios representan la alteración humana más significativa de los ecosistemas terrestres (Vitousek et al., 1997). Esta condición expone a los ambientes a mayor nivel de vulnerabilidad ecológica y ambiental (denominada eco-ambiental). Este concepto se refiere al nivel al cual un sistema es susceptible de afrontar los efectos adversos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y los eventos extremos (IPCC, 2013). Este tipo de vulnerabilidad, se define y rige por cuatro factores: las características hidrometeorológicas, el tipo de suelo, las actividades humanas y las características topográficas (Nguyen et al., 2016). El análisis y evaluación de la vulnerabilidad eco-ambiental permite identificar los patrones de uso del suelo y establecer áreas o recursos en riesgo. Además, permite definir las amenazas generadas por la disminución o pérdida de los recursos que comprometerán el desarrollo sostenible futuro (Shao et al., 2014). Esta problemática se acentúa en las regiones semiáridas, dado que son áreas expuestas a la alternancia de eventos secos y húmedos, como así también a una marcada variabilidad interanual de las precipitaciones (Aliaga et al., 2017). Este hecho genera la reducción en la productividad de los cultivos y de los recursos hídricos (Bohn et al., 2016).

Las cuencas hidrográficas son ecosistemas de gran importancia ambiental por su gran diversidad biológica, paisajística, cultural y prioritariamente por su capacidad de retención y regulación de agua (Smith y Olsen, 2010). Además, son sistemas complejos que involucran la relación de variables físicas, geomorfológicas, hidrográficas, climáticas y constituyen una unidad espacial para la planificación y gestión del territorio. Para determinar la vulnerabilidad eco-ambiental en estos espacios es importante considerar variables espaciales como la pendiente, la precipitación, los tipos de suelo, la hidrografía, el déficit y exceso hídrico, la productividad de los suelos, entre otras. En este aspecto adquieren relevancia los Sistemas de Información Geográfica (SIGs), dado que permiten inter-relacionar estas variables y generar modelos de simulación espacial que representen el escenario óptimo de las coberturas del suelo. Además, son una herramienta fundamental para el análisis y clasificación de las coberturas del suelo *in situ* como resultado del procesamiento digital de imágenes satelitales (Saleh et al., 2015). La importancia de

diseñar un escenario ideal y contrastarlo con otro medido a campo recae en la posibilidad de identificar la situación ambiental, social y económica actual de un determinado espacio. A partir de entonces, se facilita el contexto necesario para enmarcar el diseño de las estrategias de desarrollo sostenible destinadas a mejorar y/o preservar la calidad ambiental y fomentar las actividades agropecuarias. Las mismas, deben considerar que los productores agropecuarios y la sociedad representarán los actores sociales decisivos en el planeamiento, ejecución, control y evaluación de las decisiones que se tomen sobre la cuenca (Martínez, 2015).

Se han realizado numerosos estudios basados en la evaluación de la vulnerabilidad eco-ambiental utilizando SIGs en cuencas hidrográficas del mundo (Shao et al., 2014; Nguyen et al., 2016). Por ejemplo, Shao et al. (2014) determinaron el grado de vulnerabilidad ambiental de la cuenca alta del río Yangtsé (China) a partir uso de variables espaciales tales como elevación, pendiente, vegetación, uso del suelo, tipo de suelo, erosión, precipitación, entre otras. Como resultado hallaron que, la mayor parte de la cuenca, presenta nivel medio de este tipo de vulnerabilidad y que el factor antrópico fue el principal generador de cambios ecológicos y ambientales en la cuenca. Este mismo tipo de estudio fue realizado por Wang et al. (2008) en la cuenca del río Amarillo (China), encontrando que dicha cuenca también presenta mayor porcentaje de vulnerabilidad media. En Argentina, las investigaciones sobre esta temática son menos frecuentes. Entre ellos, se destacan los desarrollados por Gaspari et al. (2011), Grondona et al. (2015) y Senisterra et al. (2015), quienes desarrollaron la evaluación de vulnerabilidad en la cuenca alta del río Sauce Grande y considerando sólo las coberturas del suelo medidas *in situ*. Por lo expuesto, el objetivo de este Capítulo es evaluar la vulnerabilidad eco-ambiental de la cuenca del río Sauce Grande utilizando dos matrices: una resultante de un modelo de simulación espacial (escenario óptimo) y otra de su delimitación a campo (escenario *in situ*) (Capítulo 6). Los resultados obtenidos permitieron definir cinco áreas con diferente nivel de vulnerabilidad eco-ambiental y a partir de allí diseñar estrategias sustentables de manejo del territorio orientadas a preservar la calidad ambiental, reducir los impactos negativos sobre el ambiente y fomentar la permanencia de las actividades económicas de la cuenca.

2. MÉTODO DE TRABAJO

2.1. Determinación de las coberturas del suelo a partir del modelo de simulación espacial

El esquema metodológico utilizado en este capítulo se presenta en la Figura 7.1. Para conformar la base de datos de las coberturas del suelo modeladas (escenario óptimo) se utilizó información climática, geomorfológica, topográfica, hídrica y edáfica provista por diferentes organismos gubernamentales que se detallan a continuación. Estas fueron procesadas en el Sistema de Información Geográfica ArcGIS 10.2 y se convirtieron en formato raster con una resolución espacial de 30 m² (Figura 7.2). Las variables utilizadas fueron: pendiente (en grados), calculada a partir del modelo digital de elevación (SRTM, 30 m) proporcionado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), unidades geomorfológicas, índice de productividad (en %), orden y textura del suelo, limitante principal, cursos y cuerpos de agua, drenaje (todas ellas obtenidas del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - INTA, Argentina). Además, precipitación media anual y mensual (Servicio Meteorológico Nacional - SMN, Argentina) y la probabilidad de ocurrencia de déficit y exceso hídrico (%) en el período de crecimiento y desarrollo de los cultivos de invierno y verano. Los mismos fueron obtenidos de la Oficina de Riesgo Agropecuario (ORA, Argentina) y se seleccionaron, dado que constituyen uno de los factores más importantes en el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Figura 7.2).

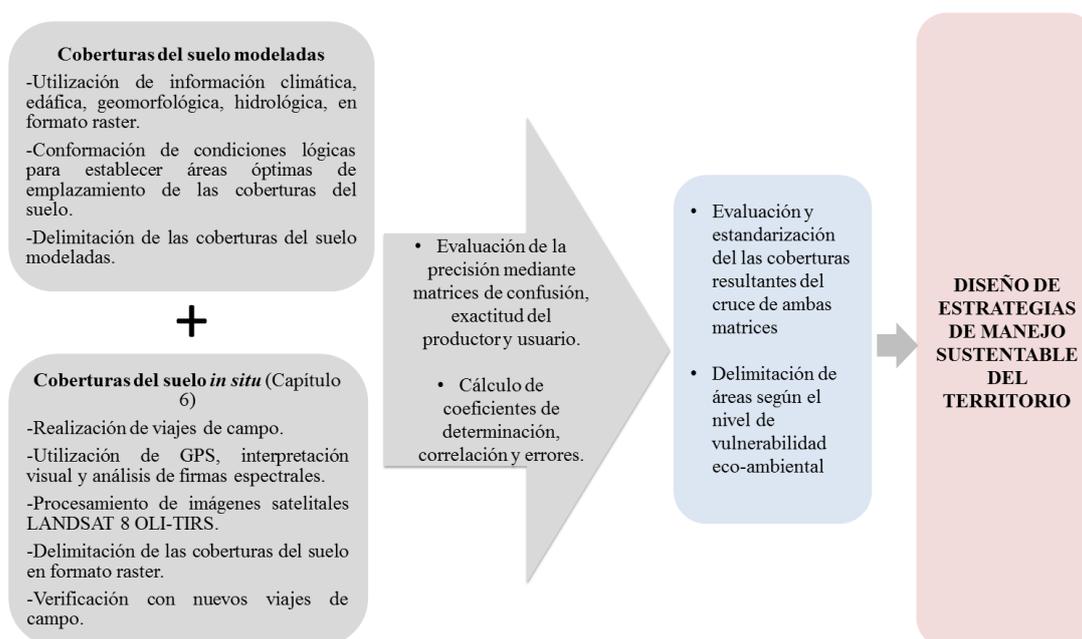


Figura 7.1. Esquema metodológico aplicado para la delimitación de las coberturas del suelo modeladas e *in situ*, la determinación de áreas vulnerables y las estrategias de manejo del territorio.

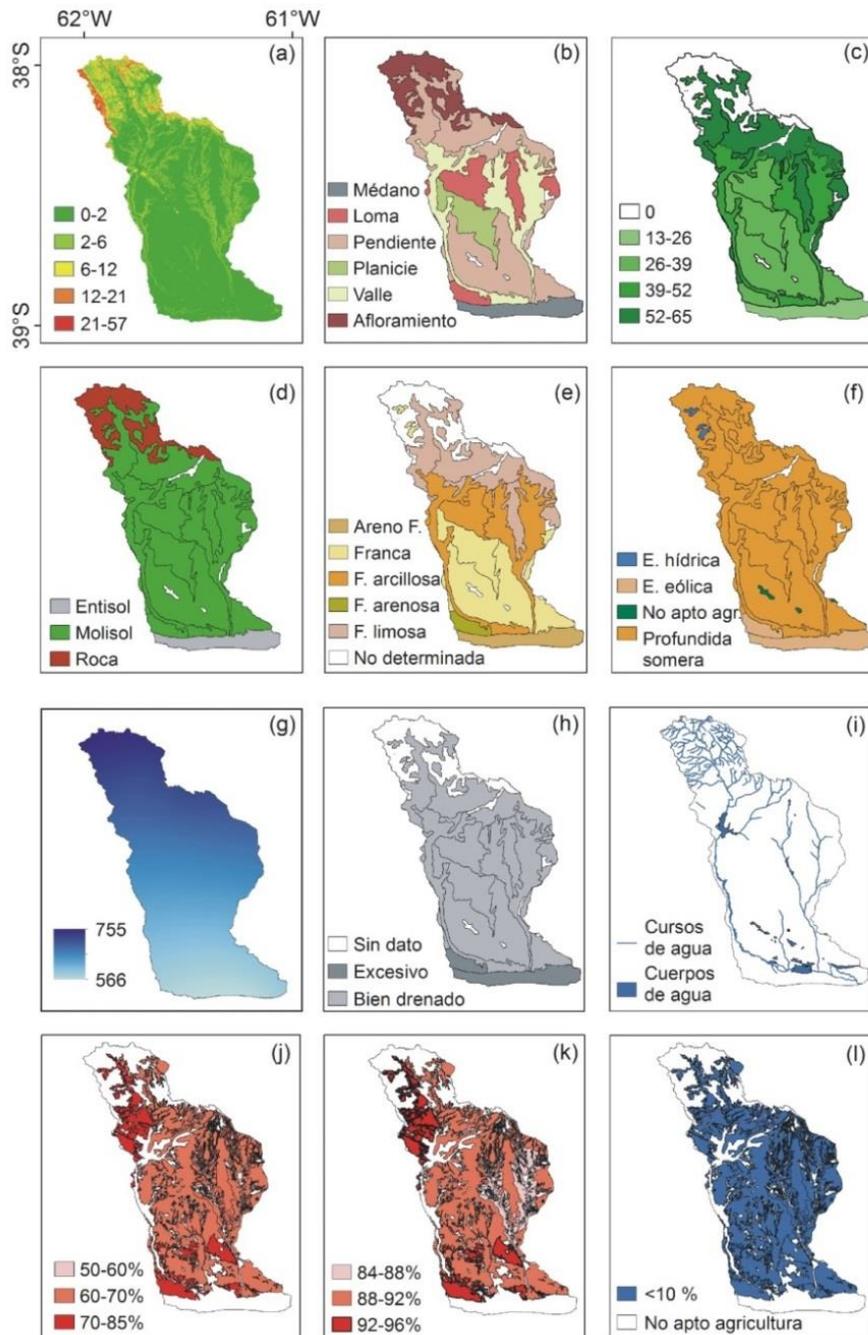


Figura 7.2. Esquema de la información espacial utilizada para el diseño del modelo de simulación espacial. a): pendiente ($^{\circ}$), b) unidades geomorfológicas, c) índice de productividad (%), d) orden de suelo, e) textura del suelo, (f) limitante principal, (g) precipitación media anual (mm/año), h) drenaje, i) cursos y cuerpos de agua, j) probabilidad de riesgo de déficit en un cultivo de invierno (%), k) probabilidad de riesgo de déficit en un cultivo de verano (%) y l) probabilidad de exceso en ambos tipos de cultivo (%). F. Franco, E. Erosión.

Las coberturas del suelo óptimas se determinaron teniendo en cuenta los siguientes criterios (Figura 7.2):

➤ *Afloramiento*: aquellos espacios donde las pendientes fueron mayores a 20 °, los tipos de suelo fueron rocosos y el índice de productividad fue menor a 10 %.

➤ *Cursos y cuerpos de agua*: se consideraron las unidades geomorfológicas de planicie y valle, pendiente menor a 2° y el índice de productividad igual a 0. Estas condiciones junto con las características hidrológicas permitieron establecer una mejor delimitación de los cursos y cuerpos de agua.

➤ *Médanos*: se localizan en cuenca baja, por lo tanto, se estableció como límite la pendiente entre 2 y 5 °. Se consideró el orden del suelo (Entisol), la textura (areno-franca) y el índice de productividad menor a 20 %. Finalmente, se incluyeron las áreas con drenaje excesivo y las áreas no aptas para agricultura resultante de los mapas de déficit y exceso hídrico.

➤ *Zonas anegables*: para definir estas áreas se utilizaron las unidades geomorfológicas de valle y planicie en donde la pendiente osciló entre 2 y 3 grados. Para eliminar aquellas áreas cubiertas con agua se tuvo en cuenta un valor de índice de productividad mayor a 1, dado que los valores iguales a 0 indican presencia de agua. El tipo de suelo considerado fue Molisol con texturas franca, franca-arcillosa y franca limosa.

➤ *Cultivos*: se consideraron las precipitaciones acumuladas y los excesos y déficits resultantes del balance hídrico según el ciclo de los cultivos de invierno y verano. Para ello, se analizaron estas variables durante la fecha de siembra y cosecha (junio y diciembre) para los primeros, mientras que para los segundos las ocurridas entre octubre y marzo. Además, se consideraron los requerimientos hídricos de ambos cultivos para evaluar si el área de estudio satisface adecuadamente sus necesidades. En general, los cultivos de invierno requieren durante su ciclo de crecimiento y desarrollo de 500 a 550 mm de agua siendo mayor su demanda en la fase fenológica de llenado de granos (5 mm/día) (noviembre). En el caso de los cultivos de verano, la cantidad de precipitación que necesita durante este ciclo es de 450 mm y su mayor demanda ocurre en los estadios de floración y llenado de granos (4,6 mm/día) (enero y febrero). En todos los casos el índice de productividad fue mayor a 55 %. Además, se tuvieron en cuenta todas aquellas unidades geomorfológicas exceptuando el médano por ser

áreas no aptas para el desarrollo de cultivos y se omitieron los cursos y cuerpos de agua y las áreas anegables.

