



Facultad de
Ciencias Agrarias
y Forestales



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA



Tesis Doctoral en Ciencias Agrarias y Forestales

**Vulnerabilidad hidrológica por el cambio de uso de suelo en la cuenca alta del río Sauce Chico,
provincia de Buenos Aires, Argentina.**

Tesista: Msc. Ing. Adriana Catalina Guzmán Guaraca

Directora:

Dra. Fernanda Julia Gaspari

La Plata, Argentina, 2023.

Dedicatoria:

A mis padres, hermanos y sobrinos que siempre han estado apoyándome y enviándome sus buenas vibras.

A mis amigos y amigas que la vida me ha regalado y se han quedado, formando parte importante de mí.

A todo el personal que conforma el CEIDE y la cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas de la FCAyF.

Agradecimiento

Expreso mi sincero agradecimiento y gratitud a la Dra. Fernanda Gaspari, ya que desde el primer momento que la conocí, me apoyo y compartió sus conocimientos, infinitas gracias, por su constante e importante asesoría.

Un agradecimiento especial al CEIDE, Secretaría de posgrado de la FCyF-UNLP, CIC-PBA, por que creyeron en mí y me dieron la gran oportunidad de desarrollarme y crecer en mi formación profesional.

Al Servicio Meteorológico Nacional, Instituto Nacional de tecnología Agropecuaria INTA Tornquist y a la Municipalidad de Tornquist, por contribuir con información valiosa para que el presente trabajo de tesis llegue a buen término.

A los evaluadores, por tomarse el tiempo necesario y en cada uno de sus comentarios u observaciones, buscar siempre mejorar la calidad del trabajo.

ÍNDICE GENERAL

1. ASPECTOS GENERALES.	10
1.1. Introducción.	10
1.2. Conceptos básicos.	11
1.2.1. Cuenca Hidrográfica.	11
1.2.2. Estudio de vulnerabilidad.	11
1.2.3. Vulnerabilidad.	11
1.2.4. Vulnerabilidad en cuencas hidrográficas.	12
1.2.5. Mapa de vulnerabilidad.	13
1.3. Antecedentes.	13
1.5. Objetivos e Hipótesis.	16
1.5.1. Objetivo General.	16
1.5.2. Objetivos Específicos.	16
1.5.3. Hipótesis de trabajo.	16
2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.	17
2.1. Área de estudio.	17
2.2. Geología.	18
2.3. Clima.	19
2.4. Hidrología.	19
2.5. Topografía y relieve.	21
2.6. Cobertura y/o Uso de suelo.	22
2.6.1. Vegetación Natural.	22
2.6.2. Agricultura.	27
2.6.3. Forestación.	28
2.6.4. Urbanización.	28
2.6.5. Ganadería.	29
2.6.6. Parque provincial Ernesto Tornquist.	30
3. MATERIALES Y MÉTODOS.	31
3.1. Descripción del modelo de vulnerabilidad.	31
3.1.1. Fragilidad.	34
3.1.1.1. Índice morfométrico.	34
3.1.2. Variabilidad pluvial y térmica.	48
3.1.2.1. Anomalía pluvial.	51

3.1.2.2. Anomalía de temperatura.....	52
3.1.2.3. Balance hídrico climático.	54
3.1.3. Uso de suelo.....	60
3.1.3.1. Índice de pérdida de suelo por erosión hídrica superficial.	61
3.1.4. Construcción del índice de vulnerabilidad hidrológica.	66
3.1.4.1. Normalización.....	66
3.2. Comprobación de hipótesis.....	67
3.2.1. Índice de Provisión de Servicios Ecosistémicos (IPSE) como indicador de uso de suelo.	67
3.2.2. Coeficiente de correlación de Pearson (r).....	68
3.2.2.1. Test de significancia del coeficiente de correlación de Pearson.....	68
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	70
4.1. Creación del modelo de vulnerabilidad.	70
4.1.1. Fragilidad.....	70
4.1.1.1. Índice morfométrico.....	70
4.1.2. Variabilidad pluvial y térmica.	76
4.1.2.1. Anomalía pluvial.....	79
4.1.2.2. Anomalía de temperatura.....	85
4.1.2.3. Balance hídrico climático.	89
4.1.3. Uso de suelo.....	101
4.1.3.1. Índice de pérdida de suelo por erosión hídrica superficial.	113
4.1.4. Construcción del índice de vulnerabilidad hidrológica (IVH).....	121
4.2. Comprobación de hipótesis.....	124
4.2.1. Índice de Provisión de Servicios Ecosistémicos (IPSE) como indicador de uso de suelo.	124
4.2.2. Coeficiente de correlación de Pearson (r).....	126
4.2.2.1. Test de significancia del coeficiente de correlación de Pearson (CCP).....	128
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	130
5.1. Conclusiones.....	130
5.2. Recomendaciones.	131
6. BIBLIOGRAFÍA	132

Índice de figuras.

Figura 1. Factores y componentes de la vulnerabilidad hidrológica en una cuenca hidrográfica.	12
Figura 2: Ubicación del área de estudio.....	17
Figura 3. Principales formaciones geológicas del Sistema Serrano Austral de la Provincia de Buenos	18
Figura 4. Mapa Isofreático de CARSCH.	20
Figura 5. Red hidrográfica del Río Sauce Chico.	21
Figura 6. Ambientes terrestres y ubicación de algunas comunidades vegetales de Sierra de la Ventana.	23
Figura 7. Expresión de la Vulnerabilidad hidrológica.	32
Figura 8. Metodología para determinar la vulnerabilidad hidrológica de la CARSCH.....	33
Figura 9. Tiempos característicos en un hidrograma.	44
Figura 10. Diagrama de flujo de la metodología para	48
Figura 11. Localización de las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio.....	49
Figura 12. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).	62
Figura 13. Subcuentas de la cuenca alta del Río Sauce Chico.....	71
Figura 14. Pendiente en porcentaje de la CARSCH.	73
Figura 15. Nivel de priorización de las subcuencas de la CARSCH.	76
Figura 16. Modelo de regresión lineal entre datos observados (Obs.) y satelitales (Es.) de precipitación acumulada mensual en el periodo 1988 - 2018.....	77
Figura 17. Modelo de regresión lineal entre datos observados (Obs.) y satelitales (Es.) de temperatura promedio mensual en el periodo 1988 - 2018.....	78
Figura 18. Valor Modal de precipitación anual, correspondiente al periodo 1988-2018.	80
Figura 19. Inundación por desbordamiento del río Sauce Chico en octubre del año 2014.	82
Figura 20. Anomalía promedio (%) para cada periodo.....	83
Figura 21. Desviación estándar (DS) de la precipitación por periodo.	84
Figura 22. Tendencia de la anomalía de precipitación para el periodo 1988 - 2018.	85
Figura 23. Anomalía térmica para cada periodo en °C.....	87
Figura 24. Desviación estándar (DS) por periodo.	88
Figura 25. Tendencia del Índice de calentamiento global para el periodo 1988 – 2018.	89
Figura 26. Balance hidrológico (mm) del periodo 1988 - 1993.	92
Figura 27. Balance hidrológico (mm) del periodo 1994 - 1999.	94
Figura 28. Balance hidrológico del periodo (mm) 2000 - 2005.	96
Figura 29. Balance hidrológico (mm) del periodo 2006 - 2011.	98
Figura 30. Balance hidrológico (mm) del periodo 2012 - 2018.	100
Figura 31. Evolución del NDVI, para rotación de cultivos forrajeros de invierno y verano (las líneas se corresponden a lotes de referencia de cultivos).....	105
Figura 32. Ejemplo de cultivos de verdeo de verano.....	107
Figura 33. Vista aérea de Villa Serrana La Gruta.	107
Figura 34. Mapa de uso/cobertura de suelos de la campaña 1988-1989.	110
Figura 35. Mapa de uso/cobertura de suelos de la campaña 2005-2006.	111
Figura 36. Mapa de uso/cobertura de suelos de la campaña 2017-2018.	112

Figura 37. Cambios en la superficie de ocupación de la cobertura y/o uso de suelo en el periodo 1988-2018.	113
Figura 38. Factor de erosividad de la lluvia ($R, J \cdot cm \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$) para el periodo 1988 - 2018.	114
Figura 39. Factor de erodabilidad del suelo (K) para el periodo 1988 - 2018.	115
Figura 40. Factor de longitud e inclinación de la pendiente (LS) de la CARSCH.	116
Figura 41. Factor de cultivo (C) para distintos periodos de estudio.	117
Figura 42. Factor de prácticas de manejo conservacionista (P) para distintos periodos de estudio. .	118
Figura 43. Pérdida de suelo (USLE, Mg/ha*año) para distintos periodos de estudio.	120
Figura 44. Porcentaje de ocupación de los diferentes niveles de USLE (Mg/ha*año) para distintos periodos de estudio.	121
Figura 45. Índice de vulnerabilidad hidrológica (VH), para distintos periodos de estudio.	123
Figura 46. Índice de provisión de servicios ecosistémicos, para distintos periodos de estudio.	125
Figura 47. Tendencia del Índice de provisión de servicios ecosistémicos, para el periodo 1988-2018.	126
Figura 48. Coeficiente de correlación de PEARSON (r), para el periodo 1988-2018.	127
Figura 49. t- valor de student para el periodo 1988-2018.	128
Figura 50. Correlación espacial de la pendiente expresada en porcentaje Vs IVH promedio.	129

Resumen

Los recursos hídricos disponibles son limitados y se encuentran distribuidos geográficamente de forma desigual, existiendo regiones que, debido a sus características fisiográficas y clima, presentan baja disponibilidad de agua, ya sea para consumo o desarrollo de actividades productivas. Esto, sumado a la variabilidad climática y cambio de uso de suelo sin una planificación, afecta a la seguridad hídrica. En Argentina, en los últimos años la aparición de fenómenos climáticos provocó que un 30 % del territorio nacional sea declarado en estado de emergencia y/o desastre agropecuario. En el caso del suroeste de la provincia de Buenos Aires, la presencia del sistema serrano influye en la dinámica pluvial generando elevada variabilidad espacial de las precipitaciones. Esta variabilidad sumada a la oscilación temporal propia del clima de la región, que interactúa con suelos poco profundos de elevada pendiente, uso de suelo mayormente agrícola en sitios inadecuados con prácticas de laboreo agresivas, resulta en mayor agresividad de los ciclos húmedos y secos, llegando a producir inundaciones o escasez de agua con la consecuente disminución de cosechas, dificultades de abastecimiento de agua y activación de procesos de desertificación.

En este sentido el presente trabajo de tesis tiene por objetivo analizar la vulnerabilidad hidrológica por el cambio de uso de suelo en la cuenca alta del río Sauce Chico (CARSCH) en el periodo 1988 - 2018. Para lo cual, se empezó por definir el enfoque teórico que conceptualizan a la vulnerabilidad en cuencas hidrográficas y de esta forma proponer un modelo compuesto por índices que describan la fragilidad (índice morfométrico), variabilidad climática (anomalía pluvial e índice de calentamiento global) y uso del suelo (índice de pérdida de suelo USLE). Una vez que se calculó cada uno de los índices y determinó la tendencia, se calculó el índice de vulnerabilidad hidrológica mediante una normalización de sus variables. Finalmente, a través de la hipótesis planteada se estableció el nivel de influencia del cambio de usos de suelo sobre la vulnerabilidad, para ello se tomó como variable independiente e indicador del cambio de uso del suelo al IPSE (índice de provisión de servicios ecosistémicos).

Durante todo el desarrollo de la investigación se integró información proveniente de la teledetección, que es un tipo de tecnología de la información que ofrece cobertura espacial y temporal en el monitoreo de la tierra. A su vez esta información fue corroborada y en algunos casos fusionada con información proveniente de mediciones de campo.

De los resultados obtenidos, el índice de vulnerabilidad propuesto recoge toda la variabilidad expresada al calcular y analizar por separado cada uno de los índices que la conforman. Se determinó que la vulnerabilidad hidrológica se incrementa mientras mayor es la superficie de pendientes abruptas o escarpadas. Si bien el cambio de uso de suelo tiene influencia sobre la vulnerabilidad el factor más determinante es la configuración topográfica. En relación a la variabilidad climática, existe cierta tendencia al incremento de la temperatura ambiente y una disminución de las precipitaciones, que, a pesar de no ser estadísticamente significativas, nos dan un indicio de periodos con años anómalos, cada vez más frecuente.

Abstract

Available water resources are limited and unevenly distributed geographically, with regions that, due to their physiographic characteristics and climate, have low water availability, either for consumption or development of productive activities. This, together with climate variability and unplanned land use change, affects water security. In Argentina, in recent years the occurrence of climatic phenomena caused 30% of the national territory to be declared in a state of emergency and/or agricultural disaster.

In the case of the southwest of the province of Buenos Aires, the presence of the mountain system influences rainfall dynamics, generating high spatial variability of precipitation. This variability added to the temporal oscillation typical of the climate of the region, which interacts with shallow soils of high slope, mainly agricultural land use in inadequate sites with aggressive tillage practices, results in greater aggressiveness of wet and dry cycles, leading to floods or water shortages with the consequent decrease in crops, difficulties in water supply and activation of desertification processes.

In this sense, the present thesis aims to analyze the hydrological vulnerability due to land use change in the upper Sauce Chico River basin (CARSCH) in the period 1988 - 2018. To this end, we began by defining the theoretical approach that conceptualizes vulnerability in watersheds and thus propose a model composed of indices that describe fragility (morphometric index), climatic variability (rainfall anomaly and global warming index) and land use (USLE land loss index).

Once each of the indices had been calculated and the trend determined, the hydrological vulnerability index was calculated by normalizing its variables. Finally, through the hypothesis proposed, the level of influence of land use change on vulnerability was established, for which the IPSE (index of ecosystem services provision) was taken as an independent variable and indicator of land use change.

Information from remote sensing, which is a type of information technology that offers spatial and temporal coverage in land monitoring, was integrated throughout the development of the research. In turn, this information was corroborated and, in some cases, merged with information from field measurements.

From the results obtained, the proposed vulnerability index includes all the variability expressed by calculating and analyzing separately each of the indices that comprise it. It was determined that hydrological vulnerability increases the greater the area of steep slopes. Although land use change has an influence on vulnerability, the most determining factor is the topographic configuration. In relation to climatic variability, there is a certain tendency towards an increase in ambient temperature and a decrease in precipitation, which, although not statistically significant, give us an indication of periods with anomalous years, which are becoming more frequent.

CAPÍTULO I

1. ASPECTOS GENERALES.

1.1. Introducción.

Los recursos hídricos disponibles para el ser humano son limitados y se encuentran distribuidos geográficamente de forma desigual. En la actualidad, se estima que cerca de un tercio de la población mundial correspondiente a 2.600 millones de personas, vive bajo estrés hídrico (Hofste et al., 2019).

En América Latina existen regiones que, debido a sus características fisiográficas y clima, presentan baja disponibilidad de agua, ya sea para consumo o desarrollo de actividades productivas. Esto, sumado a la variabilidad climática y al cambio de uso del suelo, el recurso hídrico es cada vez más limitado (Urquiza y Cadenas, 2015).

En Argentina, el Ministerio de Agroindustrias de la Nación señala que en los últimos años la aparición de fenómenos climáticos de gran intensidad provocó que un 30 % del territorio nacional sea declarado en estado de emergencia y/o desastre agropecuario (Ministerio de Agroindustria, 2018), limitando la disponibilidad de los recursos hídricos para actividades de aprovechamiento con consecuentes pérdidas económicas para el país como 14140 millones de dólares en producción de soja, trigo y maíz, y ha sido considerado como el peor rendimiento nacional registrado desde el 2008-2009 (Bolsa de Comercio de Rosario, 2023).

En el caso del suroeste de la provincia de Buenos Aires, la disponibilidad del recurso hídrico es afectado por la presencia de las sierras que influyen en la dinámica pluvial generando elevada variabilidad temporal y espacial de las precipitaciones (Campo, Silva y Gil, 2016). Esta variabilidad da lugar a ciclos húmedos y secos que interactúan con suelos poco profundos de elevada pendiente, uso de suelo mayormente agrícola en sitios inadecuados con prácticas de laboreo agresivas (Picardi y Giacchero, 2015). Como resultado de esta interacción la agresividad de los ciclos húmedos y secos han llegado a producir inundaciones o escasez de agua con la consecuente disminución de cosechas, dificultades de abastecimiento de agua y activación de procesos de desertificación (Campo et al., 2016; Moretto et al., 2018).

Una forma de evaluar la capacidad de los recursos hídricos para hacer frente a factores que provocan estrés hídrico (biofísicos, económicos, sociales y sus combinaciones) es la Vulnerabilidad hidrológica considerada como una herramienta analítica poderosa para la gestión de cuencas hidrográficas (García, 2017; Anandhi y Kannan, 2018).

1.2. Conceptos básicos.

A continuación, se describen y definen conceptos que son la base del desarrollo de esta investigación, tales como: cuenca hidrográfica, vulnerabilidad, vulnerabilidad en cuencas hidrográficas, mapa de vulnerabilidad.

1.2.1. Cuenca Hidrográfica.

Cuenca hidrográfica es una unidad de paisaje delimitada por las divisorias de agua, que discurre sus aguas a través de un sistema de drenaje superficial hacia un único punto de descarga, que puede ser un arroyo, río, humedal, lago u otro cuerpo de agua. Una cuenca incluye atributos biológicos, sociales, económicos y toda la estructura hidrogeológica subterránea conectados por el flujo de agua, no siempre coincide con los límites de la cuenca superficial dependiendo de la geología subyacente (Gaspari et al., 2013; Flotemersch et al., 2016).

A partir de inicios de la década de los ochenta se producen importantes cambios en el enfoque y objetivos de la gestión de cuencas, que enfatiza el interés creciente en la conservación de las cuencas hidrográficas, considerándolas como sistemas socio ecológicos que proporcionan una gama de servicios ecosistémicos valorados por la sociedad. Estas características hacen que las cuencas hidrográficas sean consideradas como base para el ordenamiento y la planificación ambiental y territorial (Darghouth et al., 2008).

1.2.2. Estudio de vulnerabilidad.

El estudio de la vulnerabilidad es la evaluación y análisis de vulnerabilidad que determina los componentes críticos, débiles o susceptibles de daño, pérdida o interrupción de los elementos bajo riesgo, sean estas edificaciones, instalaciones, sistemas – naturales o artificiales o de grupos humanos. Establece las medidas de emergencia y mitigación que deben implementarse o tomarse ante una amenaza específica o un grupo de ellas (Jiménez et al., 2004).

1.2.3. Vulnerabilidad.

Varias tradiciones y disciplinas, desde la economía y la antropología hasta la psicología y la ingeniería, utilizan el término vulnerabilidad (Adger, 2006). La vulnerabilidad es un concepto teórico y difícil de medir, dado el uso múltiple para las evaluaciones, la naturaleza multidisciplinaria del problema, comprensión limitada, estructura dinámica de vulnerabilidad, problemas de escala, problemas al diseñar indicadores de vulnerabilidad (Deshmukh y Singh, 2016; Anandhi y Kannan, 2018).

Los enfoques teóricos que conceptualizan a la vulnerabilidad indican que tiene componentes que incluyen la exposición y la sensibilidad a perturbaciones o tensiones externas, y la capacidad de adaptación. Según Adger (2006) y Vera y Albarracin (2017) la vulnerabilidad es el grado de susceptibilidad de un sistema a sufrir alteraciones por su exposición, fragilidad, capacidad de adaptación y respuesta.

1.2.4. Vulnerabilidad en cuencas hidrográficas.

Entendiéndose como sistema a una cuenca hidrográfica, la vulnerabilidad hidrológica es la susceptibilidad de la cuenca a la degradación ambiental, inundación, remoción en masa y flujos torrenciales, limitando la disponibilidad hídrica como respuesta de la expresión de su fragilidad, debido a su exposición a factores como el cambio de uso de suelo y la variabilidad climática.

La exposición ante amenazas naturales y/o antrópicas, la sensibilidad o fragilidad de los elementos expuestos y la capacidad de adaptación o recuperación, son los tres componentes principales que definen la vulnerabilidad, cuya relación se muestra en la Figura 1.

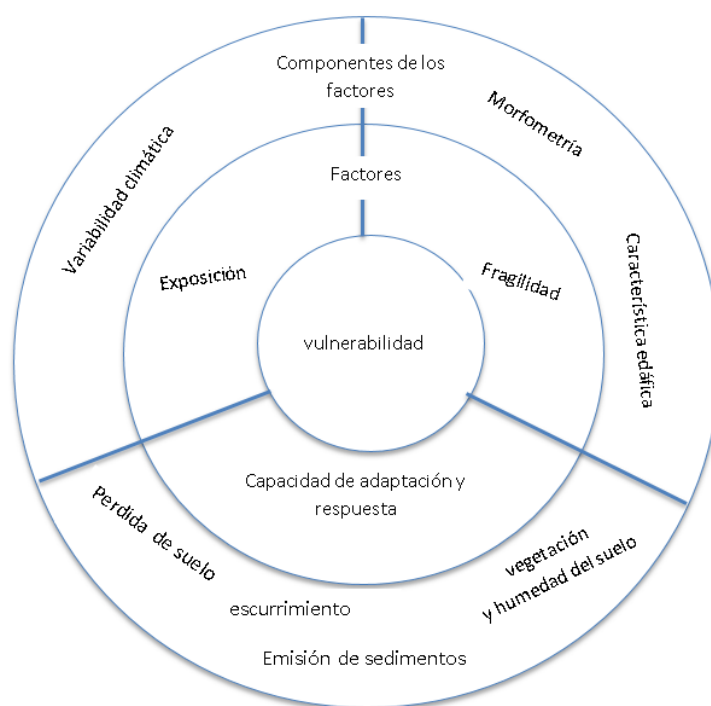


Figura 1. Factores y componentes de la vulnerabilidad hidrológica en una cuenca hidrográfica.

Fuente. Elaboración propia adaptado de Vera y Albarracin (2017)

Cada uno de los factores que intervienen en la vulnerabilidad hidrológica se definen como:

- **Exposición** es la naturaleza y el grado en que un sistema experimenta estrés o tensiones asociadas al cambio ambiental o sociopolítico. Las características de estas tensiones incluyen su magnitud, frecuencia, duración y extensión del peligro (Neil, 2006; Oliveras y Saladié, 2010).
- **Fragilidad** es el grado de desestabilización del equilibrio del sistema, debido a características intrínsecas, su análisis constituye una herramienta que permite las capacidades y vulnerabilidades del territorio (Rosso et al., 2022).
- **La capacidad de adaptación** es la capacidad de un sistema de evolucionar para adaptarse a los peligros ambientales o el cambio de políticas y ampliar el rango de variabilidad con el que puede hacer frente (Adger, 2006).

1.2.5. Mapa de vulnerabilidad.

Son representaciones cartográficas que permiten visualizar la variabilidad espacio-temporal de la vulnerabilidad como resultado de índices e indicadores específicos. Esta herramienta es clave en la planificación territorial ya que permite delimitar zonas según su grado de exposición a los peligros o amenazas latentes (Renda et al., 2017; Ataucuri y Cáceres, 2018).

1.3. Antecedentes.

Picardi y Giacchero (2015), en su evaluación de la importancia productiva del Sudoeste bonaerense durante el periodo 1970 – 2010, indican que representa el 25 % de la superficie de la provincia de Buenos Aires y aporta el 13 % de Producto Bruto Geográfico Provincial (sin tomar en cuenta a Bahía Blanca) y 15 % del rodeo bovino de la provincia. En el último decenio del siglo XX la participación de los distintos cultivos en la producción provincial fue: centeno el 46 %, avena 40 %, cebada 38 %, trigo 28 %, 20 % girasol, 18 % sorgo, 14 % en alpiste, 3 % maíz, y 2 % en el caso de la soja. Estas cifras muestran que se trata de una importante zona ganadera con agricultura importante para la provincia.

Además de su importancia como zona generadora de recursos económicos y alimento, se caracteriza por la presencia de un conjunto montañoso conocido como Sierras Australes de la Provincia de Buenos Aires o Sistema Serrano de Ventania con una longitud de 175 km y un ancho máximo de 50 km. La presencia del cordón serrano confiere una variación progresiva Norte-Sur y Este-Oeste de las condiciones de suelo y clima (Gaspari, 2007).

Varios trabajos de investigación han tenido como objeto de estudio el cordón serrano del suroeste bonaerense (Frangi y Bottino, 1995; Pérez, 1995; Tomezzoli y Cristallini, 2004; Amiotti et al., 2007; Loydi y Distel, 2010; Campo et al., 2011; Avila et al., 2012; Sfeir et al., 2013; Valeria Gil et al., 2014; Ramos et al., 2014; Panizza et al., 2015; Michalijos y Zapperi, 2015; Navarro y Cano, 2017).

Los mismos han permitido conocer su origen geológico complejo caracterizándolo como cinturón de pliegue y empuje desarrollado en el margen suroeste de Gondwana (Placas de Gondwana), atribuyendo al área, ambientes con elevadas pendientes y propicios para la existencia de especies de flora y fauna endémica.

De igual manera aducen que la presencia de elevaciones montañosas influye en la variabilidad climática en todo el cordón serrano y en la dinámica hídrica de todas las cuencas hidrográficas que nacen a partir del escurrimiento superficial y subterráneo, conformando una red hídrica que es la principal fuente de agua en todo el suroeste bonaerense. Sin embargo, las sierras han experimentado cambios de cobertura natural sin una planificación, que intensificó los procesos de degradación ambiental, como ser la presencia de especies forestales exóticas, recurrencia de incendios forestales, prácticas agrícolas agresivas, explotación turística sin planificación, deteriorando el patrimonio histórico, etc.

Gran parte de los estudios realizados sobre la dinámica fluvial a través de información hidrográfica y morfológica a nivel de cuenca y subcuenca se centran en los ríos Sauce Grande, Napostá y Sauce Corto, que son la principal fuente de agua dulce de la región y tienen relevancia agroecosistémica. El objetivo principal de estos estudios fue generar herramientas de gestión y ordenamiento de cuencas para disminuir los efectos de crecidas e inundaciones en poblaciones adyacentes (Gaspari y Bruno, 2003; Hauri, 2006; Delgado, 2009; Gil, 2009; Gil, Ybarra y Volonté, 2016; Campo y Casado, 2019).

En lo concerniente a la cuenca del río Sauce Chico existen investigaciones sobre el comportamiento hidrológico realizadas a nivel de cuenca y microcuenca, como ser los trabajos de Torrero (2009); FUNS (2011); Fernández et al. (2015); Espósito et al. (2016); Navarro y Cano (2017), y microcuenca específicamente el arroyo Ventana, trabajados por Martínez et al. (2016); en la zona de recarga de la cuenca o zona alta se destaca las investigaciones realizadas por el grupo CEIDE (Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena), difundidos a través de los trabajos: De Antueno et al. (2020); Guzmán (2020); Guzmán et al. (2021). Todos estos estudios han permitido establecer la dinámica fluvial del río Sauce Chico, variabilidad climática, fragilidad morfométrica en la zona de recarga y manifestaciones de degradación existentes.

Una forma de relacionar los diversos estudios de dinámica fluvial en el río Sauce Chico con sus manifestaciones de degradación es a través de la determinación y análisis de la vulnerabilidad hidrológica, aunque es considerado un concepto complejo ya que no existe una metodología estandarizada que permita su cálculo, constituye una herramienta necesaria y desafiante para la gestión ante eventos de cambio climático (Anandhi y Kannan, 2018).

Según Casado y Campo (2019) “ muchos estudios de base climática e hidrológica que se han desarrollado en el Sistema Serrano de Ventania se encuentran desactualizados, o cubren escalas de tiempo que no reflejan la variabilidad natural del clima de la región, por lo cual el principal desafío consiste en integrar el análisis de la diversidad de componentes que intervienen entorno a la ocurrencia, recurrencia y repercusión de extremos hidro climáticos a escalas de tiempo que comprendan y reflejen la variabilidad natural del clima a través del uso de nuevos métodos analíticos, sistémicos y transversales a los enfoques tradicionales y aplicables a escalas témporo-espaciales anidadas”.

Todo lo expresado en ítems anteriores han motivado a la búsqueda de una metodología que permita determinar y analizar la vulnerabilidad hidrológica en la cuenca alta del río Sauce Chico debido a su importancia como zona de recarga hídrica y a que su problemática de gestión es común en varias regiones de América del Sur, principalmente en zonas de pendiente escarpada.

En esta tesis doctoral para el análisis de la vulnerabilidad hidrológica en la cuenca Alta del Río Sauce Chico, se integró información proveniente de la teledetección, que es un tipo de tecnología de la información que ofrece cobertura espacial y temporal en el monitoreo de la tierra (Gavilán, 2019). A su vez esta información fue corroborada y en algunos casos fusionada con información proveniente de mediciones de campo.

1.4. Objetivos e Hipótesis.

1.4.1. Objetivo General.

Analizar la vulnerabilidad hidrológica por el cambio de uso de suelo en la cuenca alta del río Sauce Chico (CARSCH).

1.4.2. Objetivos Específicos.

- Desarrollar una metodología de evaluación de vulnerabilidad hidrológica para CARSCH.
- Zonificar el cambio de uso de suelo espacio-temporal y su degradación por erosión hídrica superficial, en los últimos 30 años.
- Caracterizar hidrológica - ambientalmente CARSCH.
- Evaluar la dinámica climática regional de los últimos 30 años y realizar un análisis de variabilidad climática.
- Definir índices que describan la vulnerabilidad hidrológica de la cuenca en estudio.
- Analizar la vulnerabilidad hidrológica espacio-temporal CARSCH.

1.4.3. Hipótesis de trabajo.

- El cambio del uso del suelo es significativamente positivo sobre la vulnerabilidad hidrológica y la capacidad de respuesta del sistema hídrico superficial.

CAPÍTULO II

2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

En este capítulo se describe el área de estudio, su localización, clima, geología que servirá de base para la metodología y análisis de los resultados obtenidos.

2.1. Área de estudio.

La cuenca alta del río Sauce Chico (CARSCH) se extiende sobre el sistema serrano de Ventania, en la región pampeana del suroeste de la provincia de Buenos Aires. Abarca parte de los partidos de Saavedra, Tornquist y coronel Suárez. La cuenca está ubicada entre los 62°00' y 62°18' de longitud oeste y 37°53' y 38°05' de latitud sur.

La divisoria de aguas del río Sauce Chico está definida por las cadenas serranas Curamalal, Bravard y Ventana (Ramos et al., 2014; Navarro y Cano, 2017). En estas cadenas las elevaciones dominantes son: cerro La Sofía y Pan de Azúcar al oeste; hacia el este con los cerros Guanaco, cerro La Providencia, cerro Destierro Primero y cerro Ventana. El límite sur está dado por el cerro Fundación FUNKE y el cerro Tornquist (Gaspari, 2007).

El curso principal recibe el aporte de varios arroyos secundarios, siendo los principales arroyo Chaco, arroyo Barril y arroyo Ventana que drenan los faldeos de la divisoria de aguas.

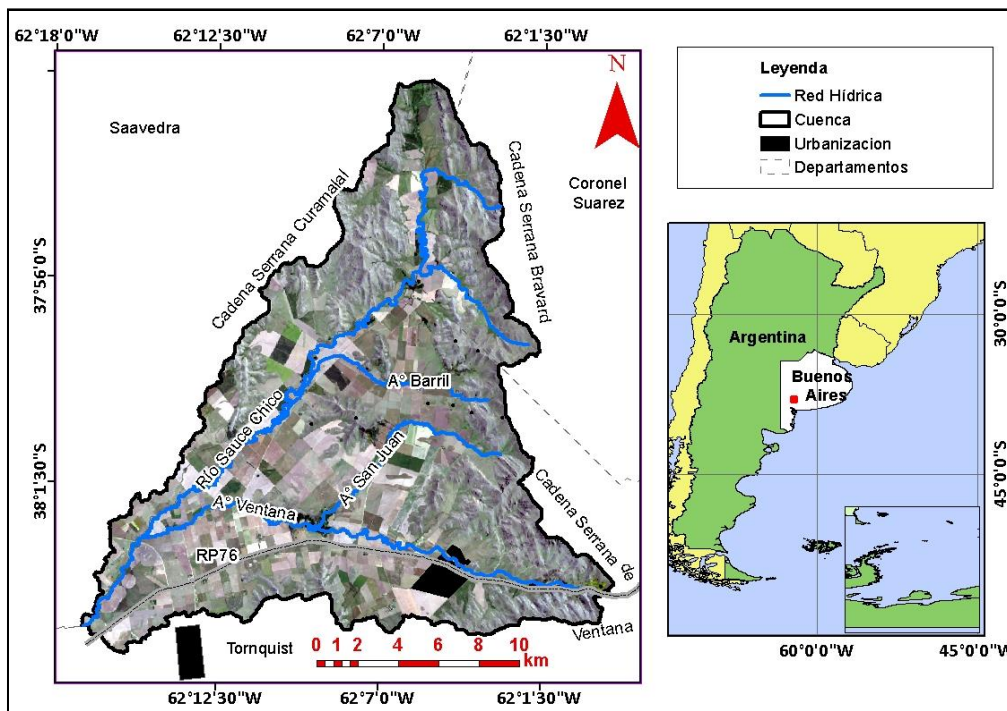


Figura 2: Ubicación del área de estudio.