➤ *Pastizales*: se estableció un rango de índice de productividad mayor a 1 y menor a 54 %. Se consideraron todos los tipos de suelo y unidades geomorfológicas y se definió un rango de precipitación anual de 550 a 770 mm. Se descartaron los cuerpos y cursos de agua y las zonas anegables.

2.2. Evaluación y validación de los resultados: escenario óptimo vs. escenario *in situ*

Para evaluar la precisión de la clasificación de las coberturas del suelo generadas por el modelo espacial (que indicó las coberturas del suelo óptimas en la cuenca), se realizó una matriz de confusión entre estas y las identificadas *in situ* (Capítulo 6). Particularmente, el suelo al descubierto obtenido con las mediciones *in situ*, se correspondió con los médanos y el afloramiento rocoso determinado con el modelo, dado que representaron las superficies con suelos sin cobertura. Se calcularon estadísticos tales como el índice de determinación R^2 para comparar las áreas (en km^2) y el coeficiente de correlación de Spearman con el objetivo de comparar los resultados obtenidos de ambas matrices.

2.3. Categorización y delimitación de áreas vulnerables

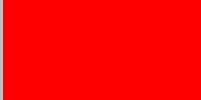
El análisis de la vulnerabilidad eco-ambiental de la cuenca del río Sauce Grande se realizó a partir del cruce dos productos cartográficos: uno obtenido a partir del modelo de simulación espacial (considerado como escenario óptimo) y otro que corresponde a las coberturas del suelo *in situ* (obtenido a partir del reconocimiento a campo) (Capítulo 6) mediante el uso del software ArcGIS 10.2. Para comparar las coberturas del suelo resultante de ambas matrices y poder realizar las expresiones de algebra de mapa, se realizó la estandarización de cada una de las coberturas del suelo aplicando la siguiente ecuación:

$$Y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{min,j}}{x_{max,j} - x_{min,j}} \times 10 \quad (1)$$

donde Y_{ij} representa el valor estandarizado de cada cobertura del suelo j de la grilla i que varía de 0 a 10, x_{ij} representa el valor real de la cobertura del suelo j de la grilla i , $x_{min,j}$ y $x_{max,j}$ representan el valor mínimo y máximo de cada cobertura del suelo j de la grilla i , respectivamente.

De esta manera, se identificaron distintos niveles de vulnerabilidad eco-ambiental: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. Los criterios utilizados para delimitar e identificar cada uno de ellos se presentan en el Tabla 7.1.

Tabla 7.1. Criterios utilizados para delimitar y categorizar las áreas vulnerables en la cuenca del río Sauce Grande.

Nivel de vulnerabilidad eco-ambiental	Descripción	Identificación en el mapa
Muy bajo (entre 0 y 1,5)	Sustracción del afloramiento y el médano (óptimo) vs. suelo al descubierto (<i>in situ</i>)	
Bajo (entre 1,51 y 3)	Superposición de las áreas identificadas como pastizal en ambas matrices	
Medio (entre 3,01 y 6)	Superposición de las áreas identificadas como cultivo en ambas matrices	
Alto (entre 6,01 y 8,5)	Adhesión de las áreas identificadas como pastizal (óptimo) y cultivos (<i>in situ</i>)	
Muy Alto (mayor a 8,51)	Superposición de las áreas identificadas como zonas anegables (óptimo) vs. Áreas de cultivos y pastizales (<i>in situ</i>)	

3. RESULTADOS

3.1. Precisión de las coberturas del suelo modeladas vs *in situ*

El modelo de simulación espacial arrojó que la cobertura del suelo más extensa fue el pastizal con 2610 km², abarcando el 53,7 % del total del área de la cuenca (Figura 7.3a, Tabla 7.2). Se destacó el predominio de la cobertura afloramiento rocoso y cultivo en la cuenca alta, las coberturas zonas anegable y pastizal en la cuenca media mientras que la cuenca baja, mostró predominio de pastizal, cultivo, zonas anegables y presencia de cuerpos de agua (Figura 7.3a). Por otro lado, al analizar el comportamiento de las coberturas del suelo *in situ*, se determinó que estas presentaron una distribución espacial heterogénea (Figura 7.3b). La principal diferencia entre los resultados arrojados por ambos modelos se observó en los cultivos. Si bien la cuenca presenta situaciones óptimas para que se emplacen los cultivos (Figura 7.3a), en el terreno los mismos abarcan mayor superficie, principalmente en la cuenca media y baja. Además, una gran parte de ellos se realizan sobre zonas anegables (Figura 7.3b).

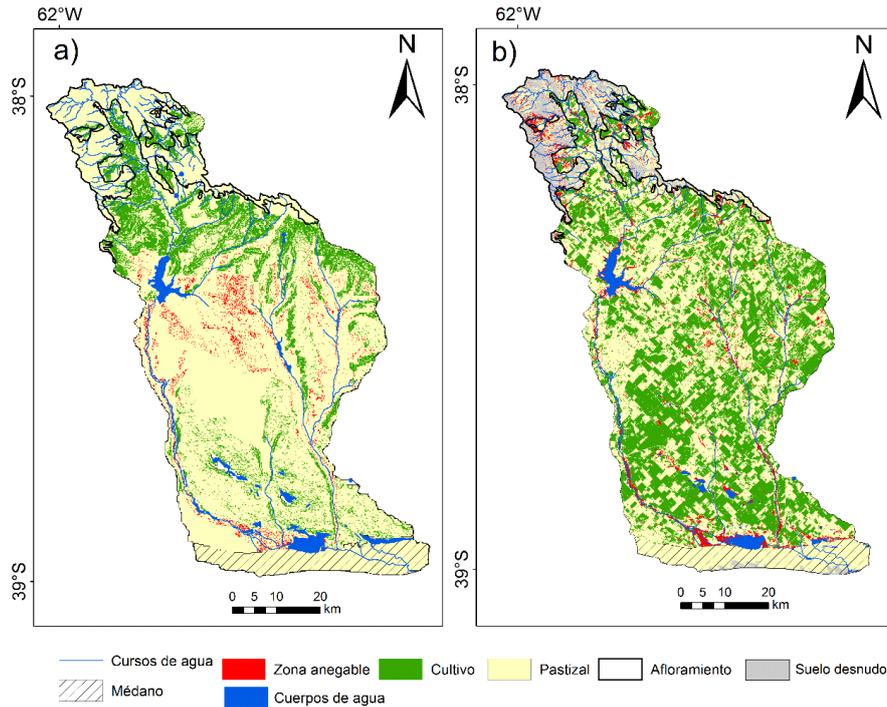


Figura 7.3. a) Cobertura del suelo obtenidas a partir del modelo de simulación espacial y b) identificado *in situ*.

Tabla 7.2. Extensión de las coberturas del suelo modeladas e *in situ*.

Coberturas del suelo <i>in situ</i> (km ²)		Coberturas del suelo modeladas (km ²)	
Suelo desnudo (afloramiento)	517,4	Afloramiento	517,4
Suelo desnudo (médano)	253, 2	Médano	253,2
Zona anegable	407,3	Zona anegable	473,1
Cultivo	1824,5	Cultivo	903,9
Pastizal	1758,8	Pastizal	2610,3
Agua	94,9	Agua	98,5

El análisis estadístico mostró que las superficies de las coberturas determinadas por ambas metodologías presentaron un índice de determinación R^2 de 0,86 y una correlación de 0,8. El análisis de regresión permitió inferir que las coberturas del suelo obtenidas a partir de las dos metodologías fueron estadísticamente significativas ($p < 0,05$), aunque no presentan un comportamiento espacial similar (Figura 7.3 a y b).

Al realizar el cruce de matrices en una correlación de píxel por píxel, se evidenciaron diferencias entre ambos mapas. El coeficiente Kappa fue de 0,63 lo que indicó un ajuste bueno entre ambas matrices. La precisión del productor mostró que la cobertura mejor representada fue el agua (91,2 %), seguido por las zonas anegables (77,5 %). Los cultivos y los pastizales fueron las áreas con menores valores de precisión del productor (42,3 y 60,5 %, respectivamente). Esto se relaciona a que las actividades agropecuarias que se realizan en la cuenca tienen una extensión diferente al escenario óptimo (Tabla 7.2, Figura 7.3a). A pesar de ello, la cuenca alta presentó mejores ajustes dado que los cultivos tuvieron una precisión del productor de 75,4 % y del usuario del 80,4 %.

La precisión del usuario mostró que el 97,2 % de los píxeles identificados como agua pertenecen a esa clase, mientras que en las zonas anegables fue de 89,6 %. Por otro lado, los cultivos y los pastizales obtuvieron valores superiores al 60 % (Tabla 7.3).

Tabla 7.3. Precisión del usuario y del productor de las coberturas del suelo modeladas e *in situ*.

Precisión del productor (%)				
Suelo desnudo (afloramiento y médano)	Zona anegable	Cultivo	Pastizal	Agua
85,1	77,5	42,3	60,5	91,2
Precisión del usuario (%)				
Suelo desnudo (afloramiento y médano)	Zona anegable	Cultivo	Pastizal	Agua
98,8	89,6	62,8	64,3	97,2

3.2. Vulnerabilidad eco-ambiental

En este trabajo, se consideró que las situaciones modeladas representaron el escenario óptimo para el emplazamiento de las coberturas del suelo en la cuenca del río Sauce Grande. Junto con este conocimiento y las coberturas delimitadas a campo, se aplicaron expresiones algebraicas entre ambas matrices con las que se determinó el nivel de vulnerabilidad eco-ambiental que se presentan en la Figura 7.4.

Vulnerabilidad muy baja: representan las áreas con suelo descubierto que están emplazadas sobre los médanos y el afloramiento rocoso. Si bien existen investigaciones que afirman que existe pérdida de suelo por erosión hídrica superficial en el sector del afloramiento (Denegri y Gaspari, 2010) y por precipitaciones torrenciales y cambios en la morfología de la playa producto de tormentas fuertes o actividades turísticas en los médanos (Huamantínco Cisneros et al., 2011b), la evaluación de la situación óptima e *in situ* manifiesta una situación en la que no se

observaron cambios espaciales importantes por lo que define este nivel de vulnerabilidad.

Vulnerabilidad baja: corresponde a las zonas que son óptimas para el desarrollo de pastizales y en la superficie se emplaza esta cobertura. Tienen este nivel de vulnerabilidad, dado que representan espacios donde el pastizal natural o implantado es utilizado para ganadería extensiva vacuna y en menor medida ovina.

Vulnerabilidad media: representa aquellas áreas donde los cultivos se desarrollan en zonas aptas para que se emplace esta cobertura. Si bien la cuenca presenta las condiciones óptimas para que se emplacen áreas con cultivos, los mismos se desarrollan sobreexplotando el recurso suelo, dada su gran extensión. Además, el rendimiento de los cultivos que allí se producen está ligado a las precipitaciones, dado que la mayor parte de ellos se realizan bajo condiciones de secano. Por lo tanto, la vulnerabilidad eco-ambiental está determinada por el riesgo que los productores agropecuarios asumen cuando deciden realizar un cultivo sin riego.

Vulnerabilidad alta: las condiciones que presenta la cuenca media y baja fundamentalmente en lo que respecta al déficit hídrico para los cultivos, tanto de invierno como de verano, el régimen anual de precipitaciones anuales (550 mm) y el índice de productividad (< 52 %), generan que el área presente las condiciones óptimas para el emplazamiento de pastizales. Sin embargo, en el escenario *in situ* se realizan cultivos de forma intensiva sobre la mayor parte de la superficie, exponiéndola a un alto nivel de vulnerabilidad eco-ambiental.

Vulnerabilidad muy alta: está determinada por la presencia de una cobertura determinada *in situ* (como cultivos o pastizales) sobre aquellas áreas anegables modeladas. En este sentido, la pérdida producida por la crecida de los ríos o de los cuerpos de agua determina este nivel de vulnerabilidad. Las áreas anegables representan espacios con escasas pendientes y con suelos de tipo franco y franco-arcilloso, por lo que el tiempo de infiltración del agua es lento y la escorrentía es prácticamente inexistente.

El nivel de vulnerabilidad eco-ambiental más frecuente en la cuenca fue el bajo (1343,7 km², 27,7 %), seguido del alto (1091 km², 22,5 %) (Figura 7.4, Tabla 7.4). Teniendo en cuenta la división espacial, la cuenca alta presentó el nivel más bajo en la mayor parte de su extensión. Por otra parte, la cuenca baja evidenció vulnerabilidad alta en la mayor parte de su superficie y baja en su extremo sur, mientras que, si bien

la cuenca media tuvo diferentes niveles, el muy alto predominó en este sector por sobre el resto de la cuenca (Figura 7.4, Tabla 7.4).

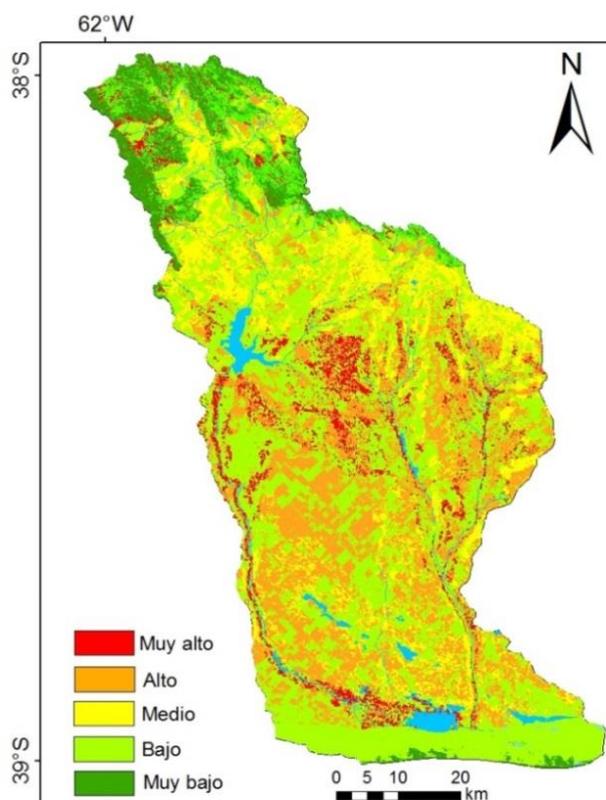


Figura 7.4. Niveles de vulnerabilidad eco-ambiental en la cuenca del río Sauce Grande.

Tabla 7.4. Extensión y porcentaje de los diferentes niveles de vulnerabilidad eco-ambiental en la cuenca del río Sauce Grande.

Nivel de vulnerabilidad eco-ambiental	Área (km ²)	%
Muy alto	812,2	16,7
Alto	1091,4	22,5
Medio	792,7	16,3
Bajo	1343,7	27,7
Muy bajo	816	16,8
Total	4856	100

3.3. Estrategias de manejo sustentable del territorio

Los cambios en las coberturas del suelo sumado al manejo desregulado de los recursos naturales expone a la cuenca a una mayor vulnerabilidad, perjudicando su calidad ambiental y la calidad de vida de la población que habitan en las localidades ubicadas en el área de estudio (Ferrelli et al., 2018). Por lo expuesto, el cruce de las dos matrices (óptima e *in situ*) fue esencial para conocer las aptitudes y restricciones

que la cuenca presenta desde el punto de vista climático, edáfico, geomorfológico e hidrológico y obtener de esta manera un mapa con diferentes niveles de vulnerabilidad eco-ambiental. El análisis de este parámetro es fundamental para diseñar estrategias de manejo del espacio con la finalidad de reducir los efectos negativos y los impactos ambientales que pudiesen ocurrir.