2.2. Geología.

El sistema serrano de Ventania está localizado en el suroccidente de la provincia de Buenos Aires, emerge en un relieve predominantemente llano. Está constituido por rocas sedimentarias de edad paleozoica, rodeadas por depósitos terciarios y cuaternarios (Fortunatti et al., 2001). Harrington (1947) distinguió 3 unidades estratigráficas en el sistema serrano: Curamalal, Ventana y Pillahuinco, con espesores de 1250 m, 1550 m y 2590 m respectivamente (Figura 3).

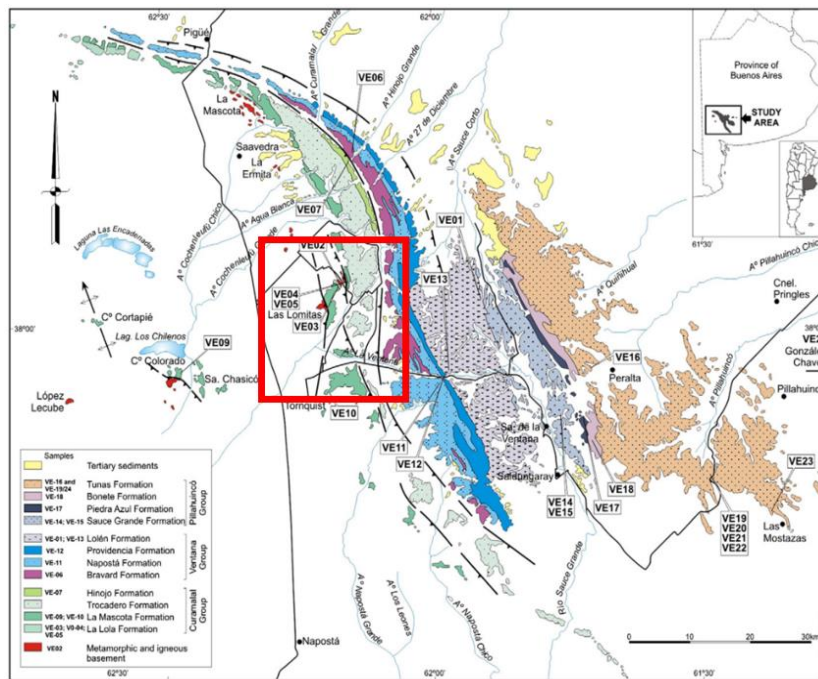


Figura 3. Principales formaciones geológicas del Sistema Serrano Austral de la Provincia de Buenos Aires. Extraído de Ramos et al. (2014).

Como se señala en la Figura 3, dentro del área de estudio se distinguen los grupos geológicos: Curamalal de origen ígneo, representa el comienzo del registro sedimentario en la cuenca, contiene conglomerados con clastos de grano grueso, matriz arenosa, con lechos de hasta 1,5 m de espesor y el Grupo Ventana que es la unidad inferior (Formación Bravero) tiene algunos conglomerados finos con una composición cuarcítica de los clastos. La Formación Napostá suprayacente es bien conocida por su contenido icnológico (Ramos et al., 2014; Navarro y Cano, 2017; Guzmán, 2020).

2.3. Clima.

El área de estudio se encuentra en una zona de transición climática entre semiárido y subhúmedo. Las lluvias son de irregular distribución y los fuertes vientos provocan una evapotranspiración elevada (Redondas de Pascualini y Fiordelmondo, 1991). La precipitación media anual es de 650 mm, con máximos en otoño y primavera, con eventos torrenciales entre 100 y 300 mm/día (B. G. Martínez et al., 2016). La temperatura ambiente promedio oscila entre los 37 °C en época estival y los 5 °C en la invernal con picos extremos y una media anual de 14,4 °C. Las primeras heladas ocurren en mayo y noviembre.

2.4. Hidrología.

El agua de lluvia que escurre del borde austral de la sierra de la Ventana, de la zona occidental de las sierras de Pillahuinco, sur del cerro Chaco y región adyacente de la sierra Bravard, da origen a varios cursos de agua que forman cuencas endorreicas y exorreicas y es descargada al océano Atlántico. Las cuencas exorreicas son Sauce Chico, Napostá Grande y Sauce Grande (Redondas de Pascualini y Fiordelmondo, 1991; M. Rodríguez et al., 2017).

La divisoria de aguas de la CARSCH está dada por los cordones Curamalal, Bravard y Ventania y el punto de cierre coincide con la ubicación de la estación de aforo Paso Bower, habilitada desde enero de 1939 (Torrero, 2009). La estructura geológica favorece a la formación de un drenaje dendrítico de flujo torrencial y en algunos sectores hiporreicos (FUNS, 2011; M. Rodríguez et al., 2017), donde el sentido de la dirección de flujo superficial y subterráneo son similares, como lo muestran las curvas isofreáticas de la Figura 4 (Albouy y Bonorino, 1997).

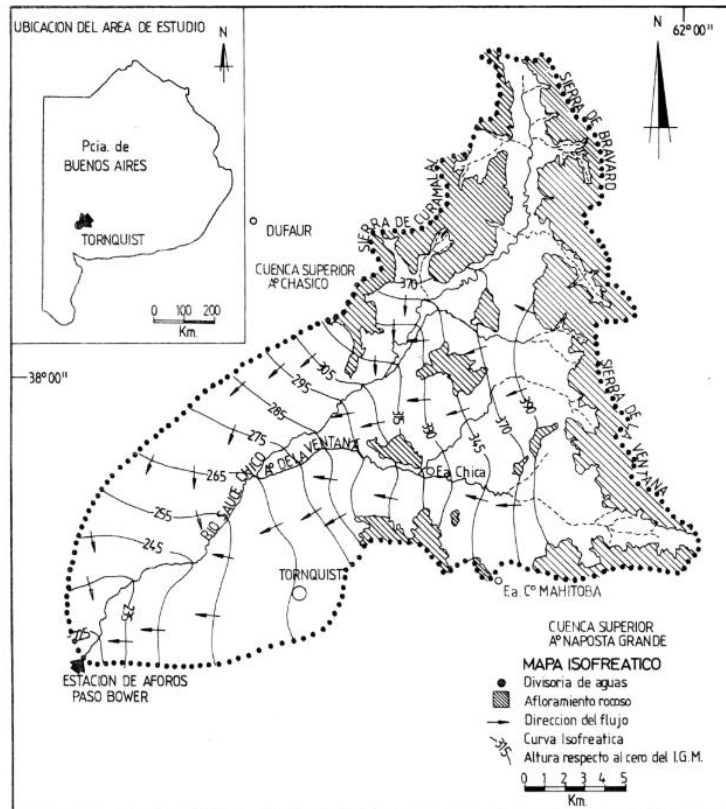


Figura 4. Mapa Isofreático de CARSCH.

Extraído de Albouy y Bonorino (1997).

Al tratarse de una zona de captación, son los procesos de ladera y progresión del talweg los que controlan la morfogénesis y junto con la vegetación natural, el clima y la antropización de los interfluvios controlan la dinámica fluvial (B. G. Martínez et al., 2016). En la CARSCH, cuyo río principal es el Sauce Chico, que se extiende de norte a sur, se forma por la confluencia de cuatro arroyos principales Sauce Chico, Barril y Ventana (Figura5).

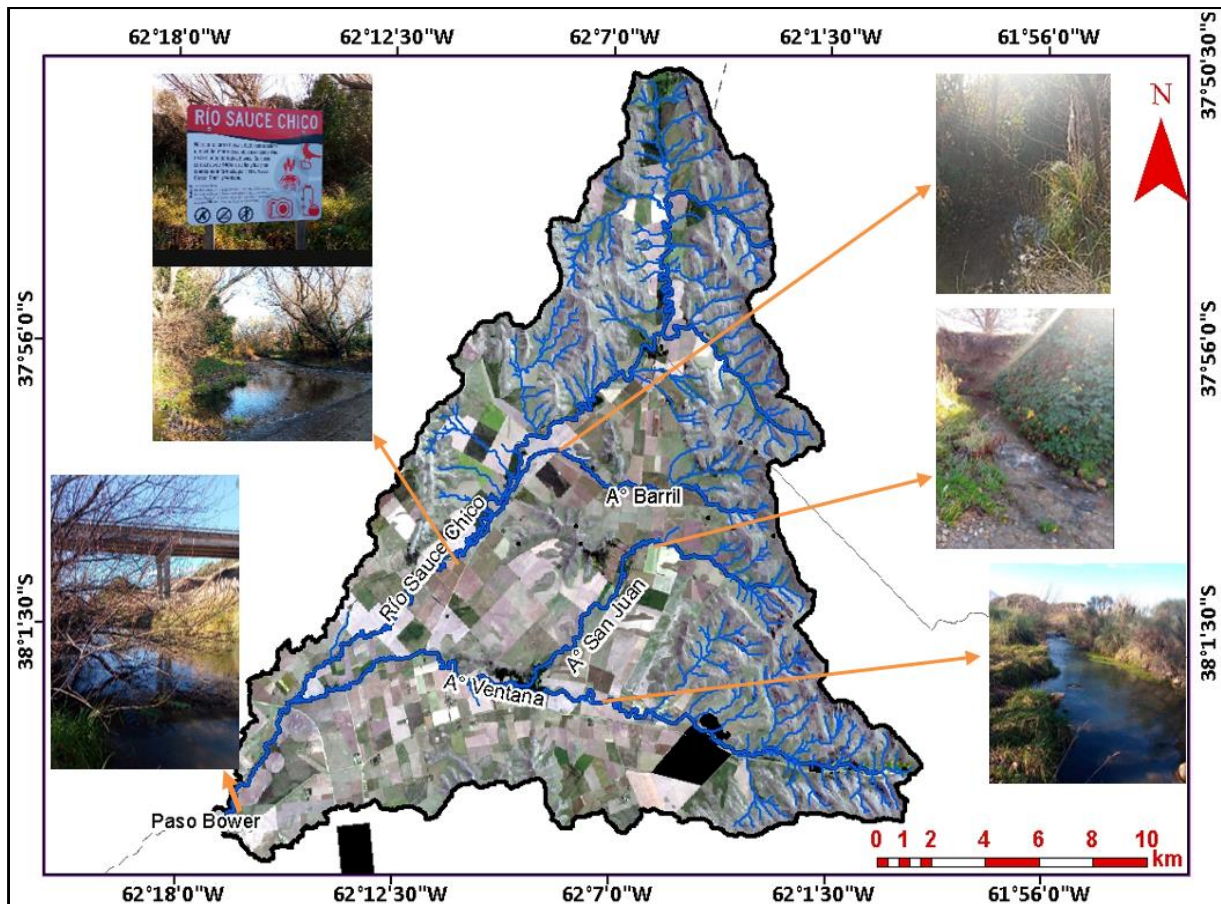


Figura 5. Red hidrográfica del Río Sauce Chico.

2.5. Topografía y relieve.

Como muestra las Figuras 4 y 5, la CARSCH drena los faldeos de los cordones serranos suroriental Curamalal, Bravard y noroccidental Ventana; que al presentar gradientes de pendiente mayores al 20%, con presencia de afloramientos rocosos sobre los 400-450 m.s.n.m., conforman la divisoria de aguas superficial. A su vez los cordones serranos se subdividen en dos subunidades que son:

2.5.1. Relieve escarpado formado por basamentos o rocas aflorantes cuarcíticas paleozoicas fuertemente plegadas expuestas o apenas cubiertas por un delgado manto de loess, correspondiente a las zonas más altas de las sierras.

2.5.2. Relieve ondulado con loess de hasta 2 metros de espesor formando los flancos o pedemontes que se apoyan sobre una costra calcárea de gran dureza y extensión conocida como tosca. Cerca de los afloramientos se miden altos gradientes topográficos superiores al 5%, de igual forma mayor pendiente hidráulica del acuífero. A medida que se aleja del pie de sierra, el relieve se suaviza y las

pendientes oscilan entre 1 y 5%, en tanto que la superficie freática muestra igual tendencia, pero en forma más suave. Entre los cerros y serranías que conforman el sistema de Ventania existe un relieve plano y plano-cóncavo, en sus laderas presentan valles en “V” (Albouy y Bonorino, 1997; Gaspari, 2007; Torrero, 2009; Guzmán, 2020).

La cubierta sedimentaria Inter montana está constituida por depósitos de origen fluvial, eólico y coluvial, hidrobiológicamente muy permeables (Albouy y Bonorino, 1997). Los piedemontes sirven de conexión entre las sierras y la llanura que tiene un límite difuso de gradiente topográfico, constituye una zona típica de infiltración del agua de lluvia (González, 1984, Albouy y Bonorino, 1997).

2.6. Cobertura y/o Uso de suelo.

En 1870, con la llegada del ferrocarril General Roca a la región pampeana, se instalaron las primeras colonias de agricultores de origen alemán, suizo e italiano. Con esta llegada se introdujo una gran variedad de animales y plantas europea (Redondas de Pascualini y Fiordelmondo, 1991; Guzmán, 2020). Definiendo así los usos y/o cobertura de suelo que se describe a continuación:

2.6.1. Vegetación Natural.

Según Lizzi et al. (2007) los cordones serranos que conforman la divisoria de aguas dan lugar a diversos ambientes terrestres pues las condiciones de vida difieren según el sustrato suelo-roca, la exposición al sol, pendiente y altura. Se han reconocido 24 especies de comunidades vegetales en Ventania, que incluyen diversidad de plantas entre ellas algunas endémicas, como se expresa en la Figura 6.

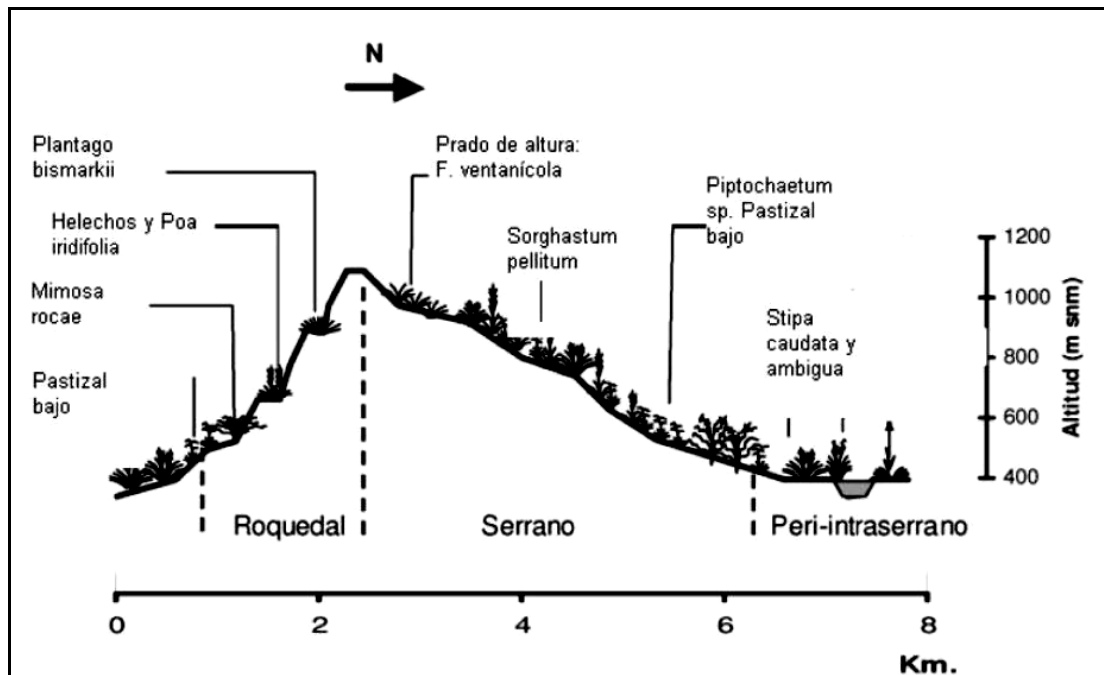


Figura 6. Ambientes terrestres y ubicación de algunas comunidades vegetales de Sierra de la Ventana.

Fuente: Lizzi et al., 2007.

Los ambientes identificados en el sistema serrano de Ventana son:

- Roquedal.** Formado por afloramientos rocosos libres de sedimentos o con una capa muy fina. En la cima de los cerros sobre los 500 m, crece una especie endémica llamada *Plantago bismarckii* (pino plateado), mejor conocido como llantén arbustivo (Fotografía 1) y sobre los 800 m en la fisura de los peñascos crece la *Festuca ventanícola*; en la cima de los cerros la vegetación es muy pobre y en ambientes secos las herbáceas no miden más de 20 cm (Redondas de Pascualini y Fiordelmondo, 1991). Las especies más comunes son *Grindelia chilensis*, raramente el *P.ventaniensis* y el líquen *Usnea hicronymy* (planta saxícola), *Poa iridifolia* que es una gramínea endémica de las sierras llamada también Poa lanígera.