Las estrategias de manejo del espacio se orientaron a cada una de las sub-áreas identificadas en la Figura 7.4. Las áreas con vulnerabilidad muy alta representan espacios anegables e inundables y se observó principalmente en la cuenca media. También se destaca este nivel de vulnerabilidad en la cuenca baja, dado que se extiende en los espacios cercanos a los cursos de agua, como por ejemplo, el río Sauce Grande. Teniendo en cuenta que el río en su momento de crecida inunda grandes extensiones, (Capítulo 3) el desarrollo de cualquier actividad económica que se realice sobre estos espacios depende estrechamente de las variaciones pluviométricas. Son en general espacios con suelos franco-arcillosos en donde la infiltración es lenta y la pendiente es casi nula ($<2^\circ$). Sobre estas áreas, se desarrollan cultivos de cosechas y pasturas destinadas a la actividad ganadera. Por ello, es fundamental que los propietarios de las tierras sean informados sobre las condiciones que presentan estos espacios y que además, estos sitios sean señalizados de manera tal de reducir las posibles pérdidas económicas. En este área y en el resto de la cuenca, el régimen pluviométrico es altamente variable espacio-temporalmente (Capítulo 2), con oscilaciones que llegan hasta un monto anual del 50 % del valor medio (Bohn et al., 2016). Estos eventos de sequías severas y períodos de extrema humedad están en estrecha relación con el fenómeno El Niño Oscilación Sur -ENOS- (Bohn et al., 2016; Aliaga et al., 2017). Las marcadas variaciones pluviométricas perjudican el normal desarrollo de las actividades agropecuaria, como por ejemplo, rendimiento de los cultivos, reducción del área sembrada y cosechada, modificación del área de los cuerpos de agua (Capítulo 2), deforestación de especies nativas, disminución de la accesibilidad al agua potable y la provisión de energía, desaparición de recursos pesqueros, entre otros (Brendel et al., 2017b; Ferrelli et al., 2017a).

Por otra parte, las zonas con vulnerabilidad alta representan aquellos sectores donde los cultivos se desarrollan sobre los espacios en los que son óptimos para el emplazamiento de pastizales, localizados mayoritariamente en la cuenca baja y en menor medida, en la media. En Argentina, las áreas con cultivos y con pasturas no crecieron conjuntamente, sino que la expansión de la actividad agrícola desde 1960 ocurrió, en gran medida, a expensas de la reducción del área de pastizales naturales y

praderas cultivadas (de la Fuente y Suárez, 2008). Esta situación, particularmente en la provincia de Buenos Aires, ha generado la modificación de forma sustancial de su estructura y su funcionamiento (Donald, 2004). Su conservación es fundamental, dado que proporcionan una gama amplia de bienes y de servicios ecosistémicos. Estos no sólo provisionan carne, leche, lana y cuero, sino que contribuyen al mantenimiento de la composición de gases en la atmósfera, controlan la erosión de los suelos y son fuente de material genético de una gran cantidad de especies vegetales y animales, entre otros (Sala y Paruelo, 1997). La intensificación de la agricultura a expensas del pastizal, por ejemplo, generó cambios en el ciclo del carbono y en el balance de energía y de agua y contribuyó al incremento en la liberación a la biósfera de contaminantes y gases parcialmente responsables del calentamiento global (Foley et al., 2005).

Los cultivos realizados en aquellas zonas aptas para el emplazamiento de dicha cobertura representaron las áreas expuestas a vulnerabilidad media. Sin embargo, a partir del cruce de ambas matrices, estas áreas ocupan aproximadamente 921 km² más de lo que el modelo de simulación espacial reflejó. En este sentido, la agricultura extensiva en la Región Pampeana ha sufrido cambios en la superficie sembrada, en la composición de los cultivos, en los niveles tecnológicos usados y en la intensidad en el uso de insumos de diferente tipo (Cuello, 2014). De esta manera, la superficie sembrada de los cuatro principales cultivos (soja, maíz, trigo, girasol), se extendió de 142.000 km² entre 1980-1982 a 320.000 km² en 2013-2015, representando un aumento del 125 % de tierras agrícolas. Como resultado de esto, la producción se incrementó en un 298 %. En relación con esto, desde la década de 1990, a partir de una combinación de factores económicos, comerciales, técnicos, científicos y logísticos, se incrementó el uso de fertilizantes en cultivos extensivos, contribuyendo al incremento de la producción agrícola (\cong 45 %) (Paruelo et al., 2006). El uso de este insumo sobrepasa los requerimientos de los cultivos. Existe evidencia científica que la escorrentía superficial generó el transporte de nitrógeno y fósforo hacia el dique Paso de las Piedras (ubicado en la cuenca media), produciéndose un acelerado proceso de eutrofización durante los períodos de elevadas precipitaciones (primavera-verano) entre los años 2008 y 2009 (Espósito et al., 2016). Además, el incremento de nutrientes producto de la fertilización del cultivo de trigo fue hallado en todos los cursos de agua de la cuenca media y baja como así también en la laguna Sauce Grande, durante el invierno y la primavera de 2016 (Capítulo 5).

La isohieta de 700 mm divide la cuenca en un sector subhúmedo con una mayor capacidad agrícola donde se realizan cultivos de invierno (trigo, cebada, avena) y cultivos de verano (girasol, soja y maíz) y una zona semiárida que presenta limitaciones fundamentalmente en la precipitación y en menor medida de suelo que determinan una aptitud predominantemente ganadera. Los cultivos de invierno constituyen las principales alternativas agrícolas, mientras que los de verano son escasos. Además, la probabilidad de déficit hídrico durante el ciclo de cultivos de invierno oscila entre el 60 y 70 % y es mayor en cultivos de verano (entre 88 y 92 %). Esta situación debe ser comunicada a los productores agropecuarios, dado que el déficit hídrico en etapas fenológicas críticas (como la floración) define el número de granos que es la principal determinante del rendimiento (Rolla et al., 2018).

Las zonas de vulnerabilidad baja corresponden a pastizales naturales e introducidos que son realizadas en las áreas óptimas para su emplazamiento. Los pastizales naturales comprenden aquellas áreas del mundo que por limitaciones climáticas como por ejemplo, escasas precipitaciones, bajas temperaturas, limitaciones edáficas, escaso drenaje, etc., no son adecuadas para la realización de cultivos. El uso predominante de los mismos es el pastoreo (Verchot et al., 2007). La alta variabilidad de las precipitaciones de la cuenca afecta la disponibilidad de pasturas y pastizales para consumo animal. La alternativa en los climas como el del área de estudio es la implantación de pasturas megatérmicas y templadas, tolerantes a la sequía, como el pasto llorón (*Eragrostis curvula*) y el agropiro (*Agropyron*) que no solo permiten bajar los costos de producción, sino que también elevan la carga animal e incrementan la producción anual de carne (INTA). Además, para preservar la biodiversidad es indispensable fomentar el uso de las pasturas naturales en detrimento de las introducidas.

Las zonas de vulnerabilidad muy baja están representadas principalmente en el afloramiento y en menor medida en el médano. Estas son áreas con suelos desnudos y están expuestas a la erosión eólica, generando consecuencias sobre las playas (Huamantín Cisneros et al., 2011b) e hídrica sobre las ciudades (Gil y Campos de Ferreras, 2006). Sin embargo, en su emplazamiento actual las mismas no presentan un nivel de vulnerabilidad eco-ambiental considerable.

A partir de esta delimitación de áreas con distintos niveles de vulnerabilidad, se propusieron estrategias sustentables de manejo del espacio con el objetivo de mejorar la calidad ambiental y fomentar la permanencia de las actividades económicas en la cuenca del río Sauce Grande (Tabla 7.5).

Tabla 7.5. Estrategias de manejo del espacio para las áreas con distintos niveles de vulnerabilidad eco-ambiental en la cuenca del río Sauce Grande.

Nivel de vulnerabilidad eco-ambiental	Estrategias de manejo
Muy Alta	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño de un plan de manejo del territorio a corto, mediano y largo plazo en el que participen los actores sociales y los tomadores de decisiones. • Fomentar la participación del Comité de cuenca del río Sauce Grande para informar a los productores agropecuarios y la población las zonas inundables. • Implementar en el campo señales y/o carteles para reconocer las áreas anegables y ayudar a reducir el riesgo, fundamentalmente agropecuario.
Alta	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño de un plan de manejo sustentable que tenga como principal medida la participación de los productores agropecuarios del área, dado que en estas áreas se desarrollan cultivos sobre pastizal. • Incentivar económicamente a los productores agropecuarios que fomenten la producción de pastizales naturales para ganadería extensiva. • Preservar las pasturas naturales para no alterar la biodiversidad de las especies nativas.
Media	<ul style="list-style-type: none"> • Informar a los productores agropecuarios y a las autoridades de toda la cuenca las problemáticas ambientales y económicas que genera la sobreexplotación del recurso suelo. • Comunicar por medio de organismos provinciales, municipales y del Comité de la cuenca, los efectos de los eventos secos y húmedos sobre la producción agropecuaria para concientizar a la población sobre las implicancias climáticas que tienen los regímenes semiáridos en las economías regionales. • Informar a los productores agropecuarios el riesgo de déficit que existe durante el crecimiento y el desarrollo de los cultivos, fundamentalmente en los de verano dado que este parámetro condiciona el rendimiento de los mismos. • Fortalecer la vinculación de los actores sociales de la cuenca en el marco de la participación en la gestión sostenible y el riesgo agroproductivo. • Fomentar la siembra de especies que se adapten mejor a las condiciones climáticas que presenta la cuenca.
Baja	<ul style="list-style-type: none"> • Preservar los pastizales y las coberturas naturales con el objetivo de mantener la biodiversidad de las especies nativas.

	<ul style="list-style-type: none"> • Concientizar a la población sobre la importancia de estas coberturas y el impacto negativo que podrían tener en el caso de que se utilicen con otros fines. • Implantación de pasturas megatérmicas y templadas, tolerantes a la sequía que no solo permiten bajar los costos de producción sino que elevar la carga animal e incrementar la producción anual de carne (INTA).
	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño de medidas de protección de las ciudades que están ubicadas en espacios con gran pendiente (como ocurre en la cuenca alta) y que son susceptibles a las inundaciones por desbordes de ríos o crecimiento lagunar (en la cuenca media y baja).
Muy Baja	<ul style="list-style-type: none"> • Fomentar la protección de las playas, prohibiendo el tránsito vehicular y regulando la edificación en altura en áreas turísticas. • Generar medidas de protección de los médanos costeros ante tormentas fuertes para disminuir la erosión costera.

4. CONCLUSIÓN

En este capítulo se evaluó la vulnerabilidad eco-ambiental de la cuenca del río Sauce Grande a partir del análisis y superposición de dos matrices obtenidas con diferentes metodologías: una derivada de un modelo de simulación espacial, que representó las condiciones óptimas, y otra generada a partir de la delimitación de las coberturas *in situ*. Su aplicación permitió establecer cinco niveles de vulnerabilidad. El nivel más frecuente fue el bajo (1343,7 km²), seguido del alto (1091,4 km²). Este último nivel, observado principalmente en la cuenca baja, se generó como consecuencia del desarrollo de cultivos sobre áreas de pastizal. Esta situación pone de manifiesto una gran problemática ambiental, dado que su extensión decreció como consecuencias de la introducción de cultivos. Son conservación es fundamental ya que provee bienes y servicios ecosistémicos que podrían verse afectados por el uso agrícola. Por otra parte, si bien el nivel muy alto y medio fueron menos representativos, el análisis de las problemáticas que allí se generan es fundamental. En el caso del nivel muy alto, los cultivos o pasturas se desarrollan sobre zonas anegables. Considerando que la cuenca presenta una alta variabilidad pluviométrica que afecta negativamente a la producción agrícola y a la cobertura de agua, el conocimiento de donde se emplaza este nivel de vulnerabilidad es fundamental para el desarrollo económico y social. Por otro lado, el conocimiento de las áreas donde se desarrolla el nivel medio es importante, dado que los cultivos se realizan sobreexplotando el recurso suelo. Dicha situación degrada el suelo y podría generar significativas problemáticas ambientales y

socio-económicas tales como pérdida de materia orgánica y nutriente, deterioro de la estructura, mayor tasa de erosión, entre otras. Además, la mayoría de ellos se realizan bajo condiciones de secano por lo que la significativa variabilidad pluviométrica podría generar pérdidas económicas, especialmente en los cultivos de verano, dada la alta probabilidad de déficit hídrico en el momento de definición del rendimiento.

Finalmente, las estrategias que se diseñaron tuvieron como objetivo mejorar la calidad ambiental de la cuenca teniendo en cuenta la sostenibilidad ambiental, social y económica. Estas, se transmitirán en el corto plazo a todos los actores sociales y tomadores de decisiones involucrados en la cuenca (comité, organismos municipales y provinciales, productores agropecuarios) para lograr un consenso general y generar un respaldo legal mediante una ordenanza provincial que asegure su implementación.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES FINALES

Los resultados de esta investigación permitieron comprobar las tres hipótesis planteadas. En la primera de ellas, se propuso que la variabilidad pluviométrica afecta la dinámica espacio-temporal de los principales recursos hídricos de la cuenca media y baja del río Sauce Grande, mientras que en la segunda se indicó que el monitoreo en alta frecuencia permite caracterizar las fluctuaciones diarias del caudal del río Sauce Grande, detectar fenómenos de circulación local en la laguna Sauce Grande de origen geomorfológico, como así también evaluar el efecto de la brisa de mar sobre los mismos. Por otro lado, en la tercera se indicó que la topografía y las actividades antrópicas modifican la calidad del agua de los recursos hídricos y a su vez, estas últimas, exponen a la cuenca del río Sauce Grande a diferentes niveles de vulnerabilidad eco-ambiental.