Fotografía 1. *Plantago bismarckii*.

Fuente: Campo et al. (2012).

- **Serrano.** – corresponde a las laderas de exposición sur, que muestra pendientes más abruptas, frías, húmedas con menor exposición solar. La vegetación representada por: *Festuca pampeana* y *Festuca ventanicola* que crece en suelos húmedos con humus, poco insolados, no pedregosos o roquedales planos (Fotografía 2), gramíneas como *Phalaris angusta*, *Melica brasiliana*, *Stipa pampeana*, *S.juncoides*, *Briza sp*, *Bromus hordaceu*. En las partes bajas las gramíneas se asocian con *Piptochaetium haeckeli*, *P.lejopodum*, *Briza subaristata*, *Melica macra* y *Poa liguralis*, todas de interés forrajero. En las mesetas serranas de pendientes suaves prosperan praderas de césped bajo y denso de especies como *Festuca ventanicola*, *Hipericum sp.*, *Arjona sp.* y *Grindelia sp.*

Los pastizales serranos, están presentes en todas las altitudes del sistema serrano y su biomasa aérea disminuye a mayor altitud, pueden alcanzar los 80cm de altura, pero su biomasa subterránea (proporción de raíces) se incrementa a mayor altitud. Esta condición es importante debido a que la biomasa subterránea aporta en la retención de suelo, acompañando la biomasa aérea en la disminución de la energía cinética del agua evitando los efectos degradativos de erosión y consecuente pérdida de suelo (Cabrera, 1968; Frangi y Bottino, 1995; Pérez, 1995; Bruno et al., 1999; Campo et al., 2012).



Fotografía 2. a) *Festuca pampeana*; b) *Festuca ventanícola*.
Fuente: Campo et al. (2012).

- **Peri serrana.** es el área que más modificaciones ha sufrido por actividades forestales y agropecuarias. Se corresponde con ambiente de planicies y lomadas suaves cuya vegetación está constituida por hierbas perennes xerófilas, donde predominan especies nativas de la estepa pampeana, de género *Stipa*, como *S.brachychaeta*, *S.dusenii*, *S.trichotoma*, *S. caudata* (pasto puna dulce) y *S. ambigua* (paja vizcachera) (Fotografía 3); son consideradas como un pasto muy duro no apetecido por el ganado por lo cual tiene poco valor forrajero; gramínea *Sorghastrum pellitum* perenne y nativa es apreciada por herbívoros por lo cual es susceptible a pastoreo. Entre estas matas prosperan invasoras como abrepuño (*Centaurea calcitrapa*), cardo negro (*Cirsium vulgare*), cardo de Castilla (*Cynara calcitrapa*), gramíneas como: *Convolvulus arvensis*, *Salpichroa organifolia*, *Heliotropium amplexicaule*, algunas leguminosas como: *Medicago hispida*, *Medicago arabica*, *Trifolium repens*. Otras gramíneas en asociación son *Melica argirea*, *Briza brizoides*, *Bromus hordeus*, *Bromus brevis*, *Lolium multiflorum*, *Hordeum murinum*, *Avena barbata* y *A.sterilis* (Echegaray et al., 1968; Frangi y Bottino, 1995).

En los fondos de valle o laderas se puede ver vegetación arbustiva representada por calafate (*Berberis ruscifolia*), brusquilla (*Discaria longispina*), y varias compuestas como *Eupatorium sp.*, *Bacharis sp.*, *Wedelia buthalmiflora*. Entre las rosáceas aparece la yerba de perdíz (*Margyricarpus pinnatus*), la zarzaparrilla (*Mimosa rocae*) y el guindo silvestre (*Prunus mahaleb*) (Gaspari, 2007; Torrero, 2009; Campo et al., 2012;).



Fotografía 3. *Stipa ambigua* (11/04/2019).

- **Vegetación higrófila.** distribuida sobre los cursos de agua, desde sus nacientes, se observa una vegetación más higrófila (áreas de abundante agua), localizada en zonas de torrente y manantiales, entre las principales especies se encuentran la *Cortadera dioica*, *Paspalum quadrifarium*; *Senecio bonaerensis*; *Scirpus riparius*; *Juncus microcephalus*; *Melica macra*; *Polypogon elegantus* (Fotografía 4). En las laderas bajas de todas las serranías, donde el escurrimiento se acumula son frecuentes los pajonales de paja colorada (*Paspalum quadrifarium*). También aparece en las chacras y pantanos de comunidades palustres e higrófilas (Echegaray et al., 1968).



Fotografía 4. Vegetación higrófila (08/04/2019).

2.6.2. Agricultura.

El 13% de Producto Bruto Geográfico Provincial, es generado por el suroeste de la provincia de Buenos Aires sin considerar a Bahía Blanca (Ávila et al., 2012). Debido a que en el sistema serrano de Ventania predominan la roca desnuda y los suelos muy someros, los sistemas productivos predominantes son ganadero-agrícolas, basados en pasturas cultivadas plurianuales y forrajes en rotación con cultivos de cosecha adaptados al clima y a las limitaciones del suelo (Marini, 2008).

Las especies forrajeras cultivadas pueden ser anuales y perennes. Entre las anuales, las principales son avena, cebada, sorgo y centeno. Las forrajeras permanentes son estivales principalmente están la alfalfa en asociación con gramíneas perennes. Entre las especies no forrajeras y destinadas a cosecha se encuentran cereales como maíz, trigo, avena, centeno, cebada cervecera y verdes de verano (Redondas de Pascualini y Fiordelmondo, 1991; Marini, 2008) .



Fotografía 5. Áreas cultivadas (12/07/2021).

2.6.3. Forestación.

Por decreto N°18.529 del 20 de agosto de 1949, se instaura una política forestal en el Parque Provincial Ernesto Tornquist para la forestación en sierras, consideradas como terrenos no aptos para la agricultura con especies y variedades aprovechables. Dicha campaña se inició con 20000 plantas forestales de distintas variedades como abetos, álamos, cedros, cipreses algarrobos, pinos, robles, sauces, eucaliptos (Echegaray et al., 1968). Actualmente, los sistemas forestales existentes no tienen fines productivos, únicamente son utilizados para abrigo, ornamentales, protectores, cortinas sobre todo en zonas de ganadería. En las márgenes de los arroyos y río cada vez han ido disminuyendo por la presión ejercida por la actividad agrícola, provocando la reducción de la vegetación de ribera nativa y la expansión de vegetación forestal exótica (Cabrera, 1968; Frangi y Bottino, 1995; Gaspari, 2007; Torrero, 2009; Campo et al., 2012).



Fotografía 6. Forestaciones (12/07/2021).

2.6.4. Urbanización.

Originalmente el sistema serrano de Ventania fue de uso agrícola y ganadero, hasta 1971 en que el campo situado a 20km se ubica la ciudad cabecera de Tornquist fue loteado, para situar un centro de turismo. Se abrieron calles, se dotó del servicio eléctrico y se llevó a cabo algunos trabajos de forestación. Pero fue hasta 1998 y 1999, con la reconstrucción de la actual Villa Serrana La Gruta y Villa San Andrés de las Sierras, que el lugar ha ganado renombre y población (Centro de Formación Profesional Nro. 401, 2005). De acuerdo con el censo realizado en el año 2010 ambos asentamientos cuentan con 52 habitantes.



Fotografía 7. Villa Serrana La Gruta (08/04/2019).

2.6.5. Ganadería.

La ganadería es una importante actividad generadora de recursos económicos, por lo general los establecimientos de la zona se dedican a la producción de ganado vacuno y ovino, bajo sistemas de invernada - recria – tambo (Marini, 2008). El 15% del rodeo bovino de la Provincia proviene del suroeste bonaerense (Picardi y Giacchero, 2015). En el periodo invernal los productores aprovechan la vegetación natural de la parte alta de la sierra para la alimentación del ganado, provocando la disminución y deterioro de la cobertura del suelo por la excesiva carga animal.



Fotografía 8. Ganadería (12/07/2021).

2.6.6. Parque provincial Ernesto Tornquist.

Parte de la cabecera de la CARSCH se ubica en el Parque Provincial Ernesto Tornquist, creado en 1937, posee 6700 hectáreas. En una zona de protección de cuencas hidrográficas, paisaje natural y especies endémicas características del pastizal pampeano (Gil et al., 2014). Ofrece una alta biodiversidad y la mayor concentración de endemismos de la provincia. Además, conserva el último relicto del pastizal pampeano serrano (Guzmán, 2020). Sin embargo, la invasión del Pino de Alepo sobre los pastizales ha provocado profundos cambios en la composición y estructura de la vegetación nativa (Cuevas y Zalba, 2013)



Fotografía 9. Parque Provincial Ernesto Tornquist.
Fuente: Radio Reflejos, 2021.

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS.

En el presente capítulo detalla el método para determinar la vulnerabilidad hidrológica de la CARSCH. Este método se basó en índices que describen las características morfológicas, climáticas y de uso/coertura de suelo de la CARSCH y sus subcuencas. Para su realización se recopiló y procesó información de visitas de campo, trabajos previos, estimaciones satelitales y consultas a entidades públicas como: Municipalidad de Tornquist, INTA Tornquist, Fundación FUNKE, Biblioteca municipal, INTA Suelos, Servicio Meteorológico Nacional, Autoridad del Agua de la Provincia de Buenos Aires.

3.1. Descripción del modelo de vulnerabilidad.

Varios trabajos que tratan de medir la vulnerabilidad en distintos ámbitos como son socio-ambiental, ecológica, a desastres naturales (Càceres, 2001; Gil, 2009; González, 2011; Araya y Calvo, 2017), basan sus estudios en la definición de vulnerabilidad global propuesta por Wilches (1993) que la expresa como *“la incapacidad de una comunidad para "absorber", mediante el autoajuste, los efectos de un determinado cambio en su medio ambiente, o sea su "inflexibilidad" o incapacidad para adaptarse a ese cambio, que para la comunidad constituye, por las razones expuestas, un riesgo. La vulnerabilidad determina la intensidad de los daños que produzca la ocurrencia efectiva del riesgo sobre la comunidad”*.

En este sentido y con base en los conceptos presentados en el capítulo I, para el presente trabajo se considera a la **vulnerabilidad hidrológica** como la susceptibilidad de la cuenca hidrográfica a la degradación ambiental y limitación de la disponibilidad hídrica como resultado de la expresión de su **fragilidad**, debido al **cambio de uso de suelo** y la **variabilidad climática** que actúan sobre ella, como se indica en la figura 7.

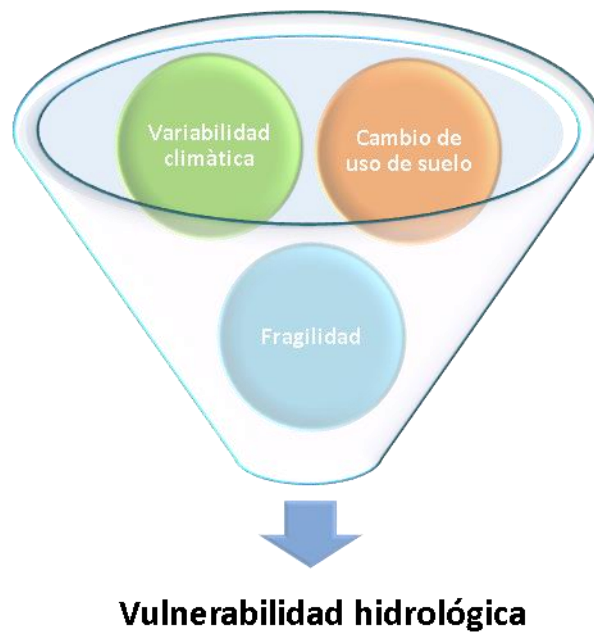


Figura 7. Expresión de la Vulnerabilidad hidrológica.

Cada una de las variables de la figura 7 se describen de la siguiente manera:

- **Fragilidad:** es la capacidad de respuesta de un sistema ante la incidencia de acciones o usos. Es decir que la fragilidad es la susceptibilidad del sistema a cambios en su equilibrio natural (Muñoz, 2004; Oliveira-Andreoli et al., 2021).
- **Uso de suelo:** "*cubertura (bio) física observada de la superficie de la tierra y es una síntesis de los numerosos procesos que tienen lugar en la tierra. Refleja la ocupación de la tierra y su transformación por diversos sistemas naturales, modificados o artificiales*"(FAO, 2016).
- **Variabilidad climática:** se refiere a la variabilidad de temperatura y precipitación en el área de estudio, que a su vez permite la identificación de anomalías, distribución y frecuencia a diferentes escalas sean estas diurna, interanual e Inter decadal (González, 2022).

Los métodos más utilizados para evaluar la vulnerabilidad son los econométricos (basados en encuestas) y los basados en índices (usando indicadores), siendo este último el más utilizado (Anandhi y Kannan, 2018).

Para el presente trabajo se hará uso de métodos basados en índices que describen las variables seleccionadas, los cuales se encuentran resumidos en la figura 8.

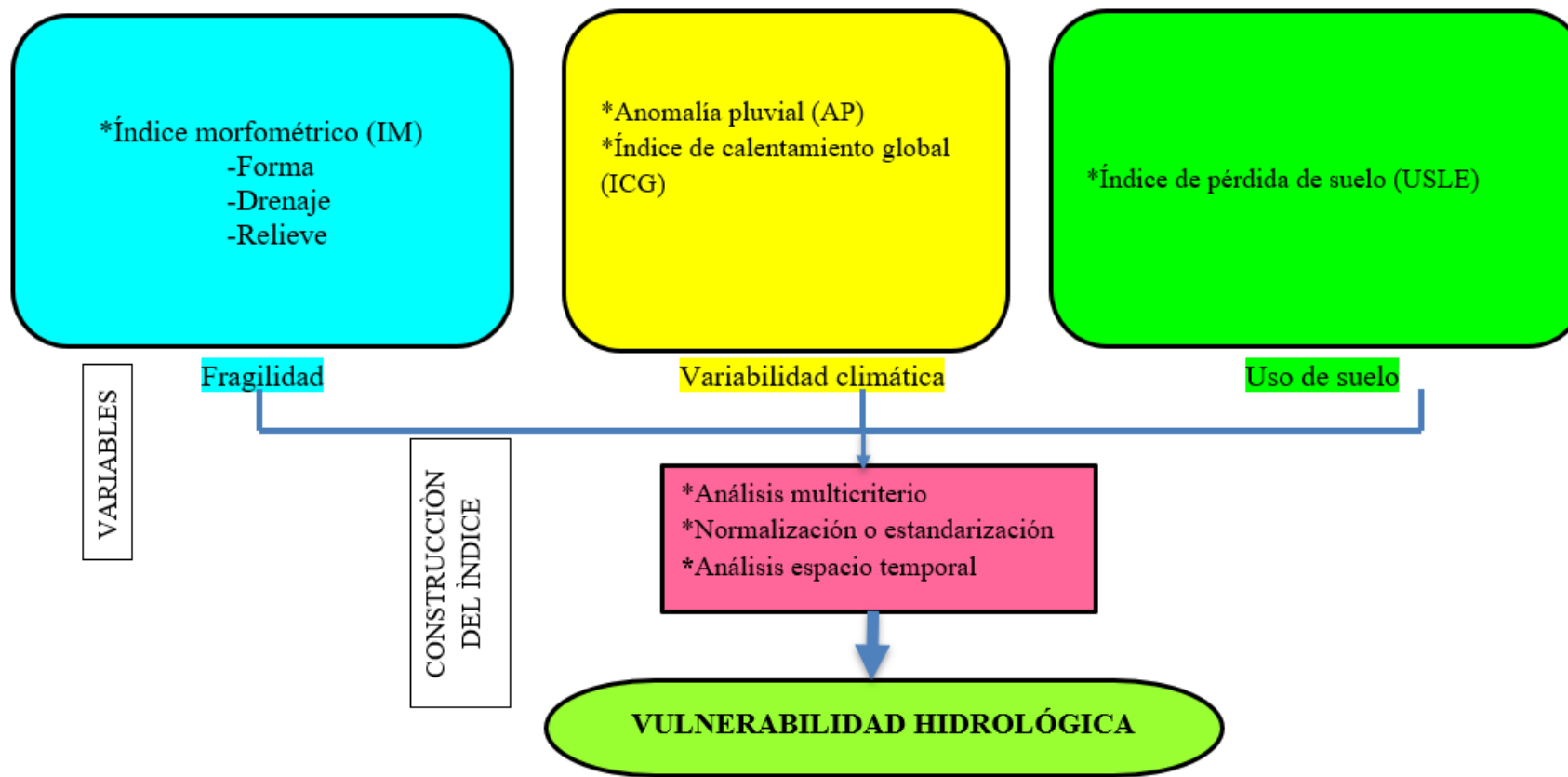


Figura 8. Metodología para determinar la vulnerabilidad hidrológica de la CARSCH.