Para demostrar la primera de ellas se realizó un análisis de las fluctuaciones interanuales y de la tendencia de los tres parámetros meteorológicos más importantes (viento, temperatura y precipitación), utilizando registros históricos en el área de influencia de la cuenca analizada. Se observó que la temperatura presentó un gradiente regional creciente en sentido N-S. La tendencia fue positiva y estadísticamente significativa en las tres estaciones analizadas. Además, se observó que a partir de 2008 las anomalías fueron positivas en la totalidad de la región. Esta situación permitió demostrar que la región tiende al calentamiento, al igual que lo demostrado a escala global. La velocidad del viento fue decreciente en todas las estaciones analizadas y presentó similitudes con la tendencia observada a escala mundial. Por otro lado, la precipitación mostró un gradiente regional inverso a la temperatura dado que decreció en sentido N-S. Su tendencia fue espacialmente heterogénea, aumentando en el norte y sur y disminuyendo en el centro. Este parámetro, se estudió con mayor detalle dado que es el principal factor en la variación espacio-temporal en la hidrografía de una cuenca. Para ello, se realizó un análisis multitemporal entre la precipitación anual y la extensión areal, calculada a partir del procesamiento de imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8 de los dos cuerpos de agua más importantes de la cuenca del río Sauce Grande: el dique Paso de Las Piedras y la laguna Sauce Grande, durante el período 1987-2017. Tras su análisis se encontró que el área y la precipitación presentaron una asociación lineal positiva, alta y estadísticamente significativa. La variación areal de la laguna Sauce Grande estuvo explicada por la precipitación en un 67 %, mientras que la del dique Paso de Las Piedras en un 55 %. Ambos cuerpos de agua presentaron los mismos períodos de

incremento (2001 a 2005 y 2014 a 2017) y reducción de su área (2007 a 2013). Esta situación pone de manifiesto la importancia del conocimiento de la variación multitemporal del área de estos dos cuerpos de agua, principalmente en los ciclos de menor cobertura, dado que fueron más extensos y han generado graves consecuencias sociales y económicas como son la pérdida de calidad de agua, mortandad de peces, abastecimiento de agua potable (en el caso del reservorio), entre otros. Los parámetros morfométricos que presentaron mayor variación con respecto a los montos de precipitación fueron el área, el perímetro y la longitud máxima total, mientras que el desarrollo de línea de costa, si bien tuvo pequeñas diferencias entre los años, no alcanzó para modificar la forma por lo que la laguna Sauce Grande siempre conservó su forma elíptica y el embalse fue subrectangular elongado. Es importante destacar que el nivel de agua del dique Paso de Las Piedras es controlado porque se utiliza como agua potable e industrial. En ciertas épocas del año, el caudal del río Sauce Grande aguas abajo del mismo, principalmente en períodos secos, es regulado para mantener su nivel por lo que el área de la laguna podría variar en función del manejo del reservorio o también por intensificación del uso de agua del río para riego en la zona cercana al ingreso del curso de agua en la misma.

El análisis en alta frecuencia permitió caracterizar las fluctuaciones diarias del caudal del río Sauce Grande y evaluar su relación con la precipitación, relacionándose con la segunda hipótesis planteada. Se encontró que las fluctuaciones del flujo responden a la irregularidad de las precipitaciones. Durante el período de estudio, el caudal medio fue mayor luego de la confluencia de arroyo Las Mostazas y el río Sauce Grande (E2) que antes de su ingreso en la laguna (E1). El río presentó tres momentos de crecidas, las cuales fueron analizadas mediante hidrogramas. El evento de mayor magnitud se encontró en septiembre de 2017 y el caudal máximo fue $34,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en E2 y de $4,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en E1. Las precipitaciones que generaron este caudal fueron entre 60 y 80 mm en un día. El tiempo de escurrimiento directo fue mayor en E2 y el máximo fue 12 días, asociado a la escasa pendiente que presenta el terreno en ese sector. A partir del procesamiento de imágenes satelitales Landsat se visualizó la superficie cubierta por agua durante el evento de máxima crecida (septiembre de 2017) y se detectaron las áreas inundables ante precipitaciones intensas, tras su comparación con momentos de caudal medio y escaso del río Sauce Grande. Las mismas se ubicaron en la barrera de Medanosa Austral y en los sectores cercanos al ingreso del río en la laguna homónima, como así también en las áreas próximas a su descarga en el Océano Atlántico.

Por otro lado, el monitoreo en alta frecuencia realizado en la laguna Sauce Grande permitió conocer la variación de los parámetros medidos e identificar los ciclos características de la misma. Además, se comparó la dinámica de este cuerpo de agua en diferentes momentos de nivel de agua, dado que se realizó este mismo tipo de estudio en un período de extrema sequía regional (Fornerón, 2012). En general, todas las variables presentaron una marcada estacionalidad. Con respecto al estudio desarrollado por Fornerón (2012) y los hallados en esta tesis se encontró que la laguna presentó mayor nivel de agua a los registrados por esta autora, como así también se observó un aumento de la temperatura del agua y del aire y una disminución de la conductividad eléctrica y la velocidad del viento, lo que indica que sus parámetros fluctúan significativamente con respecto a los períodos secos y húmedos. La medición en alta frecuencia también permitió detectar procesos de interacción agua-atmósfera que con métodos tradicionales en baja frecuencia no se identificaron. Tras el análisis de la Transformada Rápida de Fourier se detectó que la temperatura del agua y del aire y la velocidad del viento presentaron ciclos de energía entre 4 y 8 h. A partir de esto, se realizó un análisis exhaustivo de la información hidrometeorológica y se detectó que la laguna Sauce Grande presenta una circulación atmosférica local caracterizada por un aumento de la velocidad del viento en las horas de mayor radiación solar producto del desigual calentamiento que presenta este cuerpo de agua con respecto al médano que la limita al sur. Esta circulación local, de origen geomorfológico, se encontró sólo cuando la región presentaba el pasaje de centros de alta presión que generan alta presión atmosférica, cielo despejado y viento regional mínimo. Además, esta laguna se encuentra a 6 km del Océano Atlántico, separada por la Barrera Medanosa Austral, que caracteriza la costa sur de la provincia de Buenos Aires. Mediante la información provista por una estación meteorológica ubicada en la costa, se seleccionaron ejemplos de la brisa de mar y se constató que este fenómeno ingresa en la laguna aproximadamente 2 h más tarde, generando disminución de la temperatura e incremento de la velocidad y dirección del viento con componente sur. Por lo tanto, el conocimiento de los efectos de la brisa marina sobre la laguna y de la circulación local de origen geomorfológico es fundamental para la planificación de las actividades turísticas que se desarrollan en la laguna Sauce Grande.

Para responder a la tercera hipótesis planteada, se realizó, por primera vez, un estudio estacional de la calidad del agua de la cuenca media y baja, contemplando el río Sauce Grande antes y luego de su desembocadura en la laguna homónima, esta última, el arroyo Las Mostazas y su principal afluente, el arroyo Las Cortaderas

durante el año 2016. En función del comportamiento de los parámetros limnológicos en los ocho sitios analizados, se encontró que la cuenca media y baja presentó tres unidades espaciales diferentes: i) el río Sauce Grande antes de su ingreso en la laguna, ii) el arroyo Las Cortaderas y iii) el arroyo Las Mostazas en conjunto con la laguna y el sitio más cercano a la descarga del río en el Océano Atlántico. Sus diferencias se basan en el contenido de CE, seston, MOP, NT y PT. Todos los parámetros medidos presentaron una marcada variación espacio-temporal. La CE mostró un marcado patrón espacial, dado que aumentó a medida el río drena sus aguas hacia la laguna y en el sector más cercano a la desembocadura del río en el Océano Atlántico. Este proceso podría estar generado por la dinámica de escurrimiento que presenta la cuenca desde la zona de mayor pendiente a la de menor. Los altos valores de CE encontrados en el arroyo Las Mostazas, se relacionó a su cercanía del mismo a la ciudad de Coronel Dorrego. El seston y la MOP también se incrementaron a medida el río se encuentra más cercano a su desembocadura en el cuerpo de agua y fue registrado en el otoño, en coincidencia con las elevadas precipitaciones. Es importante destacar que la laguna y el arroyo Las Cortaderas presentaron su máximo valor de seston en el verano, probablemente producto de las altas tasas de fitoplancton. Si bien se demostró, que la laguna presentó gran actividad fotosintética durante todo el año, y en especial durante la estación más cálida, el monitoreo de la Cl *a* en ese arroyo y en los demás cursos de agua sería fundamental para establecer relaciones más concretas. Por otro lado, es importante destacar que el seston de la laguna Sauce Grande fue estudiado durante un período de extrema sequía (septiembre de 2008-diciembre de 2010) y se observó que fue alto. En esta tesis, esta variable fue significativamente inferior, lo que permite afirmar que esta variable fluctúa en función del nivel de agua lagunar. El valor medio de OD permitió clasificar a todos los ambientes analizados como moderadamente ricos en oxígeno. Además, fue mayor en invierno y menor en primavera, dada su relación con la temperatura del agua. Su valor fue aceptable para la gran mayoría de los organismos acuáticos y especies de peces. Teniendo en cuenta los nutrientes analizados, el NT fue más elevado que el PT y presentaron una marcada diferenciación estacional y temporal. Los mismos aumentaron en invierno y en primavera, lo que se relaciona con el uso de fertilizantes en las etapas de siembra (junio-julio) y maduración (septiembre-octubre) del cultivo de trigo, el principal de la cuenca. Lo mencionado anteriormente demuestra que la topografía de la cuenca y las actividades humanas modifican la calidad del agua de los sitios analizados. Esto ocasionó, por ejemplo, una mayor carga de nutrientes producto de las actividades agrícolas y acumulación de sales en la

laguna y en el sector más cercano a la descarga del río en el Océano Atlántico generado por la diferencia de pendiente.

La clasificación de las coberturas del suelo de la cuenca se realizó a partir de la aplicación de diferentes métodos supervisados y no supervisados sobre dos conjuntos de datos: bandas e índices espectrales calculados a partir de las imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8. Se encontró que el método más preciso para clasificar las coberturas del suelo en la llanura fue el MAL, mientras que el MAD en el afloramiento y el médano, utilizando como base de datos para clasificación los índices espectrales. Esta metodología permitió realizar, por primera vez, un análisis espacio-temporal de las coberturas del suelo durante el período 2000-2016. Se encontró que la superficie cubiertas con vegetación y en especial, los cultivos, fluctuaron en función de los montos de precipitación como ocurrió en el año 2014, donde se registró un decrecimiento de los cultivos de invierno producto de los excesos hídricos antes de su fecha de siembra y a su vez, la mayor área de cultivos de verano producto de las óptimas condiciones de humedad del suelo antes de su implantación. Durante un año seco, las coberturas también fluctuaron y se registró la menor área de cultivos de verano y como consecuencia, un aumento de la vegetación natural (pastizales). Este estudio fue fundamental dado que permitió conocer la distribución de las diferentes coberturas del suelo *in situ* en cada área geomorfológica y además, sirvió de base para generar el cruce de matrices con el mapa resultante de un modelo de simulación espacial que representaron las coberturas óptimas. A partir de este procedimiento, se encontró que la cuenca presenta cinco niveles de vulnerabilidad eco-ambiental, siendo en bajo el más frecuente seguido del alto. Sin embargo, esta última categoría es importante considerarla dado que las áreas de pastizales se utilizan para la implantación de cultivos, por lo que su conservación es fundamental dado la significativa provisión de bienes y servicios ecosistémicos que estos brindan. Los niveles muy alto y medio fueron menos frecuentes, pero las problemáticas que en estos espacios se generan es crítica porque, en el primer caso, las áreas de cultivo se realizan sobre áreas inundables lo que podría generar graves consecuencias económicas a los productores agropecuarios. En el segundo, el recurso suelo está sobreexplotándose por la mayor cantidad de superficie destinada a cultivos. Además, este nivel está caracterizado por el riesgo que asumen los productores agropecuarios al destinar sus tierras para cultivos, principalmente los de verano, dado que la mayoría de ellos, se realizan bajo condiciones de secano y con un elevado déficit hídrico en las etapas fenológicas más sensibles, pudiendo afectar el rendimiento final y generar pérdidas económicas. Lo anteriormente expuesto, se relaciona a la tercera hipótesis

planteada. Los diferentes niveles de vulnerabilidad eco-ambiental y sus problemáticas relacionadas a cada uno de ellos permitieron diseñar estrategias que tuvieron como objetivo mejorar la calidad ambiental de la cuenca, considerando la sostenibilidad ambiental, social y económica. Su implementación sería fundamental para reducir los impactos negativos y concientizar a la población sobre el riesgo de inundación de las áreas de cultivos, la importancia de la conservación del pastizal y el recurso suelo, el riesgo de déficit durante el crecimiento y desarrollo de los cultivos, la relevancia de la conservación de los médanos, entre otros.

Finalmente, los resultados de esta tesis representan un avance significativo en el campo de la investigación meteorológica, limnológica y de coberturas del suelo de la cuenca del río Sauce Grande, dado que es la primera vez que se evalúa la dinámica de los recursos hídricos de la cuenca media y baja en alta y baja frecuencia, su variación espacio-temporal considerando un extenso período de tiempo y los efectos que presentan las actividades antrópicas y la topografía sobre los mismos. A su vez, representa un trabajo original dado que las coberturas del suelo *in situ* no habían sido clasificadas hasta el momento, utilizando datos satelitales y de campo y probando diferentes métodos de clasificación teniendo en cuenta las características geomorfológicas de la cuenca. Su aplicación fue esencial dado que no sólo permitió evaluar el estado actual de la misma, sino que también sirvió de base para contrastarlo con las condiciones óptimas, evaluar el nivel de vulnerabilidad eco-ambiental y generar estrategias de manejo sustentable.

REFERENCIAS

- Adrian, R., O'Reilly, C.M., Zagarese, H., Baines, S.B., Hessen, D.O., Keller, W. y Weyhenmeyer, G.A. 2009. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and oceanography*, 54(6), 2283-2297.
- Aduriz, M.A., Gargano, A.O., Chimeno, P., Saldungaray, M.C. y Conti, V.P. 2003. Caracterización de los agrosistemas predominantes de la cuenca alta del Río Sauce Grande. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 32(3), 3-26.
- Aguilera, R., Livingstone, D.M., Marcé, R., Jennings, E., Piera, J. y Adrian, R. 2016. Using dynamic factor analysis to show how sampling resolution and data gaps affect the recognition of patterns in limnological time series. *Inland Waters*, 6, 284-294.
- Alfonso, M.B. 2015. Estructura y dinámica del zooplancton en una laguna con manejo antrópico: laguna La Salada (Pedro Luro, Pcia. de Buenos Aires). Tesis de Doctor en Biología, Departamento de Biología, Bioquímica y Farmacia, Universidad Nacional del Sur, Argentina, 173 p.
- Alfonso, M.B., Vitale, A.J., Menéndez, M.C., Perillo, V.L., Piccolo, M.C. y Perillo, G.M.E. 2015. Estimation of ecosystem metabolism from diel oxygen technique in a saline shallow lake: La Salada (Argentina). *Hydrobiologia*, 752(1), 223-237.
- Alfonso, M.B., Brendel, A.S, Vitale, A.J, Seitz, C., Piccolo, M.C. y Perillo, G.M.E. 2018. Drivers of Ecosystem Metabolism in Two Managed Shallow Lakes with Different Salinity and Trophic Conditions: The Sauce Grande and La Salada Lakes (Argentina). *Water*, 10(9), 1136.
- Agrofy, 2014. Excesos de humedad afectan la siembra de trigo. <https://news.agrofy.com.ar/noticia/141638/excesos-humedad-afectan-siembra-trigo>.
- Aliaga, V.S., Ferrelli, F. y Piccolo, M.C. 2017. Regionalization of climate over the Argentine Pampas. *International Journal of Climatology*, 37(S1), 1237-1247.
- Aliaga, V.S. 2018. Variabilidad climática de la Región Pampeana y su efecto sobre las lagunas de la región. Tesis de Doctor en Geografía, Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Argentina, 193 p.
- Alrababah, M.A. y Alhamad, M.N. 2006. Land use/cover classification of arid and semi-arid Mediterranean landscapes using Landsat ETM. *International Journal of Remote Sensing*, 27(13), 2703-2718.
- Álvarez, J., Martínez, A.M., Ábalo, P.O., Weis, C.F. y Fernández, S.N. 2018. Hidroquímica y materia orgánica del agua superficial de la cuenca alta del río Sauce Grande. *Revista Estudios Ambientales*, 6(2), 21-41.
- Anjos, M. y Lopes, A. 2018. Sea breeze front identification on the northeastern coast of Brazil and its implications for meteorological conditions in the Sergipe region. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-15.
- Anurogo, W. y Lubis, M.Z. 2018. Modified Soil-Adjusted Vegetation Index In Multispectral Remote Sensing Data for Estimating Tree Canopy Cover Density at

- Rubber Plantation. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 3(1), 15-24.
- Arnaudo, M.F. y Corbella, V. 2013. Análisis de la potencialidad de Monte Hermoso para lograr el desarrollo local a partir de bienes culturales. *Revista de Investigación en Turismo y desarrollo local*, 6(15), 1-11.
- Atkins, D.E., Droegemeier, K.K., Feldman, S.I., Garcia-Molina H., Klein, M.L., Messerschmitt, D.G., Messina P., Ostriker, J.P. y Wright M.H. 2003. Revolutionizing science and engineering through cyberinfrastructure. *Report of the National Science Foundation blue-ribbon advisory panel on cyberinfrastructure*, 1.
- Azhar, S.C., Aris, A.Z., Yusoff, M.K., Ramli, M.F. y Juahir, H. 2015. Classification of river water quality using multivariate analysis. *Procedia Environmental Sciences*, 30, 79-84.
- Baleani, C.A., Menéndez, M.C., Alfonso, M.B., Fornerón, C.F. y Piccolo, M.C. 2017. Composición y abundancia del mesozooplankton en una laguna Pampeana (Provincia de Buenos Aires, Argentina). *Anales de Biología*, 39, 137-147.
- Barbieri, P., Echeverría, H., Sainz Rozas, H. 2009. Nitratos en el suelo a la siembra o al macollaje como diagnóstico de la nutrición nitrogenada en trigo en el sudeste bonaerense. *Ciencias del Suelo*, 27, 41-47.
- Barsi, J.A., Barker, J.L. y Schott, J.R. 2003. An atmospheric correction parameter calculator for a single thermal band earth-sensing instrument. En: *IGARSS 2003. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 5, 3014-3016.
- Barsi, J.A., Schott, J.R., Palluconi, F.D. y Hook, S.J. 2005. Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments. En: *Earth Observing Systems X*, 58820 p.
- Basílico, G.O., De Cabo, L. y Faggi, A. 2016. Adaptación de índices de calidad de agua y de riberas para la evaluación ambiental en dos arroyos de la llanura pampeana. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales nueva serie*, 17(2), 119-134.
- Benniou, R. y Bahlouli, F. 2015. Climate Change and Agriculture Conservation in Semi-Arid Environment. *Energy Procedia*, 74,25-31.
- Benseny, G., Padilla, N.A. y Varisco, C. 2015. Turismo y ordenamiento territorial. El caso de Santa Clara del Mar (Argentina). En: *X Bienal del Coloquio de Transformaciones Territoriales*, Córdoba, Argentina, 17 p.
- Bezak, N., Brilly, M. y Šraj, M. 2016. Flood frequency analyses, statistical trends and seasonality analyses of discharge data: a case study of the Litija station on the Sava River. *Journal of Flood Risk Management*, 9(2), 154-168.
- Blaylock, B.K., Horel, J.D. y Crosman, E.T. 2017. Impact of lake breezes on summer ozone concentrations in the Salt Lake valley. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(2), 353-370.
- Bohn, V.Y. 2009. Geomorfología e hidrografía de las lagunas del sur de la provincia de Buenos Aires. Tesis de Doctor en Geografía, Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Argentina, 244 p.

- Bohn, V.Y., Piccolo, M.C y Perillo, G.M.E 2011. Análisis de los períodos secos y húmedos en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista de Climatología*, 11.
- Bohn, V.Y., Delgado, A.L., Piccolo, M.C. y Perillo, G.M. 2016. Assessment of climate variability and land use effect on shallow lakes in temperate plains of Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 75(9), 818.
- Booman, G.C., Calandroni, M., Laterra, P., Cabria, F., Iribarne, O. y Vázquez, P. 2012. Areal changes of lentic water bodies within an agricultural basin of the Argentinean Pampas. Disentangling land management from climatic causes. *Environmental Management*, 50(6), 1058-1067.
- Bowes, M.J., Loewenthal, M., Read, D.S., Hutchins, M.G., Prudhomme, C., Armstrong, L.K. y Carvalho, L. 2016. Identifying multiple stressor controls on phytoplankton dynamics in the River Thames (UK) using high-frequency water quality data. *Science of the Total Environment*, 569, 1489-1499.
- Brendel, A.S., Dutto, M.S., Menéndez, M.C., Huamantínco Cisneros, M.A. y Piccolo, M.C. 2017a. Wind pattern change along a period of coastal occurrence variation of a stinging medusa on a SW Atlantic beach. *Geociências*, 40(3), 303-315.
- Brendel, A.S., Bohn, V.Y. y Piccolo, M.C. 2017b. Efecto de la variabilidad climática sobre el estado de la vegetación y la cobertura de agua en una cuenca de clima templado (Argentina). *Geociências*, 40(2), 5-16.
- Brendel, A.S., Mora, F. y del Barrio, R.A. 2017c. Aptitud agroclimática actual y potencial de la región patagónica para el cultivo de nogal (*Juglans regia* L.) en un contexto de cambio climático. *Revista Argentina de Agrometeorología*, 8, 15-27.
- Brendel, A.S., Piccolo, M. C. y Perillo, G.M.E. 2018. Análisis multitemporal de la cobertura de agua de la laguna Sauce Grande y su relación con la variabilidad pluviométrica. En: *XII Bienal del Coloquio Transformaciones Territoriales*. Asociación de Universidades Grupo Montevideo, Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, 928-936.
- Brendel, A.S., Ferrelli, F., Piccolo, M.C. y Perillo, G.M.E. 2019. Assessment of the effectiveness of supervised and unsupervised methods: maximizing land-cover classification accuracy with spectral indices data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(1), 014503.
- Camiolo, M.D., Cozzolino, E. y Jaureguizar, A.J. 2018. Material Particulado en Suspensión en el Río de la Plata: importancia del río Bermejo en su variabilidad espacio-temporal. *Revista de Teledetección*, 51, 1-18.
- Capriolo, A.D., Forte Lay, J. A. y Scarpati, O. 2008. La inundación del año 2001 en la Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Mundo Agrario*, 9,17, 1-24.
- Carbone, M.E., Pérez, D.E., Piccolo, M.C. y Perillo, G.M.E. 2006. Comportamiento hidrológico del arroyo Claromeco, Argentina. *Investigaciones Geográficas*, 39,179-193.

- Carbone, M.E., Fornerón, C.F. y Piccolo, M.C. 2015. Impacto de los eventos de sequía en la región de la cuenca hidrográfica de la laguna Sauce Grande (Provincia de Buenos Aires, Argentina). *Investigaciones Geográficas*, 63, 131-142.
- Carmona, F., Rivas, R., Thomas, L. y Marino, B. 2011. Caracterización espectral del estuario del río Quequén Grande por medio de imágenes Landsat. Rivas, R., Carmona, F. y Ocampo, D (Eds). En: *Teledetección: Recientes aplicaciones en la Región Pampeana*. Tandil, Buenos Aires, Argentina, 11-29.
- Carlson, R.E. 1983. DISCUSSION 1: Using Differences Among Carlson's Trophic State Index Values in Regional Water Quality Assessment, by Richard A. Osgood 2. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 19(2), 307-308.
- Carpenter, S.R., Stanley, E.H. y Vander Zanden, M.J. 2011. State of the world's freshwater ecosystems: physical, chemical, and biological changes. *Annual Review of Environment and Resources*, 36,75-99.
- Carrascal, C. 2017. Desarrollo de cuerpos de agua someros durante años húmedos extremos y sus implicancias socioeconómicas en la zona de drenaje indefinido occidental peripampeano (provincia de Buenos Aires). Tesis de Licenciado en Geografía, Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Argentina, 83 p.
- Casado, A. 2013. Human impacts and fluvial metamorphosis: the effects of flow regulation on the hydrology, morphology and water temperature of the Sauce Grande River, Argentina. Tesis de Doctor en Geografía, Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Argentina, 375 p.
- Casado, A., Peiry, J.L. y Campo, A. M. 2016. Geomorphic and vegetation changes in a meandering dryland river regulated by a large dam, Sauce Grande River, Argentina. *Geomorphology*, 268, 21-34.
- Castillejo-González, I.L., López-Granados, F., García-Ferrer, A., Peña-Barragán, J.M., Jurado-Expósito, M., de la Orden, M.S. y González-Audicana, M. 2009. Object-and pixel-based analysis for mapping crops and their agro-environmental associated measures using QuickBird imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68(2), 207–215.
- Castro, L., Fraile, J. y Vargas, J.R. 1996. Conductividad, oxígeno disuelto, PH y temperatura en el río Bermudez (Costa Rica) y su relación con el uso del suelo en la cuenca. *Uniciencia*, 13(1), 27-34.
- Cátedra de Limnología. 2000. Departamento de Ecología, Genética y Evolución. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. <http://biolo.bg.fcen.uba.ar/limn.htm>.
- Cazorla, A.C.L., Durán, W. y Tejera, L. 2003. Alimentación de la ictiofauna del río Sauce Grande, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Biología acuática*, 20, 73-79.
- Chavez Jr, P.S. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote sensing of environment*, 24(3), 459-479.

- Chen, A., He, X., Guan, H. y Cai, Y. 2018. Trends and periodicity of daily temperature and precipitation extremes during 1960–2013 in Hunan Province, central south China. *Theoretical and applied climatology*, 132 (1-2), 71-88.
- Chen, H., Xu, C.Y. y Guo, S. 2012. Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. *Journal of Hydrology*, 434, 36-45.
- Chen, J., Liao, A., Cao, X., Chen, L., Chen, X. y Zhang, W. 2015. China's global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103, 7-27.
- Chow, M.F., Shiah, F.K., Lai, C.C., Kuo, H.Y., Wang, K.W., Lin, C.H., y Ko, C.Y. 2016. Evaluation of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of Fei-Tsui Reservoir basin, Taiwan. *Environmental Earth Sciences*, 75(1), 6.
- Cifuentes, O y Bonzini, M. 2014. TIG's como Herramientas para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. En J. Uboldi (Ed.), *Geotecnologías del Sur Argentino: casos de estudio (397-413)*. Bahía Blanca: EDIUNS.
- Clements, C.B., Whiteman, C.D. y Horel, J.D. 2003. Cold-air-pool structure and evolution in a mountain basin: Peter Sinks, Utah. *Journal of Applied Meteorology*, 42(6), 752-768.
- Congalton, R.G. 2001. Accuracy assessment and validation of remotely sensed and other spatial information. *International Journal of Wildland Fire*, 10(4), 321-328.
- Congalton, R.G. y Mead, R.A 1983. A Quantitative Method to Test for Consistency and Correctness in Photointerpretation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49(1), 69- 74.
- Conte, A., Etchepareborda, M., Marino, M. y Vazquez Rovere, A. 2007. Oleaginización de la agricultura argentina. En: *V Jornadas Interdisciplinarias de Estudios Agrarios y Agroindustriales*, 11 p.
- Cony, N.L.; Ferrer, N.C y Cáceres, E.J. 2014. Evolución del estado trófico y estructura del fitoplancton de un lago somero de la región pampeana: laguna Sauce Grande (Pcia. de Buenos Aires, Argentina). *Biología Acuática*, 30, 79-91.
- Cony, N.L., Ferrer, N.C., Martínez, A. y Cáceres, E.J. 2016. Productividad, estado trófico y dinámica fitoplanctónica en la laguna Sauce Grande y su afluente homónimo (pcia. de Buenos Aires, Argentina). *Biología Acuática*, 31, 50-62.
- Cony, N.L. 2018. Aspectos biológicos, ecológicos y ambientales de la laguna pampeana Sauce Grande y la cuenca media del río de influencia. Tesis de Doctor en Biología, Departamento de Biología, Bioquímica y Farmacia, Universidad Nacional del Sur, Argentina, 278 p.
- Cortés Guajardo, G.E. 2018. Análisis comparativo de generación de entropía y potencia mecánica en configuraciones de emplazamiento de turbinas eólicas de eje vertical. Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Universidad de Chile, 63 p.
- Crisci, C., Goyenola, G., Terra, R., Lagomarsino, J.J., Pacheco, J.P., Díaz, I. y Ghattas, B. 2017. Dinámica ecosistémica y calidad de agua: estrategias de

- monitoreo para la gestión de servicios asociados a Laguna del Sauce (Maldonado, Uruguay). *Innotec*, 13, 46-57.
- Crosman, E.T. y Horel, J.D. 2010. Sea and lake breezes: A review of numerical studies. *Boundary-layer meteorology*, 137(1), 1-29.
- Cuello, M. 2014. Bienes informacionales en el agro argentino: un análisis del impacto económico a la luz del capitalismo cognitivo. *Revista Hipertextos. Capitalismo, Técnica y Sociedad en debate*, 1(2), 166-198.
- Dangavs, N.V. 2005. Los ambientes acuáticos de la Provincia de Buenos Aires. Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires. En: *XVI Congreso Geológico Argentino*. La Plata, 219-236.
- Darder, L., Andriulo, A., Castiglioni, M., Colombini, D., Villalba, F., Rimatori, F., Dalpiaz, J., García, L., y Milesi, L. 2012. La distancia al curso de agua y la pérdida de elementos por erosión. En: *XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Mar del Plata, Argentina.
- Davey, M.K., Brookshaw, A. y Ineson, S. 2014. The probability of the impact of ENSO on precipitation and near-surface temperature. *Climate Risk Management*, 1, 5-24.
- Davie, T. 2008. *Fundamentals of hydrology*. Routledge, Londres, Gran Bretaña, 169 p.
- de la Fuente, E.B. y Suárez, S.A. 2008. Problemas ambientales asociados a la actividad humana: la agricultura. *Ecología Austral*, 18(3), 239-252.
- Delgado, A.L., Vitale, A.J., Perillo, G.M.E. y Piccolo, M.C. 2012. Preliminary analysis of waves in the coastal zone of Monte Hermoso and Pehuén Co, Argentina. *Journal of Coastal Research*, 28(4), 843-852.
- Denegri, G.A. y Gaspari, F.J. 2010. Lineamientos para la formulación de pagos por servicios ambientales. Estudio de caso: Alta Cuenca del Río Sauce Grande, Argentina. *Cuadernos Geográficos*, 46, 93-110.
- Deng, J., Paerl, H.W., Qin, B., Zhang, Y., Zhu, G., Jeppesen, E. y Xu, H. 2018. Climatically-modulated decline in wind speed may strongly affect eutrophication in shallow lakes. *Science of the Total Environment*, 645, 1361-1370.
- Díaz, V.M., Elizalde, A.E.E., Quiroz, C.H., Molina, A.F.I. y García, R.J. 2005. Caracterización de algunos parámetros físico-químicos del agua y sedimento del lago "Zempoala", Morelos, México. *Acta Universitaria*, 15(2), 57 - 65.
- Donald, P.F. 2004. Biodiversity impacts of some agricultural commodity production systems. *Conservation Biology*, 18(1), 17-38.
- Doraiswamy, P.C., Hatfield, J.L., Jackson, T.J., Akhmedov, B., Prueger, J. y Stern, A. 2004. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 92(4), 548-559.
- Duan, W., He, B., Nover, D., Yang, G., Chen, W., Meng, H. y Liu, C. 2016. Water quality assessment and pollution source identification of the eastern Poyang Lake Basin using multivariate statistical methods. *Sustainability*, 8(2), 133.
- Espósito, M.E., Blanco, M.C., Sequeira, M.E., Paoloni, J.D. y Fernández, S.N. Contaminación natural (As, F) y eutrofización (N, P) en la cuenca del arroyo El Divisorio, Argentina. *International Journal of Experimental Botany*, 85(2), 51-62.