3.1.1. Fragilidad.

El análisis de la fragilidad se ha mostrado apropiado para el diagnóstico y pronóstico ambiental, con especial énfasis en los recursos hídricos(Oliveira-Andreoli et al., 2021).

3.1.1.1. Índice morfométrico.

Según, Michalijos y Zapperi (2015); Khurana et al. (2019); Shivanna y D (2019); Venkatesh y Anshumali (2019); Jothimani et al. (2020), el uso de variables morfométricas en la gestión de cuencas hidrográficas, se debe considerar como una prioridad, ya que el análisis morfométrico se considera un método eficiente para el reconocimiento y priorización de las regiones propensas (frágiles) a la erosión del suelo e inundaciones en las cuencas hidrográficas. Proporciona detalles sobre la variación espacial de los parámetros morfométricos (de forma, relieve y drenaje) que permiten determinar el movimiento y captación del agua de lluvia (Gaspari et al., 2009).

En análisis morfométrico se realizó a partir de información cartográfica de elevación del terreno de la base de datos de del Instituto Geofísico Nacional (IGN), en formato modelo digital de elevación (DEM), con resolución espacial de 30 m y 3 m vertical. El procesamiento del archivo se realizó a través del software QGIS© y se utilizó el complemento QSwat para delimitar la cuenca y subcuencas.

La caracterización morfométrica de forma, relieve y drenaje se determinó en base al análisis de trabajos antecedentes de: Horton (1945), Torrero (2009), Gaspari et al. (2013), Romero, et al. (2015), Khurana et al. (2019) y Mandale y Bansod (2019), Guzmán (2020), Guzmán et al. (2021).

A continuación, se presenta la metodología para la determinación de los parámetros morfométricos:

1) Parámetros de forma.

- **Área (A) (km²).** Es la superficie encerrada por la divisoria de aguas.
- **Perímetro (P) (km).** longitud del contorno de una cuenca hídrica, sobre la divisoria de aguas.
- **Longitud axial (La) (km).** Es la distancia existente entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca.
- **Factor de forma (Ff) (adimensional).** Expresa la relación de proporcionalidad entre el caudal principal con respecto a sus caudales tributarios (Ecuación 1). Se

considera como indicador de la susceptibilidad de las cuencas hídricas a crecidas, debido a su forma. Cuencas de forma redondeada tienen mayor susceptibilidad a crecidas; la cual disminuye mientras más alargada es la cuenca, en caso de cuencas triangulares se las identifica por que presenta dos vértices en la cabecera con efluentes de similar longitud y sincronismo en la llegada que puede provocar crecidas significativas (Gaspari, 2013).

$$Ff = A / La^2 \tag{1}$$

Ff: factor de forma.

A: área en km².

La: longitud axial en km.

Tabla 1. Factor de forma de Horton

Valores aproximados	Forma de la cuenca
<0,22	Muy alargada
0,22 – 0,3	Alargada
0,3 – 0,37	Ligeramente alargada
0,37 – 0,45	Ni alargada, ni ensanchada
0,45 – 0 6	Ligeramente ensanchada
0,6 – 0,8	Ensanchada
0,8 – 1,2	Muy ensanchada
>1,2	Rodeando el desagüe

Fuente: Caicedo Toro et al., 2021

- **Relación de elongación (Re) (adimensional).** Es la relación entre el diámetro (D) de un círculo que tiene la misma área que la cuenca y la longitud máxima de la misma (La).

$$Re = D / La \tag{2}$$

Re: relación de elongación.

D: diámetro en km.

La: longitud axial en km.

Valores cercanos a 1 refieren a cuencas de muy bajo relieve, entre 0,6 y 0,8 se asocia con alto relieve y superficie escarpada. Para una mejor comprensión el Re se agrupa en 3 clases que se muestran en la Tabla 2 (Wilson et al., 2012; Waikar y Nilawar, 2014).

Tabla 2. Relación de elongación

Valores aproximados	Forma de la cuenca
<0,7	Menos alargada
0,7 – 0,9	Ovalada
>0,9	Circular

Fuente: Wilson et al., 2012; Waikar y Nilawar, 2014.

- **Relación de circularidad (Rc) (adimensional).** Es la capacidad de la cuenca para drenar el agua. El valor de Rc varía de 0 a 1, cuanto mayor sea el valor, más circular será la cuenca y viceversa (Arulbalaji y Padmalal, 2020).

$$R_c = 4 * \pi * A / P^2 \quad (3)$$

Rc: relación de circularidad.

A: área en km².

P: perímetro en km.

- **Coefficiente de compacidad de Gravellius (Kc) (adimensional).** El Kc permite relacionar el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de área equivalente al de la cuenca, y de esta manera representar esta característica (Gaspari et al, 2009). Este parámetro se relaciona con el tiempo de respuesta de la cuenca hidrográfica ante precipitaciones (tiempo de concentración).

$$K_c = 0,284 * P / A^{0,5} \quad (4)$$

Kc: coeficiente de compacidad de Gravellius.

A: área en km².

P: perímetro en km.

Tabla 3. Coeficiente de compacidad de Gravellius

Valores aproximados	Forma de la cuenca
≤ 1	Redonda, con mayor riesgo de crecidas
1 – 1,25	oval redonda
1,25 – 1,50	oblonga
$\geq 1,75$	rectangular-oblonga

Fuente: Gaspari et al, 2009

2) Parámetros de relieve.

Permiten comprender la distribución de la pendiente, que es de vital importancia porque brinda información a la planificación de asentamientos humanos, oportunidades agrícolas, forestación y planes de construcción de ingeniería.

- **Desnivel (H) (msnm).** Es la diferencia entre la elevación máxima (Hmax) y la mínima (Hmin) (Ecuación 5) de la cuenca. Controla la cantidad de energía potencial y cinética que se refleja en la producción de agua superficial, escorrentías, precipitaciones e inundaciones, por tanto, influye en los patrones de inundación, la cantidad de sedimento transportado, los procesos geomórficos y las características del relieve (Rajasekhar et al., 2020).

$$H = H_{\max} - H_{\min} \quad (5)$$

H: desnivel.

Hmax: elevación máxima en msnm.

Hmin: elevación mínima en msnm.

- **Pendiente media (PM) (%).** Es el porcentaje de pendiente que presenta la cuenca e influye en los procesos de erosión, y en el caudal máximo (López, 1998). Su cálculo fue a partir de un documento ráster que contiene los valores de pendiente expresados en porcentaje de toda la cuenca. Mediante la herramienta Estadística de Zonas del software QGIS©, se determinó los valores de los parámetros estadísticos, entre ellos el valor de pendiente promedio.
- **Relieve relativo (Rr) (adimensional).** Es el cociente entre el máximo desnivel de la cuenca y su perímetro (Ecuación 6). Al ser el principal factor morfológico que controlan la densidad del drenaje, se considera un factor importante para el análisis de la susceptibilidad y el peligro de los deslizamientos de tierra.

$$R_r = H * 100 / P \quad (6)$$

Rr: relieve relativo.

H: desnivel en msnm.

P: perímetro en m.

- **Relación relieve (Rh) (adimensional).** Resulta del cociente entre el máximo desnivel de la cuenca y su longitud axial (Schumm, 1956). Es un indicador de la intensidad del proceso de erosión. Si el valor Rh es alto, indica terreno montañoso y el valor bajo de Rh representa pedillanuras y valles. La clasificación se basa en los valores de índice que presenta el are de estudio (Rajasekhar et al., 2020).

$$R_h = H / L_a \quad (7)$$

Rh: relación relieve.

H: desnivel en msnm.

La: longitud axial en m.

- **Coefficiente de rugosidad (n) (adimensional).** Definido como el cociente entre el desnivel (H) y la longitud de corrientes por unidad de área (densidad de drenaje (Dd)). Es un indicador de la intensidad de los procesos geomórficos, tal es así que un valor extremadamente alto ocurre cuando las pendientes no solo son empinadas sino también largas. Dichos procesos pueden deberse a roturas bruscas debido a procesos de rejuvenecimiento, en áreas propensas a alta erosión del suelo con el movimiento de masas (Abdeta et al., 2020).

$$n = H * D_d \quad (8)$$

n: coeficiente de rugosidad.

H: desnivel en msnm.

Dd: densidad de drenaje en m/m².

Tabla 4. Coeficiente de rugosidad

Valores	Clase
<0,1	Bajo
0,1–0,4	Leve
0,4–0,7	Moderada
>0,7	Alta

Fuente: Farhan et al., 2015

3) Parámetros de drenaje.

La red de drenaje fue definida por digitalización manual, a partir del reconocimiento y análisis del historial de imágenes satelitales de Google Earth© (30 de diciembre de 1988 al 19 de septiembre de 2019). Además, fue corroborada por una delimitación automática a partir del DEM mencionado anteriormente.

- **Longitud de la red de drenaje (Lu) (km).** Según Horton (1945), Lu es la suma de la longitud de todos los tributarios de la corriente principal dentro de una cuenca.
- **Densidad de drenaje (Dd) (km/km²).** Es la relación entre la longitud total de la red de drenaje (Lu) con respecto al área de la misma (A). Es un indicador de la eficiencia de drenaje de las cuencas (Del Águila y Mejía, 2021). Una baja densidad de drenaje se corresponde con un subsuelo altamente resistente o permeable, densa cubierta vegetal y bajo relieve, mientras que una alta densidad implica que el material subterráneo es débil o impermeable con vegetación escasa y alto relieve (Arulbalaji y Padmalal, 2020).

$$Dd = Lu / A \tag{9}$$

Dd: densidad de drenaje.

Lu: longitud total de la red de drenaje en km.

A: área de la cuenca en km².

Tabla 5. Densidad de drenaje

Valores	Clase
0 – 1	Extremadamente baja
1 – 2	Baja
2 – 4	Moderada
4 – 6	Moderadamente alta
>6	Alta

Fuente: Smith, 1950; Singh et al., 2020

- **Longitud del flujo terrestre (Lo).** Es igual a la mitad del recíproco de la densidad de drenaje (Horton 1945) (Ecuación 10). Describe la longitud del flujo de agua sobre el suelo antes de que se concentre en canales de corrientes definidas (Abdeta et al., 2020). Tiene una relación directa con la erosionabilidad, cuanto más altos mayor es la erosionabilidad.

$$Lo = 1 / (2 * Dd) \quad (10)$$

Lo: longitud de flujo terrestre.

Dd: densidad de drenaje.

- **Constante de mantenimiento del canal (C) (1/km * km²).** Schumm (1963) lo define como la inversa de la densidad de drenaje (Dd). Representa el área requerida una determinada longitud de cauce, que depende del tipo de roca, su permeabilidad, peligro de deslizamiento, cuencas con escasa posibilidad de extensión en la cabecera, la historia climática de la cuenca (Docampo et al., 1990).

$$C = 1 / Dd \quad (11)$$

C: constante de mantenimiento del canal.

Dd: densidad de drenaje.

Tabla 6. Constante de mantenimiento del canal (C)

Valores	Clase
<0,2	Muy erosionable
0,2 – 0,3	Moderadamente erosionable
0,3 – 0,4	Moderadamente baja
0,4 – 0,5	Baja
>0,5	Muy baja

Fuente: Schumm, 1963; N. Singh et al., 2020

- **Pendiente media del cauce (J) (%)**. Se deduce a partir del desnivel topográfico sobre el cauce principal (HCmax-HCmin) y la longitud del mismo (L). Se expresa en porcentaje.

$$J = ((HC_{max} - HC_{min}) / L) * 100\% \quad (12)$$

J: pendiente media del cauce en %.

HCmax: elevación máxima del cauce principal en msnm.

HCmin: elevación mínima del cauce principal en msnm.

L: longitud del cauce principal en m.

- **Orden de cauce**. Para la determinación del orden de cauce se empleó el método Strahler (1964) el cual asigna orden 1 a un curso que carece de tributarios, orden 2 es formado por la confluencia de dos cursos de orden 1 y orden 3 es formado por la confluencia de uno o varios afluentes de segundo orden, pero puede recibir directamente afluentes de primer orden; así sucesivamente se llega al orden más elevado, que debe corresponder al cauce principal de la cuenca.
- **Número de cauces (Nu)**. Refiere a la cantidad total de cauces dentro de la cuenca.
- **Coefficiente de torrencialidad (Ct)**. Relaciona el número de cursos de orden 1 con la superficie de la cuenca. A mayor número de cursos de primer orden y menor superficie se incrementa la torrencialidad de la cuenca, debido a que los cursos de primer orden son de génesis erosiva. Esta relación es un indicador de la erodabilidad lineal y la capacidad de descarga de una cuenca (Camino et al., 2018).

$$Ct = Nu1 / A \quad (13)$$

Ct: coeficiente de torrencialidad.

Nu1: número de cursos de primer orden.

A: área de la cuenca en km².

- **Frecuencia de cauce (Fs) (# cauces / km²).** Es el cociente entre la cantidad de cauces (Nu) y el área de la cuenca (A) (Ecuación 14). Un valor alto de Fs está caracterizado por escasa vegetación, superficie escarpada, sustrato impermeable que genera alta escorrentía superficial (Rajasekhar et al., 2020).

$$Fs = Nu / A \quad (14)$$

Fs: frecuencia de cauce.

Nu: número total de cauces.

A: área de la cuenca en km².

Tabla 7. Frecuencia del cauce (Fs)

Valores	Clase
0 – 5	Baja
5 – 10	Moderada
10 – 15	Moderadamente alta
15 – 20	Alta
20 – 25	Muy alta

Fuente: Horton, 1945; Singh et al., 2020

- **Textura de drenaje (T) (km*#cauce / km²).** Es el producto de multiplicar la densidad de drenaje (Dd) por la frecuencia de cauce (Fs). Según Horton (1945), es una medida del espacio entre canales. La textura del drenaje depende del clima, las precipitaciones, el tipo de roca y suelo, la capacidad de infiltración, el relieve y el estado de desarrollo del drenaje (Smith, 1950). Las rocas débiles producen una textura fina, mientras que las rocas duras desarrollan una textura gruesa. La escasa vegetación de un clima árido provoca el desarrollo de texturas finas que las que se desarrollan en rocas similares, pero en clima húmedo (Rajasekhar et al., 2020).

$$T = Dd * Fs \quad (15)$$

T: textura de drenaje (km*#cauce / km²).

Dd: densidad de drenaje en km/km².

Fs: número de cauces por km².

Tabla 8. Textura de drenaje (T)

Valores	Clase
<2	Muy gruesa
2 – 4	Gruesa
4 – 6	Moderada
6 – 8	Fina
>8	Muy fina

Fuente: Arulbalaji y Padmalal, 2020

- **Tiempo de concentración (Tc).** Es el tiempo que tarda el flujo superficial en contribuir al caudal de salida, desde el punto más alejado hasta la desembocadura de la cuenca relacionándose directamente con la forma de la cuenca (Chow et al., 1994; Gaspari et al., 2009).

La Figura 9 representa a un hidrograma para una tormenta conocida expresando, además, los tiempos que lo definen, donde Tb es el tiempo base es decir el intervalo comprendido entre el inicio y fin del escurrimiento, Tc-1 corresponde al tiempo de concentración (Tc), definido como el tiempo entre el final de la precipitación efectiva y el final de la escorrentía superficial directa (C). El tiempo de retardo (Tr-1) es el tiempo transcurrido entre el centroide del hietograma y centroide del hidrograma de escorrentía, que, también se lo considera como el tiempo entre el centroide del hietograma y el caudal punta (B), Tp se considera como el intervalo transcurrido entre el inicio de la lluvia efectiva y el caudal punta (Vélez y Botero, 2010).

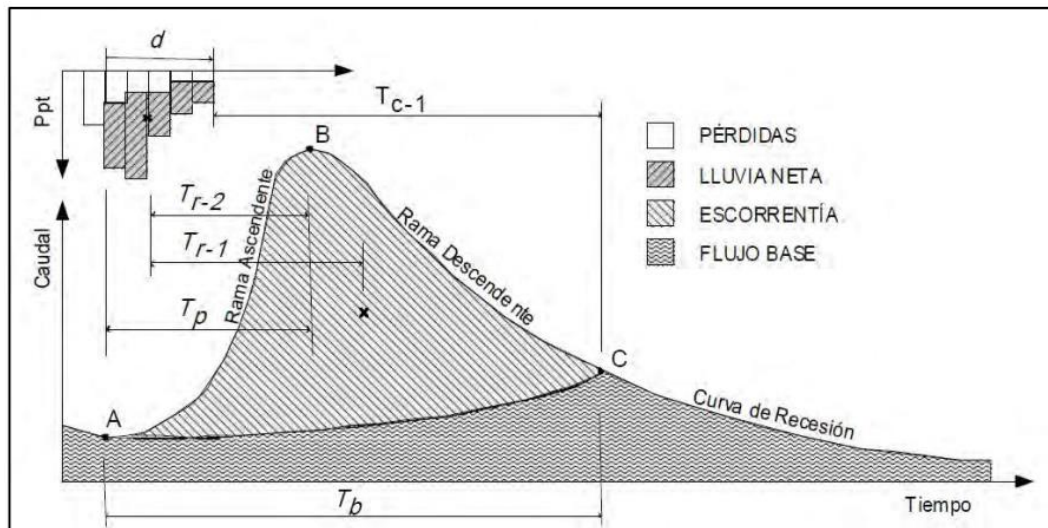


Figura 9. Tiempos característicos en un hidrograma.