- Estimaciones Agrícolas Nacionales (SIIA, 2015-2018) perteneciente al Ministerio de Agroindustria (<https://www.agroindustria.gob.ar/datosabiertos/>).
- Feijoó, C.F. y Lombardo, R.J. 2007. Baseline water quality and macrophyte assemblages in Pampean streams: A regional approach. *Water Research*, 41, 1399-1410.
- Fernández, C. 2010. Caracterización limnológica de un ambiente eutrófico: el embalse Paso de las Piedras, Argentina. Bioecología del fitoplancton. Tesis de Doctor en Biología, Departamento de Bioquímica, Biología y Farmacia, Universidad Nacional del Sur, Argentina, 351 p.
- Fernández-Long, M.E., Müller, G.V., Beltrán-Przekurat, A. y Scarpati, O.E. 2013. Long-term and recent changes in temperature-based agroclimatic indices in Argentina. *International Journal of Climatology*, 33(7), 1673-1686.
- Ferrelli, F. 2016a. Efectos de eventos El Niño y La Niña sobre las lagunas del sur de la Región Pampeana (Argentina). *InterEspaço*, 2(6), 122-142.
- Ferrelli, F., Bustos, M.L. y Piccolo, M.C. 2016b. La expansión urbana y sus impactos sobre el clima y la sociedad de la ciudad de Bahía Blanca, Argentina.; Instituto de Economía, Geografía y Demografía. *Estudios Geográficos*, 77, 469-489.
- Ferrelli, F. 2017a. Variabilidad pluviométrica y sus efectos sobre las coberturas del suelo al sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Geográfica Venezolana*, 58(1), 26-37.
- Ferrelli, F., Bustos, M. L. y Piccolo, M.C. 2017b. Variabilidad climática temporal y sus efectos: aportes al ordenamiento territorial de la costa norte del estuario de Bahía Blanca (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 26(1), 79-96.
- Ferrelli, F., Huamantincó Cisneros, M.A., Delgado, A.L. y Piccolo, M.C. 2018. Spatial and temporal analysis of the LST-NDVI relationship for the study of land cover changes and their contribution to urban planning in Monte Hermoso, Argentina. *Documents d'anàlisi Geogràfica*, 64(1), 25-47.
- Ferrelli, F., Brendel, A.S., Aliaga, V.S., Piccolo, M.C. y Perillo, G.M.E. 2019. Climate regionalization and trends based on daily temperature and precipitation extremes in the south of the Pampas (Argentina). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 45(1), 393-416.
- Ferrer, N.C., Cony, N.L., Forneron, C.F. y Piccolo, M.C. 2012. Caracterización del fitoplancton y estado trófico de la laguna Sauce Grande (Provincia de Buenos Aires, Argentina) en el otoño de 2010. *Biología Acuática*, 27, 129-141.
- Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G.P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R. y Helkowski, J.H. 2005. Global consequences of land use. *Science*, 309 (5734), 570-574.
- Formica, S.M., Sacchi, G.A., Campodonico, V.A., Pasquini, A.I. y Cioccale, M.A. 2015. Modelado de calidad de agua en ríos de montaña con impacto antrópico. Caso de estudio: Sierra Chica de Córdoba, Argentina. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 31(4), 327-341.

- Fornerón, C.F., Piccolo, M.C. y Perillo, G.M.E, 2011. Summer high frequency monitoring in Sauce Grande shallow lake (Argentina). 12th Reunión del Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON), Ramot, Israel.
- Fornerón, C.F. 2012. Hidrografía de la laguna Sauce Grande (provincia de Buenos Aires) en época de sequía. Tesis de Doctor en Geografía, Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Argentina, 216 p.
- Freeman, M.C., Pringle, C.M. y Jackson, C.R. 2007. Hydrologic connectivity and the contribution of stream headwaters to ecological integrity at regional scales 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 43(1), 5-14.
- Garau, G.A. 2013. Las brisas marinas y su significación geográfica. El caso de Mallorca. *Sémata: Ciencias sociais e humanidades*, 25, 7-28.
- García, M.C. y Piccolo, M.C. 2004. Brisas de mar estivales en Mar del Plata y Necochea. Provincia de Buenos Aires, Argentina, en Fritschy, B. (Ed.): *Actas de la V Jornadas Nacionales de Geografía Física*, 2004, pp. 95-104.
- Gaspari, F.J., Rodríguez Vagaría, A.M., Delgado, M.I., Senisterra, G.E. y Denegri, G.A. 2011. Vulnerabilidad ambiental en cuencas hidrográficas serranas mediante SIG. *Multequina*, 20(1), 3-13.
- Gaspari, F.J., Vagaría, A.M.R., Senisterra, G.E., Denegri, G.A., Delgado, M.I. y Besteiro, S.I. 2012. Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGMDOMUS*, 4, 143-158.
- Geddes, J. y Chance, K. 2018. Characterizing sea breeze effects on surface ozone concentrations in the Boston region, and implications for remote sensing of local air quality. En: *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- Genchi, S.A., Vitale, A.J., Piccolo, M.C. y Perillo, G.M.E. 2016. Wind energy potential assessment and techno-economic performance of wind turbines in coastal sites of Buenos Aires province, Argentina. *International Journal of Green Energy*, 13(4), 352-365.
- Geraldi, A.M. 2009. Estudio Geoambiental de la Cuenca lagunar las Encadenadas del Oeste. Tesis de Doctor en Geografía, Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Argentina, 330 p.
- Geraldi, A.M., Piccolo, M.C. y Perillo, G.M.E. 2011. El rol de las lagunas bonaerenses en el paisaje pampeano. *Ciencia Hoy*, 22, 09-14.
- Gil, V. y Campos de Ferreras, A.M. 2006. Caracterización morfológica sectorizada del río Sauce Grande, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Geográfica de Valparaíso*, 38, 19-28.
- Gil, V. 2009. Hidrogeomorfología de la cuenca alta del río Sauce Grande aplicada al peligro de Crecidas. Tesis de Doctor en Geografía, Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Argentina, 289 p.
- Gilani, H., Shrestha, H. L., Murthy, M. S. R., Phuntso, P., Pradhan, S., Bajracharya, B. y Shrestha, B. 2015. Decadal land cover change dynamics in Bhutan. *Journal of Environmental Management*, 148, 91-100.

- Goyenola, G. 2007. Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos. *RED MAPSA*.
- Grimm, A.M. 2011. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(4), 537-554.
- Grondona, M.O., Magrin, G.O., Travasso, M. I., Moschini, R.C., Rodríguez, G.R., Messina, C.D., Boullón, D.R., Podestá, G. y Jones, J.W. 1997. Impacto del fenómeno El Niño sobre la producción de trigo y maíz en la región pampeana argentina. En: *Workshop and Conference on the 1997-98 El Niño: Impacts and Potential Applications of Climate Prediction in Southeast South America*, Montevideo, Uruguay.
- Grondona, S., Sagua, M., Massone, H. y Miglioranza, K. 2015. Evaluación de la vulnerabilidad social asociada al consumo de agua subterránea en la cuenca del río Quequén Grande, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 31(4), 351-359.
- Guerschman, J.P., Paruelo, J.M., Bella, C.D., Giallorenzi, M.C. y Pacin, F. 2003. Land cover classification in the Argentine Pampas using multi-temporal Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*, 24(17), 3381-3402.
- Guo, H., Xu, M., y Hu, Q. 2011. Changes in near-surface wind speed in China: 1969–2005. *International Journal of Climatology*, 31(3), 349-358.
- Hamilton, D.P., Carey, C.C., Arvola, L., Arzberger, P., Brewer, C., Cole, J.J. y Kratz, T. K. 2015. A Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON) for synthesising high-frequency sensor data for validation of deterministic ecological models. *Inland Waters*, 5(1), 49-56.
- Hammer, U.T. 1986. Saline lake ecosystems of the world. Springer Science and Business Media.
- He, Y., Ye, J. y Yang, X. 2015. Analysis of the spatio-temporal patterns of dry and wet conditions in the Huai River Basin using the standardized precipitation index. *Atmospheric Research*, 166, 120-128.
- Heit, M.L. 2014. Producto turístico pesca en temporada baja en el partido de Monte Hermoso. Tesis de Licenciatura en Turismo, Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, 88 p.
- Hernández Sampieri, R. 2003. Metodología de la Investigación. Santiago de Chile, Chile: Ed. Mc Graw-Hill.
- Holzman, M.E., Rivas, R. y Piccolo, M.C. 2014. Estimating soil moisture and the relationship with crop yield using surface temperature and vegetation index. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 28, 181-192.
- Houghton, R.A. 1993. Is carbon accumulating in the northern temperate zone?. *Global Biogeochemical Cycles*, 7(3), 611-617.
- Houghton, D.D. 2002. *Introduction to climate change: Lecture notes for meteorologists*. WMO-No. 926.

- Huamantincó Cisneros, M.A., Fornerón, C.F., Piccolo, M.C. y Perillo, G.M.E. 2011a. Análisis de tormentas en dos ambientes acuáticos durante el invierno de 2009 (Partido de Monte Hermoso, Argentina). *Revista Geográfica*, 149, 9-21.
- Huamantincó Cisneros, M.A. y Piccolo, M.C. 2011b. Caracterización de la brisa de mar en el balneario de Monte Hermoso, Argentina. *Estudios Geográficos*, 72(271), 461-475.
- Huamantincó Cisneros, M.A. 2012. Efecto de la variabilidad climática del balneario Monte Hermoso sobre su geomorfología costera y el confort climático. Tesis de Doctor en Geografía, Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Argentina, 262 p.
- Huete, A.R. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309.
- Hutchinson, E. 1957. *A treatise of Limnology. Geography, physics and chemistry*. New York. 1015 p.
- IPCC. Panel Intergubernamental de Cambio Climático. 2013. Climate change 2013: The physical science basis. En: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (Eds.), *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: Cambridge, UK, and New York, USA, 1535 p.
- Isla, F. I., 1998. Holocene coastal evolution of Buenos Aires. *Quaternary of South America y Antarctic Peninsula*. 11, 297- 21.
- Isla, F.I., Cortizo, L. y Orellano Turno, H. 2001. Dinámica y Evolución de las Barreras Medanosas, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Brasileira de Geomorfología*, 2, (1): 73-83.
- Izaguirre, I., Allende, L., Escaray, R., Bustingorry, J., Pérez, G. y Tell, G. 2012. Comparison of morpho-functional phytoplankton classifications in human-impacted shallow lakes with different stable states. *Hydrobiologia*, 698(1), 203-216.
- Jennings, E., Jones, S., Arvola, L., Staehr, P. A., Gaiser, E., Jones, I. D. y De Eyto, E. 2012. Effects of weather-related episodic events in lakes: an analysis based on high- frequency data. *Freshwater Biology*, 57, 589-601.
- Jeppesen, E., Brucet, S., Naselli-Flores, L., Papastergiadou, E., Stefanidis, K., Noges, T. y Bucak, T. 2015. Ecological impacts of global warming and water abstraction on lakes and reservoirs due to changes in water level and related changes in salinity. *Hydrobiologia*, 750(1), 201-227.
- Jia, K., Wei, X., Gu, Y., Yao, X., Xie, X. y Li, B. 2014. Land cover classification using Landsat 8 operational land imager data in Beijing, China. *Geocarto International*, 29(8), 941-951.
- Jiménez-Muñoz, J.C., Cristóbal, J., Sobrino, J.A., Sòria, G., Ninyerola, M. y Pons, X. 2009. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 47(1), 339-349.

- Jing, X., Yao, W.Q., Wang, J.H. y Song, X. Y. 2011. A study on the relationship between dynamic change of vegetation coverage and precipitation in Beijing's mountainous areas during the last 20 years. *Mathematical and Computer Modelling*, 54, 1079-1085.
- Juárez, R., Crettaz Minaglia, M.C., Aguer, I., Juárez, I., Gianello, D., Ávila, E. y Roldán, C. 2016. Aplicación de índices bióticos de calidad de agua en cuatro arroyos de la cuenca del río Gualeguaychú (entre Ríos, Argentina). *Intropica*, 11, 35-46.
- Kendall, M.G. 1948. Rank correlation methods. Griffin, London.
- Khoi, D.N. y Suetsugi, T. 2014. The responses of hydrological processes and sediment yield to land-use and climate change in the Be River Catchment, Vietnam. *Hydrological Processes*, 28(3), 640-652.
- Kim, J. y Paik, K. 2015. Recent recovery of surface wind speed after decadal decrease: a focus on South Korea. *Climate dynamics*, 45 (5-6), 1699-1712.
- Kirnbauer, R., Blöschl, G., Haas, P., Müller, G. y Merz, B. 2005. Identifying space-time patterns of runoff generation: A case study from the Löhnersbach catchment, Austrian Alps. Huber, U., Bugmann, H., and Reasoner, M (Eds). En: *Global Change and Mountain Regions*. Springer, Dordrecht, 309-320.
- Klug, J.L., Richardson, D.C., Ewing, H.A., Hargreaves, B.R., Samal, N.R., Vachon, D. y Weathers, K.C. 2012. Ecosystem effects of a tropical cyclone on a network of lakes in northeastern North America. *Environmental Science & Technology*, 46(21), 11693-11701.
- Kolios, S. y Stylios, C.D. 2013. Identification of land cover/land use changes in the greater area of the Preveza peninsula in Greece using Landsat satellite data. *Applied Geography*, 40, 150–160.
- Kopprio, G. A. 2014. Hidrología, química y dinámica planctónica de la laguna Chasicó (provincia de Buenos Aires, Argentina). Tesis de Doctor en Biología, Departamento de Biología, Farmacia y Bioquímica, Universidad Nacional del Sur, Argentina.
- Kruse, E., Laurencena, P.C., Deluchi, M., Varela, L.B., Albina, L.C. y Rosales, E. 2003. Relación hidroquímica superficial-subterránea en cuencas de llanura. In *III Congreso de Hidrogeología, I Seminario Hispano-Latinoamericano sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea*.
- Kumar, D. y Chatterjee, K. 2016. A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 55, 957-970.
- Laas, A., Nöges, P., Köiv, T. y Nöges, T. 2012. High-frequency metabolism study in a large and shallow temperate lake reveals seasonal switching between net autotrophy and net heterotrophy. *Hydrobiologia*, 694, 57–74.
- La Nueva Provincia (25/9/2012). Temen que haya extracción ilegal de agua en la laguna Sauce Grande. Recuperado de: www.lanueva.com (Fecha de consulta, 3 de Marzo de 2019).

- Liu, H.Q. y Huete, A. 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2), 457-465.
- Lobell, D.B. 2013. The use of satellite data for crop yield gap analysis. *Field Crops Research*, 143, 56-64.
- López Cazorla A., Durán, W. y Tejera, L. 2003. Alimentación de la ictiofauna del Río Sauce Grande, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Biología Acuática*, 20, 73-79.
- Luque, J.A., Paoloni, J.D. y Bonorino, G. A. 1979. Estudio hidrológico e hidrogeológico de la cuenca del Río Sauce Grande. *Serie Hidrológica N° 3*. Universidad Nacional del Sur. 64 pp.
- Magrin, G.O., Travasso M.I. y Rodríguez G.R. 2005. Changes in climate and crop production during the 20th century in Argentina. *Climatic Change*, 72, 229-249.
- Manandhar, R., Odeh, I. y Ancev, T. 2009. Improving the accuracy of land use and land cover classification of Landsat data using post-classification enhancement. *Remote Sensing*, 1(3), 330-344.
- Mann, H.B. 1945. Non-parametric tests against trend. *Econometrika*, 13, 245-259.
- Marino, B.M., Piccolo, M.C. y Thomas, L.P. 2005. Detección de Frentes de brisa marina en la costa bonaerense. En: *Actas IX Congreso Argentino de Meteorología CONGREGMET*, 1-10.
- Marker, A.F. 1980. Methanol and acetone as solvents for estimating chlorophyll a and phaeopigments by spectrophotometry. *Archiv für Hydrobiologie. Beihefte. Ergebnisse der Limnologie*, 14, 52-69.
- Martínez, V.J.B. 2015. Análisis del ordenamiento territorial de las cuencas hidrográficas, desde la perspectiva del desarrollo sostenible. *Revista Faccea*, 5(2), 146-159.
- Martínez Valdés, Y. y Villalejo García, V.M. 2018. La gestión integrada de los recursos hídricos: una necesidad de estos tiempos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1), 58-72.
- McFeeters, S.K. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432.
- McVicar, T.R., Van Niel, T.G., Li, L.T., Roderick, M.L., Rayner, D.P., Ricciardulli, L. y Donohue, R.J. 2008. Wind speed climatology and trends for Australia, 1975–2006: Capturing the stilling phenomenon and comparison with near-surface reanalysis output. *Geophysical Research Letters*, 35(20), 1-6.
- Melo, W.D. 2004. Génesis del estuario de Bahía Blanca: Relación morfodinámica y temporal con su cuenca hidrográfica. Tesis de Doctor en Geografía, Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Argentina, 238 p.
- Mendoza Cariño, M., Bautista Olivas, A. L., Quevedo Nolasco, A., y Mendoza Cariño, D. 2018. Análisis hidrológico de largo plazo en la cuenca del río Metztlán Hidalgo, México, y su relación con el cambio climático. *Hidrobiológica*, 28(1), 17-30.

- Mianzan, H.W. y Zamponi, M.O. 1988. Estudio bioecológico de *Olindias sambaquiensis* Müller, 1861 (Limnomedusae, Olindiidae) en el área de Monte Hermoso, II. Factores meteorológicos que influyen en su aparición. *Iheringia*, 2, 63-68.
- Mohamed, I., Othman, F., Ibrahim, A.I., Alaa-Eldin, M.E. y Yunus, R. M. 2015. Assessment of water quality parameters using multivariate analysis for Klang River basin, Malaysia. *Environmental monitoring and assessment*, 187(1), 4182.
- Molina-Navarro, E., Trolle, D., Martínez-Pérez, S., Sastre-Merlín, A. y Jeppesen, E. 2014. Hydrological and water quality impact assessment of a Mediterranean limno-reservoir under climate change and land use management scenarios. *Journal of Hydrology*, 509, 354-366.
- Monserud, R.A. y Leemans, R. 1992. Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic. *Ecological Modelling*, 62(4), 275-293.
- Morábito, J., Salatino, S., Medina, R., Zimmermann, M., Filippini, M. F., Bermejillo, A. y Genovese, D. 2005. Calidad del agua en el área regadía del río Mendoza (Argentina). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 37(1), 1-23.
- Moraetis, D., Efstathiou, D., Stamati, F., Tzoraki, O., Nikolaidis, N.P., Schnoor, J.L. y Vozinakis, K. 2010. High-frequency monitoring for the identification of hydrological and bio-geochemical processes in a Mediterranean river basin. *Journal of Hydrology*, 389(1-2), 127-136.
- Moraña, L.B. 2013. Fitoplancton de ríos y arroyos de la Alta Cuenca del Río Bermejo, Argentina. *Lhawet*, 2(1), 15-21.
- Mueller, N., Lewis, A., Roberts, D., Ring, S., Melrose, R., Sixsmith, J. y Ip, A. 2016. Water observations from space: Mapping surface water from 25 years of Landsat imagery across Australia. *Remote Sensing of Environment*, 174, 341-352.
- Mulenga, B.P., Wineman, A. y Sitko, N.J. 2017. Climate trends and farmers' perceptions of climate change in Zambia. *Environmental Management*, 59(2), 291-306.
- Mushore, T.D., Mutanga, O., Odindi, J. y Dube, T. 2017. Assessing the potential of integrated Landsat 8 thermal bands, with the traditional reflective bands and derived vegetation indices in classifying urban landscapes. *Geocarto International*, 32(8), 886-899.
- Niraula, R.R., Gilani, H., Pokharel, B.K. y Qamer, F.M. 2013. Measuring impacts of community forestry program through repeat photography and satellite remote sensing in the Dolakha district of Nepal. *Journal of Environmental Management*, 126, 20-29.
- Nguyen, A.K., Liou, Y.A., Li, M.H. y Tran, T.A. 2016. Zoning eco-environmental vulnerability for environmental management and protection. *Ecological Indicators*, 69, 100-117.
- Oberg, K. y Mueller, D.S. 2007. Validation of streamflow measurements made with acoustic Doppler current profilers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(12), 1421-1432.

- OCDE. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. 1982. Valores límites de la OCDE para un sistema abierto de clasificación trófica. En: Ryding, S. O., Rast, W (Eds.), *El control de la eutrofización en lagos y pantanos*. Madrid, España: Ediciones Pirámide.
- Orioli, G., Sabbatini, M., Marchena, J. y Vazquez, R. 2008. The impact of agricultural land use on stream chemistry and inputs to an inland reservoir: case of the Sauce Grande River, Argentina. *Hydrological Sciences Journal*, 53(4), 834-843.
- Osuna-Osuna, A.K., Díaz-Torres, J.D.J., De Anda-Sánchez, J., Villegas-García, E., Gallardo-Valdez, J. y Davila-Vazquez, G. 2015. Evaluación de cambio de cobertura vegetal y uso de suelo en la cuenca del río Tecolutla, Veracruz, México; periodo 1994-2010. *Ambiente & Agua-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 10(2), 350-362.
- O'farrell, I. 1992. Fitoplancton de sistemas lóticos de llanura. Río Salado (Buenos Aires) y tributarios inferiores del río Uruguay. Tesis de Doctor en Biología, Departamento de Ciencias Biológicas, Universidad de Buenos Aires, Argentina, 171 p.
- Outram, F.N., Lloyd, C.E.M., Jonczyk, J., Benskin, C.M., Grant, F., Perks, M.T. y Haygarth, P.M. 2014. High-frequency monitoring of nitrogen and phosphorus response in three rural catchments to the end of the 2011–2012 drought in England. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(9), 3429-3448.
- Padilla, A.M.G. 2016. Demanda hídrica y calidad de agua de uso agrícola de la cuenca del río Jequetepeque, Perú. *REBIOL*, 35(2), 5-18.
- Pal, S. y Ziaul, S. 2017. Detection of land use and land cover change and land surface temperature in English Bazar urban centre. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 20(1), 125–145.
- Palmer, M.A., Reidy Liermann, C.A., Nilsson, C., Flörke, M., Alcamo, J., Lake, P.S. y Bond, N. 2008. Climate change and the world's river basins: anticipating management options. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6(2), 81-89.
- Paoloni, J. D., Tujchneider, O.C. y Luque, J.A. 1972. Caracterización hidrológica de la cuenca del Río Sauce Grande en primera fase. *Revista de Investigaciones Agropecuarias INTA*, 5, 20.
- Paruelo, J.M., Guerschman, J.P., Piñeiro, G., Jobbagy, E.G., Verón, S.R., Baldi, G. y Baeza, S. 2006. Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia*, 10(2), 47-61.
- Pekel, J.F., Cottam, A., Gorelick, N. y Belward, A.S. 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540, 418-422.
- Penalba, O.C. y Robledo, F.A. 2010. Spatial and temporal variability of the frequency of extreme daily rainfall regime in the La Plata Basin during the 20th century. *Climatic Change*, 98(3-4), 531-550.
- Peña Cortés, F., Escalona Ulloa, M., Pincheira Ulbrich, J. y Rebolledo, G. 2011. Cambio de uso del suelo en los geosistemas de la cuenca costera del río Boroa (Chile) entre 1994 y 2004. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo*, 43(2), 1-20.

- Pérez-Collazo, C., Greaves, D., y Iglesias, G. 2015. A review of combined wave and offshore wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 141-153.
- Pinto, J.O., Parsons, D.B., Brown, W.O.J., Cohn, S., Chamberlain, N. y Morley, B. 2006. Coevolution of down-valley flow and the nocturnal boundary layer in complex terrain. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45(10), 1429-1449.
- Plisnier, P.D., Nshombo, M., Mgana, H. y Ntakimazi, G. 2018. Monitoring climate change and anthropogenic pressure at Lake Tanganyika. *Journal of Great Lakes Research*, 44(6), 1194-1208.
- Pohlert, T. 2017. Trend: non-parametric trend tests and change-point detection. 2016. *R package version 0.2.0*.
- Porter, J.H., Nagy, E., Kratz, T.K., Hanson, P., Collins, S.L. y Arzberger, P. 2009. New eyes on the world: advanced sensors for ecology. *BioScience*, 59, 385-397.
- Pringle, M.J., Schmidt, M. y Muir, J.S. 2009. Geostatistical interpolation of SLC-off Landsat ETM plus images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 654-664.
- Poulier, G., Launay, M., Le Bescond, C., Thollet, F., Coquery, M. y Le Coz, J. 2019. Combining flux monitoring and data reconstruction to establish annual budgets of suspended particulate matter, mercury and PCB in the Rhône River from Lake Geneva to the Mediterranean Sea. *Science of the Total Environment*, 658, 457-473.
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H. y Sorooshian, S. 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48(2), 119-126.
- Quirós, R., Rosso, J.J., Renella, A., Sosnovsky, A. y Boveri, M. 2002. Análisis del estado trófico de las lagunas pampeanas (Argentina). *Interciencia*, 27(11), 584-591.
- Quirós, R., Boveri, M.B., Petracchi, C.A., Rennella, A.M., Rosso, J.J., Sosnovsky, A. y Von Bernard, H.T. 2006. Los efectos de la agriculturización del humedal pampeano sobre la eutrofización de sus lagunas. Tundizi, J.G., Matsumura-Tundisi, T. y Sidagis Galli, C (Eds). En: *Eutrofização na América do Sul: Causas, conseqüências e tecnologias de gerenciamento e controle*, 1-16.
- Quiroz Londoño, O.M., Grondona, S.I., Massone, H.E., Farenga, M., Martínez, G. y Martínez, D.E. 2013. Modelo de anegamiento y estrategia de predicción-prevencción del riesgo de inundación en áreas de llanura: el sudeste de la provincia de Buenos Aires como caso de estudio. *Geofocus*, (13)1, 76-98.
- Rabassa, J. 1982. Variación regional y significado geomorfológico de la densidad de drenaje en la cuenca del río Sauce Grande, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 37(3), 268-284.
- Rafart, V., Marcos, E.C. y Berri, G.J. 2017. Aplicación de un modelo de capa límite al estudio de la circulación atmosférica en capas bajas sobre la región del Río de La Plata. En: *XXVIII Reunión Científica de la AAGG y III Simposio sobre Inversión y Procesamiento de Señales en Exploración Sísmica*, La Plata, Argentina, 143-146.

- Rawat, J.S. y Kumar, M. 2015. Monitoring land use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhand, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18 (1), 77-84.
- Re, M. y Barros, V.R. 2009. Extreme rainfalls in se South America. *Climatic Change*, 96(1-2), 119-136.
- Remes Lenicov M. y Colautti D., 2003. Estudio de la laguna Sauce Grande (Pdo. De Monte Hermoso). Campaña de relevamientos limnológicos e ictiológicos Informe Técnico N° 55. Ministerio de Asuntos Agrarios. 20 p.
- Reyes H.H., Aguilar, R.M., Aguirre, R.J. y Trejo, V.I. 2006. Cambio en la cubierta vegetal y uso del suelo en el área del proyecto Pujal-Coy, San Luis potosí, México, 1973-2000. *Investigaciones Geográficas*, 2006, 59, 26-42.
- Robinson, N., Allred, B., Jones, M., Moreno, A., Kimball, J., Naugle, D. y Richardson, A. 2017. A Dynamic Landsat Derived Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Product for the Conterminous United States. *Remote Sensing*, 9(8), 863.
- Rodríguez- Rogan, M.L., Taboada-Castro, M.M., Palleiro-Suárez, L. y Taboada-Castro, M.T. 2010. Efecto de la escorrentía sobre la carga de sedimentos en suspensión y fósforo en un arroyo de cabecera de una cuenca rural (NO España). *Revista de Ciências Agrárias*, 33(1), 329-337.
- Rodriguez-Galiano, V.F. y Chica-Rivas, M. 2014. Evaluation of different machine learning methods for land cover mapping of a Mediterranean area using multi-seasonal Landsat images and Digital Terrain Models. *International Journal of Digital Earth*, 7(6), 492-509.
- Rogan, J., Miller, J., Stow, D., Franklin, J., Levien, L. y Fischer, C.2003. Land-cover change monitoring with classification trees using Landsat TM and ancillary data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(7), 793-804.
- Rolla, A.L., Nuñez, M.N., Guevara, E.R., Meira, S.G., Rodriguez, G.R. y de Zárate, M.I.O. 2018. Climate impacts on crop yields in Central Argentina. Adaptation strategies. *Agricultural Systems*, 160, 44-59.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. y Deering, D.W. 1974. *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. Texas University: Texas.
- Saadat, H., Adamowski, J., Bonnell, R., Sharifi, F., Namdar, M. y Ale-Ebrahim, S. 2011. Land use and land cover classification over a large area in Iran based on single date analysis of satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(5), 608-619.
- Sala, O.E. y Paruelo, J.M. 1997. Ecosystem services in grasslands. *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems*, 237-251.
- Saleh, A.M., Belal, A.B. y Mohamed, E.S. 2015. Land resources assessment of El-Galaba basin, South Egypt for the potentiality of agriculture expansion using remote sensing and GIS techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(1), S19-S30.