Fuente: Vélez y Botero (2010).

Existen varias ecuaciones que permiten determinar el tiempo de concentración. Es importante mencionar que el tiempo de concentración se puede calcular en minutos (t_c) y en horas (T_c). De acuerdo a las características de la cuenca en estudio y como resultado de la investigación realizada por Vélez y Botero (2010) en la que comparan valores de tiempo de concentración de ecuaciones con observaciones en una cuenca experimental, se decidió seguir su recomendación de considerar adecuado hacer uso del promedio de la mayor cantidad de ecuaciones empíricas para calcular el tiempo de concentración, de tal forma que se reduzca la incertidumbre asociada. Para el presente trabajo de tesis se empleó el valor promedio como resultado de calcular las diez ecuaciones más citadas en trabajos analizados, que se muestran en la Tabla 9:

Tabla 9. Tiempo de concentración.

Unidades	Ecuación	Referencia
min	$14,6 * L / (A^{0,1} * J^{0,2})$	Bransby (1922)
min	$60 * [0,87075 * L^3 / H]^{0,385}$	California Department of Public Works. (1960)
hora	$0,335 * [A / J^{0,5}]^{0,593}$	Clark (1945)
hora	$4 * A^{0,5} + 1,5 * L / 25,3 * (J * L)^{0,5}$	Arbeláez et al. (1997)
min	$0,0078 * L_p^{0,77} / J^{0,385}$	Vélez y Botero (2010)
min	$[60 * n * L / H^{0,3}]$	Método racional generalizado (1987), Vélez y Botero (2010)
hora	$0,76 * A^{0,38}$	Pilgrim y McDermott (1982)
hora	$0,3 * [L / J^{0,25}]^{0,76}$	Témez (1991)
hora	$1,7694 * A^{0,325} / L^{0,096} * J_o^{0,29}$	Valencia y Zuluaga (1981)

Dónde:

tc: tiempo de concentración en minutos.

Tc: tiempo de concentración en horas.

L: la longitud del cauce principal en km y Lp en pies.

H: desnivel en m.

J: pendiente promedio del cauce principal en m/m.

J_o: pendiente promedio del cauce principal en %.

A: área de cuenca en km².

n: coeficiente de rugosidad del cauce.

- **Tiempo de retardo o Lag Time (Tlag).** En cuanto al tiempo de retraso o de rezago, el Servicio de Conservación de Estados Unidos propone que es 0,6 veces el Tc estimado (Gaspari et al., 2009).

$$Tr = 0,6 * Tc \quad (16)$$

Tlag: tiempo de retardo.

Tc: tiempo de concentración en horas.

Tabla 10. Resumen de los parámetros morfométricos a calcular.

	Parámetro	Símbolo	Unidad	Ecuación
Parámetros de forma	Área	A	km ²	
	Perímetro	P	km	
	Longitud axial	La	km	
	Factor de forma	Ff		A/La^2
	Diámetro	D	km	$(A/\pi)^{1/2} * 2$
	Relación de elongación	Re		D/La
	Relación de circularidad	Rc		$4 \pi A / P^2$
	Índice de compacidad de Gravellius	Kc		$0,284 * P/A^{0,5}$
Parámetros de relieve	Elevación máxima	Hmax	msnm	
	Elevación mínima	Hmin	msnm	
	Desnivel	H	km	$(H_{max} - H_{min})/1000$
	Pendiente media	PM	%	
	Relieve relativo	Rr		$H*100/P$
	Relación relieve	Rh		H/La
	Coefficiente de rugosidad	n		$H*Dd$
Parámetros de drenaje	Longitud de la red de drenaje	Lu	km	
	Densidad de drenaje	Dd	km/km ²	Lu/A
	Longitud del flujo terrestre	Lo	km	$Lo = 1 / (2 * Dd)$
	Constante de mantenimiento del canal	C	$1/km * km^2$	$1 / Dd$
	Longitud del cauce principal	L	km	
	Elevación máxima del cauce	Hmax	msnm	
	Elevación mínima del cauce	Hmin	msnm	
	Pendiente media del cauce principal	J	%	$((HC_{max} - HC_{min}) / L) * 100\%$
	Número de cauces	Nu		
	Número de cauces de primer orden	Nu1		
	Coefficiente de torrencialidad	Ct		$Nu1/A$
	Textura de drenaje	T	$km * \#cauce / km^2$	$Dd * Fs$
	Frecuencia de cauce	Fs	$\# cauces / km^2$	Nu/A
	Tiempo de retardo	Tlag	hora	$0,6 * Tc$

Fuente: adaptación de Guzmán et al., 2021.

Una vez que los parámetros morfométricos más importantes y recurrentes en diversos estudios han sido calculados, se evaluó si existe una conexión directa o inversa entre cada uno de ellos con la probabilidad a que la cuenca y microcuenca genere

inundaciones o erosión de suelo (Abdeta et al., 2020; Arulbalaji y Padmalal, 2020; Jothimani et al., 2020). En el caso de relaciones directas se asignó el rango 1 al máximo valor y el último rango al valor mínimo, la cantidad de rangos está dada por el número de subcuencas. Para las conexiones indirectas el proceso es inverso.

Posterior a la asignación de rangos, para cada subcuenca se calculó un valor promedio de los parámetros morfométricos (PCM), denominado parámetro compuesto para morfometría (PCm).

Finalmente, de acuerdo a los valores de PCM de las subcuencas se definieron los grados de priorización de acuerdo a su fragilidad dada por la morfometría. Los grados fueron alto, medio y bajo (López y Martínez, 2015) . Los rangos para la categorización se obtuvieron a partir de las ecuaciones:

$$\text{Intervalo grado alto} = \text{menor a } \left(\text{PCMmin} + \left(\frac{\text{PCMmax} - \text{PCMmin}}{3} \right) \right) \quad (17)$$

$$\text{Intervalos grado medio} = \text{PCMmin} + 2 * \left[\begin{array}{l} \text{PCMmin} + \left(\frac{\text{PCMmax} - \text{PCMmin}}{3} \right) \\ \left(\frac{\text{PCMmax} - \text{PCMmin}}{3} \right) \end{array} \right]$$

$$\text{Intervalo clase baja} = \text{mayor a } \left(\text{PCMmin} + 2 * \left(\frac{\text{PCMmax} - \text{PCMmin}}{3} \right) \right)$$

PCMmin: promedio mínimo de los parámetros morfométricos.
 PCMmax: promedio máximo de los parámetros morfométricos.

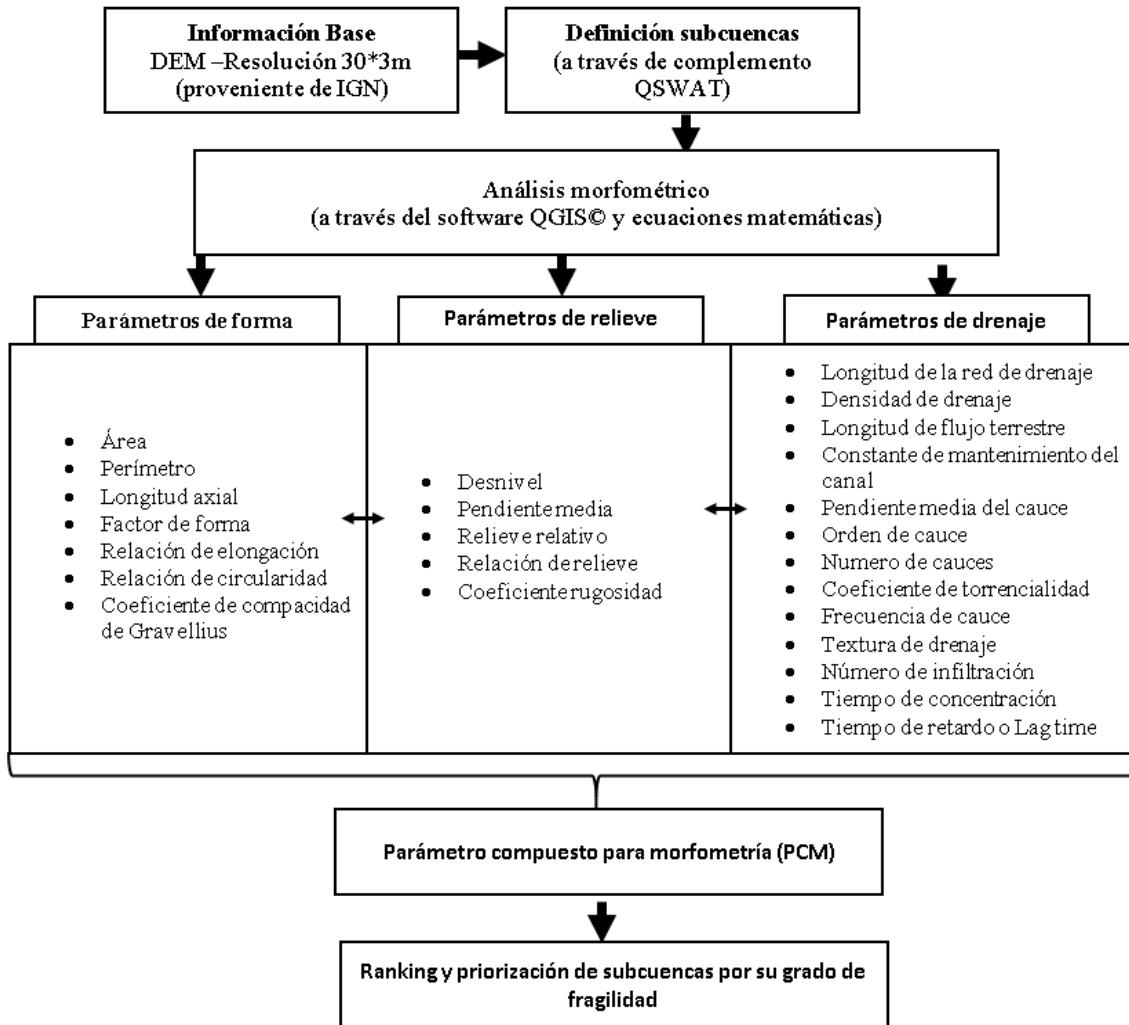


Figura 10. Diagrama de flujo de la metodología para análisis morfométrico de cuencas hidrográficas.

3.1.2. Variabilidad pluvial y térmica.

Conocer la distribución o variabilidad espacio temporal de la precipitación y temperatura es importante sobre todo en regiones semiáridas, en donde las precipitaciones son el principal factor condicionante de la productividad agrícola, además al ser zonas que presentan cambios bruscos que varían entre sequías intensas y periodos muy húmedos, hace necesario el monitoreo constante y análisis de estas variables ya sea para la predicción de eventos hidrometeorológicos como para la gestión de los recursos hídricos (Mendez Rivas, 2016; Ravelo y Santa, 2000).

En las últimas tres décadas la estimación satelital (Es) de variables climáticas se ha desarrollado significativamente tanto en resolución espacial como temporal y en su accesibilidad (Wang et al., 2021). En la actualidad se considera que este método de obtención de datos climáticos complementa a las mediciones tomadas por estaciones meteorológicas que generalmente tienen muy baja densidad y proporcionan mediciones puntuales que imposibilita observar la variabilidad espacial (Méndez Rivas, 2016; Gavilán et al., 2019;).

Debido a la baja densidad de estaciones meteorológicas en el área de estudio (Figura 11) y la falta de registros completos dentro del periodo de estudio, para el presente trabajo de tesis se empleó los productos satelitales de precipitación acumulada en mm (Banda "Pr"), temperatura mínima y máxima en °C (Bandas "tmmn" y "tmmx"), obtenidos a partir de la base de datos TerraClimate ("IDAHO_EPSCOR/TERRACLIMATE"), disponible en el catálogo de la plataforma Google earth engine (GEE). Se trata de una base de datos de clima mensual y balance hídrico superficial con alta resolución espacial (4638,3 m) a partir de las mediciones tomadas por WorldClim. La disponibilidad de datos comprende el período 01/01/1958 a 01/12/2020.

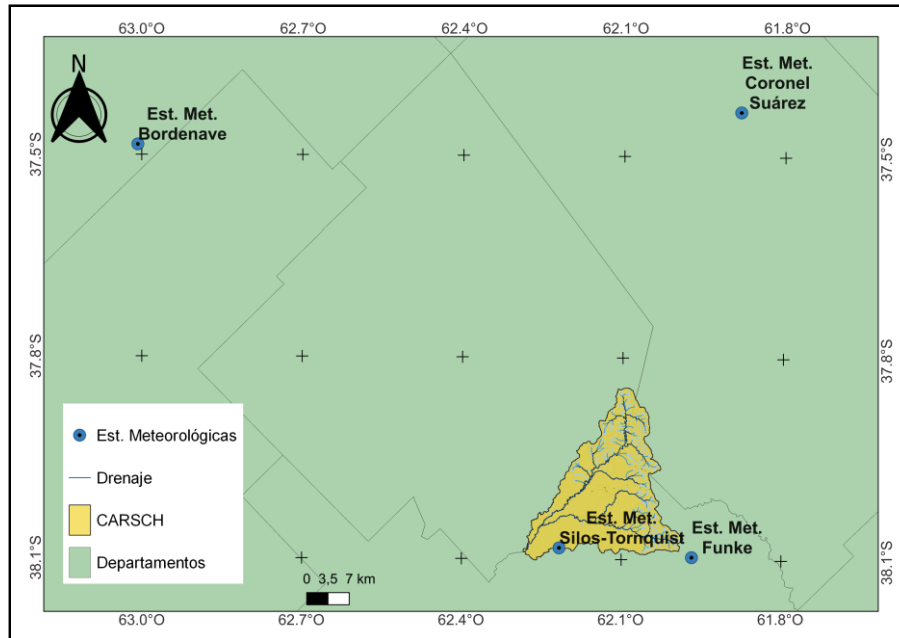


Figura 11. Localización de las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio.

A partir de la plataforma GEE se crearon series mensuales del punto grid correspondiente a la ubicación de las estaciones meteorológicas de las cuales se dispone datos. Las estaciones meteorológicas vecinas a la cuenca en estudio (en un radio de aproximadamente 90 km) correspondientes a las localidades de coronel Suárez, Tornquist y Bordenave monitoreadas por el Servicio Meteorológico Nacional, Fundación FUNKE e INTA).

Previo al análisis de la variabilidad pluvial y térmica se realizó una evaluación de las medidas estadísticas utilizadas en estudios similares (Feidas, 2010; Garay, 2021) como ser:

- Sesgo. Evalúa la diferencia media entre las estimaciones del producto satelital (*Es*) y la observada por los pluviómetros (*Obs*). El sesgo relativo puede ser positivo o negativo. Un sesgo negativo indica una subestimación de precipitación del satélite, mientras que un sesgo positivo indica sobreestimación.

$$\text{Sesgo} = \frac{1}{n} \sum (Es_{xi} - Obs_{xi}) \quad (18)$$

Es_{xi} : estimación satelital mensual.

Obs_{xi} : estimación mensual observada o medida por pluviómetro.

- Raíz del error cuadrático medio (RMSE). Muestra la magnitud típica del error de las estimaciones del satélite (*Es*) con las de los pluviómetros (*Obs*) con sensibilidad a los errores más grandes y así también a valores atípicos.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (Es_{xi} - Obs_{xi})^2}{n}} \quad (19)$$

RMSE: raíz del error cuadrático medio.

Es_{xi} : estimación satelital mensual.

Obs_{xi} : estimación mensual observada o medida por pluviómetro.

n: tamaño de la muestra.

- Coeficiente de correlación de Pearson (γ). Calcula el nivel de concordancia lineal entre las estimaciones y los pluviómetros. Un valor de $\gamma = 1$ indica correlación positiva perfecta. Si no existe correlación lineal o hay una correlación lineal débil (γ) es cercano a cero.

- Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffeff (NSE). Muestra la capacidad predictiva de las Es en relación con los Obs. Va desde menos infinito (capacidad baja) a 1.0 (predictividad perfecta) con el valor cero indicando que las estimaciones satelitales son tan precisas como la media observada.