- Schroeder, T.A., Cohen, W.B., Song, C., Canty, M.J. y Yang, Z. 2006. Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon. *Remote Sensing of Environment*, 103(1), 16-26.
- Schulz, J.J., Cayuela, L., Echeverria, C., Salas, J. y Benayas, J.M.R. 2010. Monitoring land cover change of the dryland forest landscape of Central Chile (1975–2008). *Applied Geography*, 30(3), 436-447.
- Scordo, F. 2018a. Dinámica integral de los recursos hídricos de la cuenca del río Senguer. Tesis de Doctor en Geografía, Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Argentina, 216 p.
- Scordo, F., Piccolo, M.C. y Perillo, G.M.E. 2018b. Aplicación del Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizada (SPEI) para identificar períodos húmedos y secos en la Patagonia Andina y Extra Andina Argentina. *Geociências*, 37(2), 423-436.
- Seeboonruang, U. 2012. A statistical assessment of the impact of land uses on surface water quality indexes. *Journal of Environmental Management*, 101,134-142.
- Seitz, C. 2018. Evolución geológica, geomorfológica y limnológica de lagunas pampeanas en el suroeste bonaerense. Tesis de Doctor en Geología, Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, Argentina, 248 p.
- Sen, P.K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63 (324), 1379-1389.
- Senisterra, G.E., Gaspari, F.J. y Delgado, M. I. 2015. Zonificación de la vulnerabilidad ambiental en una cuenca serrana rural. Argentina. *Environmental Studies Journal*, 3(1), 38-58.
- Shao, C., Chen, J., Stepien, C. A., Chu, H., Ouyang, Z., Bridgeman, T.B. y John, R. 2015. Diurnal to annual changes in latent, sensible heat, and CO₂ fluxes over a Laurentian Great Lake: A case study in Western Lake Erie. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120(8), 1587-1604.
- Shao, H., Liu, M., Shao, Q., Sun, X., Wu, J., Xiang, Z. y Yang, W. 2014. Research on eco-environmental vulnerability evaluation of the Anning River Basin in the upper reaches of the Yangtze River. *Environmental Earth Sciences*, 72(5), 1555-1568.
- Sheng, T.C. 1992. Manual de campo para la ordenación de cuencas hidrográficas. *Estudio y planificación de cuencas hidrográficas. Guía FAO Conservación*, 13(6), 185 p.
- Shrestha, A.B., Bajracharya, S.R., Sharma, A.R., Duo, C. y Kulkarni, A. 2017. Observed trends and changes in daily temperature and precipitation extremes over the Koshi river basin 1975–2010. *International Journal of Climatology*, 37(2), 1066-1083.
- Skarbøvik, E., Perovic, A., Shumka, S. y Nagothu, S.U. 2014. Nutrient inputs, trophic status and water management challenges in the transboundary Lake Skadar/Shkodra, Western Balkans. *Archives of Biological Sciences*, 66, 667-81.
- Smits, P.C., Dellepiane, S.G. y Schowengerdt, R. A. 1999. Quality assessment of image classification algorithms for land-cover mapping: A review and a proposal

- for a cost-based approach. *International Journal of Remote Sensing*, 20(8), 1461-1486.
- Smith, P. y Olesen, J.E. 2010. Synergies between the mitigation of, and adaptation to, climate change in agriculture. *The Journal of Agricultural Science*, 148(5), 543-552.
- Smith, R. L. y Smith, T. M. 2001. *Ecología*. Ed. Addison Wesley, Madrid, 639 p.
- Solomon, C.T., Bruesewitz, D.A., Richardson, D.C., Rose, K.C., Van de Bogert, M.C., Hanson, P.C. y Chiu, C.Y. 2013. Ecosystem respiration: drivers of daily variability and background respiration in lakes around the globe. *Limnology and Oceanography*, 58, 849-866.
- Song, D.X., Huang, C., Sexton, J.O., Channan, S., Feng, M. y Townshend, J.R. 2015. Use of Landsat and Corona data for mapping forest cover change from the mid-1960s to 2000s: Case studies from the Eastern United States and Central Brazil. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103, 81-92.
- Sosnovsky, A. y Quirós, R. 2006. El estado trófico de las pequeñas lagunas pampeanas. Su relación con la hidrología y la intensidad del uso de la tierra. *Ecología Austral*, 16,115-124.
- Staehr, P.A., Bade, D., Van de Bogert, M.C., Koch, G.R., Williamson, C., Hanson, P. y Kratz, T. 2010. Lake metabolism and the diel oxygen technique: state of the science. *Limnology and Oceanography: Methods*, 8(11), 628-644.
- Suñer, L.G. y Galantini, J.A. 2012. Fertilización fosforada en suelos cultivados con trigo de la región sudoeste pampeana. *Ciencia del suelo*, 30(1), 57-66.
- Szantoi, Z., Escobedo, F., Abd-Elrahman, A., Smith, S. y Pearlstine, L. 2013. Analyzing fine-scale wetland composition using high resolution imagery and texture features. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23, 204-212.
- Thomas, M.K., Fontana, S., Reyes, M., Kehoe, M. y Pomati, F. 2018. The predictability of a lake phytoplankton community, over time-scales of hours to years. *Ecology letters*, 21(5), 619-628.
- Torti, J. y Andriulo, A. 2014. Dinámica espacial y temporal de fracciones de fósforo y nitrógeno en el arroyo Pergamino (Buenos Aires, Argentina). *II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*, Santa Fe, 1-10.
- Tulbure, M.G. y Broich, M. 2013. Spatiotemporal dynamic of surface water bodies using landsat time-series data from 1999 to 2011. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 79, 44-52.
- Tumini Ercoli, L. 2017. Turismo en el espacio rural: puesta en valor del camino de la Soberana, partido de Coronel Dorrego. Tesis de Licenciatura en Turismo, Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, 82 p.
- Van de Bogert, M.C., Carpenter, S.R., Cole, J.J. y Pace, M.L. 2007. Assessing pelagic and benthic metabolism using free water measurements. *Limnology and Oceanography: Methods*, 5(5), 145-155.

- van der Wiel, K., Gille, S.T., Smith, S.G.L., Linden, P.F. y Cenedese, C. 2017. Characteristics of colliding sea breeze gravity current fronts: a laboratory study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143(704), 1434-1441.
- Varela, P.A. 1982. Un estudio de la brisa de mar en Monte Hermoso e Ingeniero White. *Revista Geofísica*, 17, 73-85.
- Verchot, L.V., Van Noordwijk, M., Kandji, S., Tomich, T., Ong, C., Albrecht, A. y Palm, C. 2007. Climate change: linking adaptation and mitigation through agroforestry. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 12(5), 901-918.
- Vitousek, P.M., Mooney, H.A., Lubchenco, J. y Melillo, J.M. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277(5325), 494-499.
- Volante, J.N. 2014. Dinámica y consecuencias del cambio en la cobertura y el uso del suelo en el Chaco Semi-Árido. Tesis de Doctor, Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias, Argentina, 194 p.
- Volonté, A. 2018. Geomorfología fluvial aplicada al peligro de crecidas: cuenca del arroyo San Bernardo, sistema de Ventania, Argentina. Tesis de Doctor en Geografía, Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Argentina, 182 p.
- Vorosmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S.E., Sullivan, C.A., Reidy Liermann, C. y Davies, P.M. 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467, 555–561.
- Vouilloud, A.A., Sala, S.E. y Sabbatini, M.R. 2005 Diatomeas perifíticas de la cuenca del Río Sauce Grande (Buenos Aires, Argentina). *Iheringia, Série Botânica*, 60 (1), 77-89.
- Wang, Y., Gao, Y., Qin, H., Huang, J., Liu, C., Hu, C. y Lee, X. 2017. Spatiotemporal Characteristics of Lake Breezes over Lake Taihu, China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(7), 2053-2065.
- Wang, R., Kalin, L., Kuang, W. y Tian, H. 2014. Individual and combined effects of land use/cover and climate change on Wolf Bay watershed streamflow in southern Alabama. *Hydrological Processes*, 28(22), 5530-5546.
- Ward, J.H. 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal American Statistical Association*, 58, 236-244.
- Wentworth, G.R., Murphy, J.G. y Sills, D.M.L. 2015. Impact of lake breezes on ozone and nitrogen oxides in the Greater Toronto Area. *Atmospheric Environment*, 109, 52-60.
- Westra, S., Alexander, L.V. y Zwiers, F.W. 2013. Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. *Journal of Climate*, 26 (11), 3904-3918.
- Wetzel, R.G. 2001. Limnology Lake and River Ecosystems. Academic Press, San Diego, CA; Comprehensive Series in Photosciences. US European Society for Photobiology, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 1006 p.

- Williamson, C.E., Saros, J. E., Vincent, W.F., Smol, J.P. 2009. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. *Limnology and Oceanography*, 54(6), 2273-2282.
- Wilson, E.H. y Sader, S.A. 2002. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*, 80(3), 385–396.
- Worku, G., Teferi, E., Bantider, A. y Dile, Y.T. 2019. Observed changes in extremes of daily rainfall and temperature in Jemma Sub-Basin, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(3-4), 839-854.
- Wu, Z., Wang, X., Chen, Y., Cai, Y. y Deng, J. 2018. Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China. *Science of the Total Environment*, 612, 914-922.
- Wüest, A y Lorke, A. 2003. Small-scale hydrodynamics in lakes. *Annual Review of fluid mechanics*, 35(1), 373-412.
- Wurts, W. A. y Durborow, R. M. 1992. Interactions of pH, carbon dioxide, alkalinity and hardness in fish ponds, 464, 1-3.
- Xiuwan, C. 2002. Using remote sensing and GIS to analyse land cover change and its impacts on regional sustainable development. *International Journal of Remote Sensing*, 23(1), 107-124.
- Yang, D., Shi, X. y Marsh, P. 2015. Variability and extreme of Mackenzie River daily discharge during 1973–2011. *Quaternary International*, 380, 159-168.
- Zabaleta, A. y Antigüedad, I. 2013. Streamflow response of a small forested catchment on different timescales. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(1), 211-223.
- Zhang, K.C., Qu, J.J., Niu, Q.H., Jing, Z.F. y An, Z.S. 2013. Characteristics of wind-blown sand in the region of the Crescent Moon Spring of Dunhuang, China. *Environmental Earth Sciences*, 70(7), 3107-3113.
- Zhang, Y., You, Q., Lin, H. y Chen, C. 2015. Analysis of dry/wet conditions in the Gan River Basin, China, and their association with large-scale atmospheric circulation. *Global and Planetary Change*, 133, 309-317.
- Zhang, L., Zhu, B., Gao, J. y Kang, H. 2017. Impact of Taihu Lake on city ozone in the Yangtze River Delta. *Advances in Atmospheric Sciences*, 34(2), 226-234.
- Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Cheng, Y., Zhang, M., Liu, X. y Gong, P. 2019. Long-Term Land Cover Dynamics (1986–2016) of Northeast China Derived from a Multi-Temporal Landsat Archive. *Remote Sensing*, 11(5), 599.
- Zhao, X y Liu, Y. 2018. Variability of surface heat fluxes and its driving forces at different time scales over a large ephemeral lake in China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(10), 4939-4957.
- Zilio, M.I., Seitz, C., Scordo, F., Gil, V., Zapperi, P., Costilla, P., Huamantincó Cisneros, M.A., Perillo, G.M.E. y Piccolo, M.C. 2019. Is collaborative management always possible? the case of Sauce Grande River Basin, Argentina. *International Journal of River Basin Management*, 17(2), 251-261.

- Zimmer, M.A., Pellerin, B., Burns, D.A. y Petrochenkov, G. 2019. Temporal Variability in Nitrate-Discharge Relationships in Large Rivers as Revealed by High-Frequency Data. *Water Resources Research*, 55(2), 973-989.
- Zubillaga, J.V. y Piccolo, M.C. 1977a. Características más importantes de las brisas de mar y tierra en la zona del Cabo San Antonio y alrededores. *Meteorológica*, VIII-IX, 121-130.
- Zubillaga, J.V. y Piccolo, M.C. 1977b. Climatología de las brisas de mar y tierra en la zona del Cabo San Antonio y alrededores. *Meteorológica*, VIII-IX, 157-166.
- Zubillaga, J. V. y Piccolo, M.C. 1977c. Una serie de observaciones de la brisa de mar en Pinamar y alrededores. *Meteorológica*, VIII-IX, 227-236.
- Zunino, J. 2018. Lagunas someras como ecosistemas centinelas de la variabilidad climática: respuesta de las comunidades fitoplanctónicas. Tesis de Doctor en Biología, Departamento de Biología, Bioquímica y Farmacia, Universidad Nacional del Sur, Argentina, 185 p.

ANEXO 1: ENCUESTA

La presente encuesta tiene como objetivo recopilar información multitemporal sobre las coberturas del suelo de la cuenca del río Sauce Grande. Los datos recopilados serán utilizados para la elaboración de la tesis doctoral de la Lic. Andrea Soledad Brendel en la Universidad Nacional del Sur bajo la dirección de la Dra. María Cintia Piccolo y el Dr. Gerardo Miguel Eduardo Perillo. Las preguntas son confidenciales.

1. Localización del establecimiento rural: Latitud: _____ Longitud: _____
2. Unidad geomorfológica donde se encuentra la explotación agrícola: médano, afloramiento o llanura.
3. ¿Cuál es el tamaño de la explotación?
 - a) 0-200 ha
 - b) 201-500 ha
 - c) 501 a 1000 ha
 - d) más de 1000 ha
4. ¿Qué tipo de cultivo realiza? ¿Y en qué porcentaje? Indique la fecha de siembra y de cosecha aproximada de cada uno.

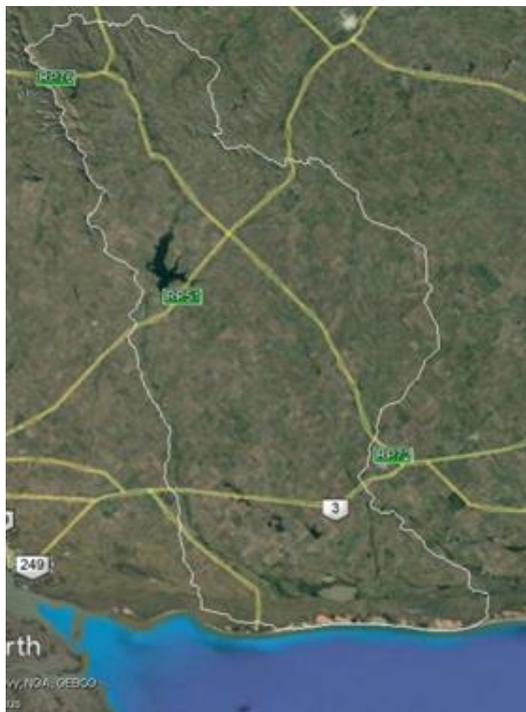
	Cultivo de invierno	Cultivo de verano	Pasturas
%			
Fecha siembra			
Fecha cosecha			-----

5. ¿Cuál fue el porcentaje y hectáreas (aproximado) que usted realizó de cultivos de invierno, de verano y pasturas en los años 2001, 2003, 2005, 2009, 2014 y 2016?.

%	Cultivo de invierno	Cultivo de verano	Pasturas	Hectáreas
2001				
2003				
2005				
2009				
2014				
2016				

6. Visualizando la imagen de Google Earth que le presento a continuación, indique uno o varios lotes donde usted haya realizado cultivos de invierno, de verano y pasturas en los años 2001, 2003, 2005, 2009, 2014 y 2016.

Lote "x". Latitud: _____ Longitud: _____ Cobertura: _____



Muchas gracias por su tiempo y predisposición.