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Es_{xi} - Obs_{xi})^2}{\sum(Obs_{xi} - \bar{X}_{obs})^2} \quad (20)$$

NSE: coeficiente de Nash-Sutcliffeff.

Es_{xi} : estimación satelital mensual.

Obs_{xi} : estimación mensual observada o medida por pluviómetro.

$\bar{X}_{Obs_{xi}}$: promedio de la estimación observada durante el periodo de estudio.

3.1.2.1. Anomalía pluvial.

Para la determinación de anomalías tanto de precipitación como temperatura la Organización Meteorológica Mundial (OMM) recomienda hacer uso de registros de datos de al menos 30 años (Torrero, 2009).

Para la identificación de anomalías de pluviosidad, se hizo uso de la metodología planteada por Alconada (2008) y Guzmán et al. (2009), que recomiendan la moda como una medida estadística representativa para identificar eventos climáticos extremos, ya que la moda por ser el valor más frecuente de lluvia, la vegetación se encuentra mejor adaptada a ella que al valor promedio y además tiene una probabilidad de ocurrencia entre 70 y 75%.

En efecto, la curva de frecuencia de precipitación es generalmente una curva asimétrica, que se acentúa al aumentar la aridez. Su valor más frecuente (moda), corresponde a la parte más alta de la curva, y no coincide con el promedio aritmético de la serie. Esto se acentúa en los meses o años secos por lo que los métodos estadísticos que deben emplearse para evaluar el comportamiento de la precipitación no pueden ser los de una distribución normal o gaussiana.

$$M_o = \bar{x} - \frac{s^2}{\bar{x}} \quad (21)$$

M_o : moda

\bar{x} : media aritmética.

s^2 : desviación estándar.

$$\text{Anomalías} = \frac{X_i - M_o}{M_o} * 100 \quad (22)$$

X_i : valor de precipitación.

M_o : moda.

La interpretación de las anomalías de precipitación se realiza con respecto a la tabla 11, que las clasifica en 7 rangos.

Tabla 11. Clasificación del tipo de año por su anomalía.

Anomalía (%)	Tipo de año
>100	Lluvioso al extremo
50-100	Muy lluvioso
25-50	Lluvioso
0-25	Normal
0-(-25)	Seco
-25-(-50)	Muy seco
>-50	Seco extremo

Fuente: Alconada (2008).

3.1.2.2. Anomalía de temperatura.

Para la identificación de anomalías de temperatura se aplicó la metodología propuesta por la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible de Andalucía (2021). Esta metodología se basa en considerar la anomalía térmica anual como la diferencia que existe entre la temperatura anual con respecto a la media de la serie histórica, a su vez la variación de la anomalía térmica anual a lo largo de la serie histórica se resume en el cálculo del índice de calentamiento global.

El procedimiento para el cálculo del índice de calentamiento global fue:

a) Cálculo de la anomalía media anual (AM)

$$AM_{(i)} = Tmed_{(i)} - Tmed \quad (23)$$

AM(i): anomalía media anual.

Tmed(i): temperatura media del año analizado.

Tmed: temperatura media anual de la serie.

b) Cálculo del incremento medio anual con respecto al año anterior.

$$IAM = AM_{(i)} + IAM_{(i-1)} \quad (24)$$

IAM(i): incremento acumulado medio.

AM(i): anomalía media anual.

IAM(i-1): anomalía media anual del año anterior.

c) Determinación del índice de calentamiento global.

$$IGC = \frac{AM_{(i)} + IAM}{2} \quad (25)$$

IGC: índice de calentamiento global.

AM(i): anomalía media anual.

IAM: incremento acumulado medio.

Para establecer tendencias estadísticamente significativas de la precipitación y temperatura con ayuda del software libre R se aplicó el test estadístico no paramétrico de Mann-Kendall (MK) considerado ideal para la detección de tendencias en series de datos climático (Alencar da Silva Alves y Silva Nóbrega, 2017). Al aplicar la prueba obtenemos como resultados los valores del estadístico de prueba de normalización (Z) que al ser positivo indica tendencia creciente y valores negativos indican tendencia decreciente. Para el presente trabajo de tesis se consideran tendencias significativas aquellas que tengan un nivel de confianza del 95% ($p < 0,05$). En el nivel de significación, la hipótesis nula se rechazó para un valor absoluto de Z mayor que el obtenido de las tablas de distribución acumulativa normal estándar (Vu y Mishra, 2016). Las clases de tendencia detectados por el valor de Z, se muestra en la Tabla 12:

Tabla 12. Tendencia a partir del valor de Z, para un nivel de confianza del 95%.

Valor de Z	Clase de tendencia
$Z > 1,96$	Creciente significativo
$0 < Z \leq 1,96$	Creciente, no significativa
$-1,96 \leq Z < 0$	Decreciente, no significativa
$Z < -1,96$	Decreciente, significativa

Fuente: Vu y Mishra (2016).

3.1.2.3. Balance hídrico climático.

El balance hídrico climático (BHC) permite identificar el régimen hídrico de un área (periodos de déficit y exceso de agua). El método más conocido y clásico para determinar el BHC es el propuesto por Thornthwaite y Mather en 1955. Para ello se parte del supuesto en que el suelo es un reservorio de agua que posee una capacidad de agua disponible o CAD, cuya recarga se realiza principalmente a través de la precipitación (PP), durante este proceso de recarga también existen pérdidas potenciales (demanda atmosférica) representadas por la evapotranspiración potencial (ETP) (Ruiz et al., 2012; Coral et al., 2015).

Generalmente este método se aplica a sitios puntuales en los que se encuentran localizados las estaciones meteorológicas, pero en este caso el cálculo será espacialmente distribuido en el área de estudio mediante la aplicación de herramientas GIS.

El procedimiento para el cálculo del BHC fue:

a) División en periodos.

El cálculo del BHC correspondiente a enero 1988 – diciembre 2018, se realizó anualmente considerando el año hidrológico, lo cual permitió la generación de 31 mapas que para fines didácticos y que a su vez demuestren la variabilidad del comportamiento pluvial observada en el área de estudio, se decidió reducir a 5, de tal forma que cada uno representa a un intervalo de 5 años.

b) Temperatura media mensual (Tm).

Los valores de temperatura promedio mensual se los obtuvo a partir de promediar los productos satelitales tmmn y tmmx descritos en el punto 3.1.2.

c) Evapotranspiración Potencial mensual (ETPm).

Según Thornthwaite (1948) la ETP es la evapotranspiración que se producirá si la humedad del suelo y la cubierta vegetal estuvieran en condiciones óptimas.

La ETP se basa en:

- 1) Cálculo del Índice de calor mensual (i):

$$i = \left(\frac{T_m}{5}\right)^{1,514} \quad (26)$$

i: índice de calor mensual.

T_m: temperatura media mensual en °C.

- 2) Cálculo del Índice de calor anual (I):

$$I = \sum i \quad (27)$$

I: índice de calor anual.

i: índice de calor mensual.

- 3) Cálculo de la evapotranspiración potencial mensual sin corregir (e):

$$e = 16 * \left(\frac{10 * T_m}{I}\right)^\alpha \quad (28)$$

e: evapotranspiración potencial mensual sin corregir.

T_m: temperatura media mensual en °C.

I: índice de calor anual.

$$\alpha : 0,000000675 * I^3 - 0,0000771 * I^2 + 0,01792 * I + 0,49239 \quad (29)$$

I: índice de calor anual.

- 4) Evapotranspiración potencial mensual corregida (ETP_m):

$$ETP_m = e * \frac{N}{12} * \frac{d}{30} \quad (30)$$

ETP_m: evapotranspiración potencial mensual corregida.

N: número máximo de horas de sol.

d: número de días del mes.

e: evapotranspiración potencial mensual sin corregir.

d) **Precipitación promedio mensual (P_m).**

Es la entrada de agua al BHC, está dada en mm y proviene del producto satelital Pr descrito en el punto 3.1.2. Si bien se identificaron establecimientos con riego dentro de

la zona de estudio, su representatividad espacial es muy baja en comparación con los tamaños de pixel de los productos satelitales de clima utilizados para el presente trabajo.

e) **Pérdida o adición potencial de agua en el suelo (PEP).**

$$PEP_m = P_m - ETP_m \quad (31)$$

PEP_m: pérdida o adición potencial mensual de agua en el suelo.

P_m: precipitación promedio mensual.

ETP_m: evapotranspiración potencial mensual corregida.

$$PEP_{\text{anual}} = \sum PEP_m \quad (32)$$

PEP_{anual}: pérdida o adición potencial anual de agua en el suelo.

PEP_m: pérdida o adición potencial mensual de agua en el suelo a escala anual.

Este parámetro permite identificar los meses secos y húmedos en el año. Definir el mes que da inicio al periodo seco es importante ya que de ahí parte la contabilidad del almacenamiento de agua en (ARM).

Además, se puede determinar la pérdida potencial acumulada anual a través de la suma de los valores negativos de PEP_m (SUMPEP-) y la potencial adición anual dada por la suma de los valores positivos mensuales de PEP_m (SUMPEP+).

f) **Capacidad de agua disponible (CAD).**

Representa la cantidad de agua en mm/m que el suelo puede retener, considerando únicamente el primer horizonte. Esta función está dada principalmente por el sistema radicular y la textura del suelo. Estos valores están dados a partir de tablas generadas por Martínez et al. (2013).

Tabla 13. Capacidad de almacenamiento de agua según textura de suelo y tipo de cobertura.

Tipo de cobertura	Textura de suelo	Capacidad de campo (agua utilizable) (mm/m)	Profundidad de las raíces en el suelo (m)	Capacidad de retención (agua disponible) (mm)
Cultivos de raíces someras	Arenoso fino	100	0,5	50
	Franco arenoso fino	150	0,5	75
	Franco limoso	200	0,62	125
	Franco arcilloso	250	0,4	100
	Arcilloso	300	0,25	75
Cultivos de raíces de profundidad moderada (cereales)	Arenoso fino	100	0,75	75
	Franco arenoso fino	150	1	150
	Franco limoso	200	1	200
	Franco arcilloso	250	0,8	200
	Arcilloso	300	0,5	150
Cultivos de raíces profundas (praderas, arbustos)	Arenoso fino	100	1	100
	Franco arenoso fino	150	1	150
	Franco limoso	200	1,25	250
	Franco arcilloso	250	1	250
	Arcilloso	300	0,67	200
Árboles frutales (arbolado)	Arenoso fino	100	1,5	150
	Franco arenoso fino	150	1,67	250
	Franco limoso	200	1,5	300
	Franco arcilloso	250	1	250
	Arcilloso	300	0,67	200
Bosque cerrado	Arenoso fino	100	2,5	250
	Franco arenoso fino	150	2	300
	Franco limoso	200	2	400
	Franco arcilloso	250	1,6	400
	Arcilloso	300	1,17	350

Fuente: Martínez et al. (2013).

g) Agua almacenada en el suelo (ARM).

La variable ARM permite calcular el agua almacenada en el suelo. El cálculo de esta variable inicia al finalizar la estación húmeda, ya que supone que el suelo ha acumulado la mayor cantidad de agua. Los ARM dependen de la entrada (P) y salida de agua (ETP).

Para el cálculo de ARM inicial se hacen las siguientes condicionales, considerando que las variables que aquí se toman en cuenta han sido calculadas en los ítems anteriores:

1. Si $PEP_{anual} \geq CAD$, entonces $ARM = CAD$.
2. Si $PEP_{anual} < CAD$ y $SUMPEP+ \geq CAD$, entonces $ARM = CAD$.
3. En caso de no cumplirse lo anterior:

$$ARM \text{ inicial} = \frac{SUMPEP+}{1 - \exp \frac{SUMPEP-}{CAD}} \quad (33)$$

CAD: capacidad de agua disponible

ARM inicial: agua inicial almacenada en el suelo.

SUMPEP+: refiere a la adición potencial de agua acumulada en el año.

SUMPEP-: refiere a la pérdida potencial de agua acumulada en el año.

A partir del cálculo del ARM inicial, empieza un proceso iterativo para calcular los ARM mensuales subsecuentes (ARM_m) hasta llegar al mes de inicio del balance. Para esta parte se debe tomar en cuenta las siguientes condicionales:

1. Si $PEP_m < 0$, entonces:

$$ARM_m = ARM_{m-1} \frac{PEP_m}{e^{CAD}}$$

ARM_m : cantidad de agua mensual almacenada en el suelo.

m: es el mes del cual se está realizando el cálculo.

m-1: mes anterior a m.

2. Si $PEP_m < 0$ y $ARM_{m-1} + PEP_m \geq CAD$, entonces $ARM = CAD$.
3. En caso de no cumplirse $ARM_m = ARM_{m-1} + PEP_m$

h) Alteración mensual del almacenamiento de agua (ALT_m).

Refiere a la reposición o disminución de agua de un mes al subsiguiente, representado por la variación del ARM en un mes (ARM_m) y el ARM de mes siguiente (ARM_{m+1}).

$$ALT_m = ARM_m - ARM_{m+1} \quad (34)$$

Si $ALT < 0$ entonces hay “retirada de agua”

Si $ALT > 0$ hay “reposición de agua”

ALT_m: alteración mensual del almacenamiento de agua.

ARM_m: agua almacenada en el suelo durante un mes.

ARM_{m+1}: agua almacenada en el suelo durante el mes siguiente.

i) Evapotranspiración real mensual (ETR_m).

Para calcular la ETR_m se debe tomar en cuenta las siguientes condiciones:

1. Si $P_m > ETP_m$, entonces:

$$ETR_m = ETP_m \quad (35)$$

ETR_m: evapotranspiración real mensual.

ETP_m: evapotranspiración potencial mensual corregida.

2. Si $P_m < ETP_m$, entonces:

$$ETR_m = P_m - ALT_m \quad (36)$$

ETR_m: evapotranspiración real mensual.

P_m: precipitación promedio mensual.

ALT_m: alteración mensual del almacenamiento de agua.

j) Deficiencia hídrica mensual (DEF_m)

Representa el déficit de agua (DEF). Esta dada por la ecuación:

$$DEF_m = ETP_m - ETR_m \quad (37)$$

DEF_m: deficiencia hídrica mensual.

ETP_m: evapotranspiración potencial mensual corregida.

ETR_m: Evapotranspiración real mensual.

k) Exceso hídrico mensual (EXC_m)

Para calcular el excedente de agua se basa en la siguiente condición:

Si $ARM = CAD$, entonces $EXC_m = PEP_m - ALT_m$

Si $ARM \neq CAD$, entonces $EXC_m = 0$

l) Representación en SIG del BHC.

Finalmente se estableció la distribución espacial del BH en el área de estudio al combinar los mapas de excedente (EXC) y déficit (DEF) hídrico para los 12 meses del año.

$$BH = EXC_m - DEF_m \quad (38)$$

BH: balance hídrico.

EXC_m: exceso hídrico mensual.

DEF_m: deficiencia hídrica mensual.

3.1.3. Uso de suelo.

Los cambios en el uso/coertura de la tierra alteran procesos biológicos, geoquímicos y físicos que intervienen al ciclado de nutrientes, la calidad del agua de los ríos, además mejoran la protección y mitigación de inundaciones.

Para la identificación espacio-temporal de los principales usos de suelo en la CARSCH y posterior detección de cambios se empleó la plataforma de acceso libre Google Earth Engine que ofrece un amplio catálogo de información satelital y permite el análisis geoespacial en base web y entorno automatizado (Céliz y Maidana, 2019).

El tipo de clasificación empleada fue de tipo supervisada mediante el algoritmo Random Forest (RF), considerado como el más óptimo por revisión bibliográfica y pruebas realizadas anteriormente frente a otros clasificadores como Support Vector Machine (SVM) y Cart. Las imágenes utilizadas fueron de la colección "LANDSAT/LT05/C01/T1_TOA" de LANDSAT 5 TM para las campañas abril 1988 – marzo 1989 y abril 2005- marzo 2006 y la colección "LANDSAT/LC08/C01/T1_TOA" de LANDSAT 8 OLI para la campaña abril 2017-mazo 2018, calibradas a tope de la atmosfera y adquiridas entre los meses de mayo – julio, correspondiente a los meses más secos y de menor cobertura nubosa, por lo cual se contaba con disponibilidad de imágenes satelitales de calidad para los análisis requeridos. A partir de las imágenes satelitales se creó un stack que comprendía el índice espectral SAVI a escala mensual y NDVI para toda la campaña.

Para establecer los puntos de muestreo de cobertura vegetal y uso del suelo en mayo de 2018 se relevaron a campo 50 puntos de control con GPS, considerando su

representatividad y procurando que estén ubicados en parches homogéneos (áreas que tienen el mismo valor de pixel). En estos puntos se estableció el tipo de cobertura/uso de suelo identificadas. Para los años 2005 y 1988 los puntos de muestreo se generaron en gabinete, relacionando la información obtenida de campo con los valores de índice normalizado de vegetación (NDVI) e interpretación visual debido a su respuesta espectral. En julio de 2021 en una segunda campaña se corroboró y corrigió los resultados obtenidos con ayuda de técnicos del INTA Tornquist, donde se identificaron los valores de clasificación del pixel con los valores obtenidos a campo.

A partir de los puntos de control obtenidos se generaron polígonos buffer y se amplió la base de datos a 40 puntos por cobertura. Para la clasificación, el set de datos fue dividido aleatoriamente en dos conjuntos de tamaño correspondiente al 85% del total de datos de entrenamiento, Este procedimiento permitió garantizar que los dos conjuntos de datos tengan la misma proporción de cada clase identificada (Thanh Noi y Kappas, 2017).

3.1.3.1. Índice de pérdida de suelo por erosión hídrica superficial.

La erosión hídrica superficial es una forma de degradación de las cuencas, ya que se define como la cantidad de suelo removido por las gotas de lluvia o escurrimiento superficial (Gaspari et al., 2009). Una herramienta para estimar la pérdida de suelo es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) que permite obtener tasas de erosión para varios sistemas de uso y manejo en unidades de tierra.

El modelo USLE () o Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Figura 12) formulado por Wischmeier y Smith (1965), es un modelo paramétrico que estima la pérdida promedio anual de suelo (A). Utiliza información sobre precipitación (R), suelo (K), pendiente del terreno (LS), y de uso y manejo del suelo (C - P) y combina la información proveniente de la investigación relacionada con la erosión hídrica.

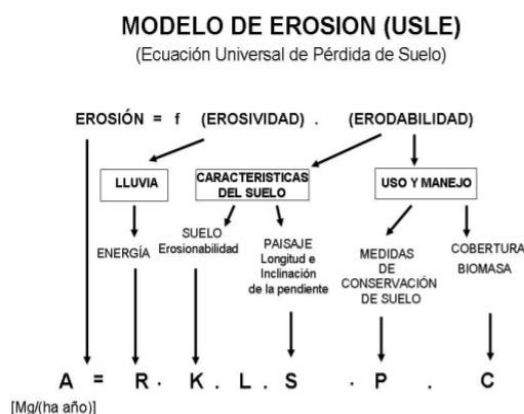


Figura 12. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).

Fuente: Gaspari et al., 2013

Se estimaron cada uno de los parámetros que intervienen en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) según los procedimientos detallados a continuación:

a) **Factor de erosividad de la lluvia (R, $J \cdot cm \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)**

Para una sola tormenta el factor R es el producto de la energía cinética total (E) multiplicada por la intensidad de lluvia máxima en 30 minutos (I30). El factor R para un periodo de tiempo y un lugar específico se calcula como el promedio de E-I30 anual (Wischmeier, 1959).

Determinar el valor del factor R requiere de la disponibilidad de un registro continuo de la precipitación con una resolución temporal de 15 minutos, situación que en el área de estudio se dificulta por la densidad de estaciones meteorológicas y escasa disponibilidad de datos.

Como alternativa a la falta de información pluviométrica se decidió utilizar la metodología planteada por Crettaz et al. (2016) y Hernando y Romana (2016). Esta metodología se basa en:

1. Disponer de series completas de precipitación mensual del periodo de estudio 1988-2018. Para el presente estudio se empleó estimaciones satelitales a escala mensual provenientes del modelo 'IDAHO_EPSCOR/TERRACLIMATE'.
2. Estimar la erosividad de la lluvia a partir del índice modificado de Fournier (IMF) propuesto por Arnoldus (1980).

$$IMF = \frac{\sum P_i^2}{P} \quad (39)$$

IMF: índice modificado de Fournier.

P_i : es la precipitación acumulada mensual (mm).

P: precipitación acumulada anual (mm).

3. Promediar los valores anuales de IMF, para obtener un único valor para el periodo de estudio.

4. El cálculo de los valores del factor R, se basa en reemplazar variables en la ecuación de correlación entre valores de IMF y factor R calculados a partir de registros pluviométricos. En este caso se hizo uso de la ecuación de correlación obtenida por la estación experimental de INTA en Paraná (Crettaz et al., 2016). Los resultados alcanzados fueron corroborados con bibliografía antecedente como ser Irurtia et al. (2007).

$$R = 13,612 * (IMF ^ 0,77) \quad (40)$$

R: factor de erosividad de la lluvia ($J * cm * m^{-2} * h^{-1}$).

IMF: índice modificado de Fournier.

b) Factor de erodabilidad del suelo ($K, Mg * m^2 * h * ha^{-1} * J^{-1} * cm^{-1}$)

Es el factor que mide la susceptibilidad del suelo a la erosión de acuerdo a ciertas propiedades como textura, contenido de carbono orgánico, estructura y permeabilidad (Wischmeier, 1959).

$$100 * K = 10^{-4} * 2,71 * M^{1,14} * (12 - a) + 4,20 * (b - 2) + 3,23 * (c - 3) \quad (41)$$

$$100 * K = 10^{-4} * 2,1 * M^{1,14} * (12 - a) + 3,25 * (b - 2) + 2,5 * (c - 3)$$

K: factor de erodabilidad del suelo.

M: (% limo + % arena muy fina) * (100 - % arcilla), expresándose también como: (% partículas entre 0,002 y 0,1 mm) * (% partículas entre 0,002 - 2,0 mm)

a: Porcentaje de materia orgánica = Porcentaje de Carbono Orgánico * 1,724.

b: Indica la estructura del suelo.

1. Gránulo muy fino y grumo muy fino (< 1 mm)
2. Gránulo fino y grumo medio (1 - 2 mm)
3. Gránulo medio, grumo medio (2 - 5 mm) y gránulo grueso (5 - 10 mm)
4. Gránulo liso, prismático columnar y muy grueso (> 10 mm).

c: Clase de permeabilidad del perfil del suelo según Soil Survey Manual del U.S.D.A

1. Rápida o muy rápida
2. Moderadamente rápida
3. Moderada
4. Moderadamente lenta
5. Lenta
6. Muy lenta

Las variables contenidas en la ecuación 21 se estimaron a partir de la información edafológica de la carta de suelos en escala 1:50 000, formato shape file, suministrado por el Instituto de Suelos del INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) y la descripción de los grupos edáficos que se encuentra disponible en la página <http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/index.html>.

c) Factor de longitud e inclinación de la pendiente (LS)

Este factor expresa el efecto que tiene la pendiente sobre la pérdida de suelo por acción de la escorrentía. La determinación de este factor se realiza a partir del modelo digital de elevación (DEM), con resolución espacial de 30 m y 3 m vertical. La descarga del DEM se realizó de la Plataforma Earth Explorer©, perteneciente a la NASA (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

d) Factor de cultivo (C).

Para la estimación del factor C se consideraron las coberturas que se muestran en la Tabla 14, y en los mapas de cobertura y uso de suelo elaborados. Los valores del factor C fueron tomados del libro “Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina” (Gaitán, 20179 y del software Erosión hídrica USLE-RUSLE Argentina.

Tabla 14. Factor de cultivo C.

Tipo de rotación	Factor C
Pradera Vieja (baja cobertura)	0,0584
Pradera Permanente año 0	0,0252
Pradera Permanente año 1	0,0134
Verdeo Invierno	0,09
Rotaciones de cultivos bajo sistema de siembra directa	0,102
Bosques naturales abiertos	0,010
Asentamientos humanos	0,005

Fuente: Gaitán et al., 2017; Mastache y González, 2018

Para el caso de cobertura natural como pastizal, el valor del factor C, se estimó a partir de una transformación del Índice de vegetación normalizado (NDVI), mediante la ecuación de Van der Knijff, Jones, y Montanarella (2000):

$$C = \exp\left(-\alpha * \left(\frac{NDVI}{\beta - NDVI}\right)\right) \quad (42)$$

C: factor C de cobertura del suelo.

α : de valor de 2, de acuerdo con Behrends Kraemer et al., (2018).

β : de valor de 1, de acuerdo a Behrends Kraemer et al., (2018).

NDVI: índice de vegetación normalizado.

e) Factor de prácticas de manejo conservacionista (P).

Este factor hace referencia a prácticas de manejo conservacionista en área agrícolas principalmente. Estas pueden ser cultivos en terraza, curvas de nivel, etc. Para el caso de estudio las áreas con prácticas conservacionistas fueron delimitadas de forma manual por interpretación visual de imágenes satelitales y visitas a campo. Este factor toma valores de 0 a 1, siendo 1 lotes o zonas sin prácticas de conservación, para los lugares que presentan medidas de conservación se toma como referencia los valores descritos en Gaspari et al. (2013).

3.1.4. Construcción del índice de vulnerabilidad hidrológica.

Una vez que se estableció y calculó los índices que describen la fragilidad del área de estudio dada por sus características morfológicas y los índices que describen a la variabilidad climática y el uso/cobertura de suelo de la CARSCH y sus subcuencas. En todo momento conservando la lógica entre los distintos índices y sus respectivos indicadores (Càceres, 2001; Araya y Calvo, 2017; CEPAL, 2019).

3.1.4.1. Normalización.

La normalización de los valores de las variables que intervienen en el cálculo de un índice, permite que los datos que intervienen sean comparables (adimensionales) especialmente cuando existe una variedad de unidades de medida debido a la combinación de múltiples indicadores. Para ello se debe realizar una estandarización, en este caso se usará la técnica de Puntaje Omega que transforma los datos de los índices e indicadores llevándolos a un rango de medición comprendido entre 0 y 1, valores que corresponden a los datos mínimos y máximos, respectivamente (Daga, 2014; Cabral y Zulaica, 2015; Humacata, 2015).

$$VE = \left(1 - \frac{(M-d)}{(M-m)} \right) \quad (43)$$

VE: valor estandarizado

d: valor a ser estandarizado

M: mayor valor del indicador

m: menor valor del indicador

Debido a la forma en que se distribuyen las escalas de los diferentes índices calculados el proceso de normalización se aplicó al ICG y USLE.

Para el caso de la anomalía pluvial e índice morfométrico (nivel de priorización morfométrica), por su escala de referencia se tomó los siguientes valores para el cálculo del IVH:

Tabla 15. Valor de referencia para el cálculo del IVH.

Anomalía (%)	Tipo de año	Valor en IVH	Nivel de priorización morfométrica	Valor en IVH
>100	Lluvioso al extremo	0,99	Alta	0,99
50-100	Muy lluvioso	0,66		
25-50	Lluvioso	0,33	Media	0,66
0-25	Normal	No se considera como factor de vulnerabilidad		
0-(-25)	Seco	0,33	Baja	0,33
-25-(-50)	Muy seco	0,66		
>-50	Seco extremo	0,99		

3.2. Comprobación de hipótesis.

Para establecer la influencia del cambio de uso del suelo sobre la vulnerabilidad hidrológica se tomó como variable independiente e indicador del cambio de uso del suelo al IPSE (índice de provisión de servicios ecosistémicos).

Para determinar el nivel de correlación y su significancia se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (CCP) entre la variable dependiente de Índice de vulnerabilidad hídrica vs IPSE como variable independiente.

3.2.1. Índice de Provisión de Servicios Ecosistémicos (IPSE) como indicador de uso de suelo.

El NDVI toma valores comprendidos entre 0 y 1. Valores cercanos a 0 significan que no existe vegetación, ya que hay baja reflectancia en longitudes de onda correspondientes al rojo (debido a la absorción por parte de la clorofila); mientras valores cercanos a 1 implican mayor densidad de vegetación y actividad fotosintética por una alta reflectancia en la porción del infrarrojo cercano (debido a la estructura del mesó filo de las hojas).

Los atributos funcionales de NDVI utilizados para definir el IPSE fueron el NDVI-I que es el indicador de la absorción de la energía fotosintéticamente activa absorbida por la cobertura vegetal, y el coeficiente de variación intra-anual del NDVI (NDVI_{cv}) como descriptor de la variabilidad. Para su determinación se aplicó la ecuación 44 (Paruelo et al., 2016).

$$IPSE = NDVI - I * (1 - NDVI_{cv}) \quad (44)$$

IPSE: índice de provisión de servicios ecosistémicos.

NDVI-I: NDVI promedio anual.

NDVI_{cv}: coeficiente de variación anual del NDVI.

3.2.2. Coeficiente de correlación de Pearson (r).

Es una métrica estadística, que mide la fuerza y la dirección de una relación lineal entre dos variables aleatorias. El CCP tiene un rango de +1 (correlación perfecta) a -1 (correlación perfecta pero negativa), valores de 0, denotan ausencia de una relación (Adler y Parmryd, 2010).

$$r = \frac{\sum xy}{\sqrt{(\sum x^2)(\sum y^2)}} \quad (45)$$

r: coeficiente de correlación de Pearson.

x: variable independiente, para este caso IPSE.

y: variable dependiente o IVH.

Para calcular espacialmente el CCP, se aplicó la ecuación 45 mediante el uso de la calculadora de ráster del software QGIS 3.22.8.

3.2.2.1. Test de significancia del coeficiente de correlación de Pearson.

Después de calcular el valor del CCP, es de interés determinar si el valor obtenido representa la relación de causalidad entre las variables o es consecuencia del azar (Hernández et al., 2018; Isaac y Chikweru, 2018).

La significancia de la relación entre variables está representada por niveles de probabilidad (p) de ocurrencia de un coeficiente de correlación. Al probar la importancia del coeficiente de correlación, tendremos dos hipótesis posibles (Hernández et al., 2018; Isaac y Chikweru, 2018):

Hipótesis nula H₀: r = 0. Establece que el coeficiente de correlación de la población de la cual proviene la muestra es cero.

Hipótesis alternativa H₁: r ≠ 0. Establece que el coeficiente de correlación de la población de la cual proviene la muestra sería diferente de cero.

El test de significancia empleado fue t-distribución. La ecuación para calcular el valor t-valor es:

$$t = \frac{r - 0}{\sqrt{\frac{1 - r^2}{N - 2}}} \quad (46)$$

t: t-valor, requerido para el test de significancia.

r: coeficiente de correlación de Pearson.

N: tamaño de la muestra.

El valor de t calculado se compara con el existente en tablas para un cierto nivel de significancia (α , que en este caso es de 0,05 para un 95% de confianza) y N-2 grados de libertad. De esta forma:

$t > t(\alpha, N-2) \Rightarrow$ se rechaza la hipótesis nula. Por lo tanto, las variables están correlacionadas.

$t \leq t(\alpha, N-2) \Rightarrow$ Se acepta la hipótesis nula, por lo tanto, las variables no están relacionadas.

Los estadísticos de correlación y significancia espacio-temporal, presentaron muchas dificultades para ser calculados a través de algún complemento en los SIG, o en el software R. Por lo cual se optó por generar una grilla de 1km de resolución y partir de su centroide, generar 352 puntos de muestreo. A partir del shape de puntos creado se extrajo los valores de IVH e IPSE anual (1989-2018), con esta base de datos, mediante, el programa statgraphics se determinó para cada punto los estadísticos de correlación lineal del periodo 1989 – 2018.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1. Creación del modelo de vulnerabilidad.

En base a la revisión bibliográfica analizada en el ítem 3.1. la vulnerabilidad hidrológica es considerada como la expresión de la fragilidad de la cuenca hidrográfica, al ser influenciada por factores como el cambio de uso de suelo y la variabilidad climática. La construcción del índice de vulnerabilidad hidrológica (VH), implicó definir y calcular indicadores que demuestren el concepto adoptado. Luego de estandarizar los indicadores calculados (ítem 3.1.4.1.), se obtuvo la ecuación 47, que permite el cálculo de la VH.

$$\begin{aligned} \text{VH} &= \text{Fragilidad} * \text{Variabilidad Climática} * \text{Uso de suelo} \quad (47) \\ \text{VH} &= \underbrace{\text{IM}} * \underbrace{\text{AP} * \text{ICG}} * \underbrace{\text{USLE}} \end{aligned}$$

VH: vulnerabilidad hidrológica.

IM: Índice morfométrico.

AP: Anomalía pluvial.

ICG: Índice de calentamiento global.

USLE: Índice de pérdida de suelo.

IES: Índice de escurrimiento superficial.

IPSE: Índice de provisión de servicios ecosistémicos.

Para una mejor caracterización y detalle de la variabilidad temporal en la vulnerabilidad hidrológica, el período de estudio que comprende de 1988 a 2018 (31 años), fue dividido en 5 periodos de 6 años cada uno y el final de 7. Esta división se realizó en el cálculo de todos los indicadores con excepción de la fragilidad.

4.1.1. Fragilidad.

4.1.1.1. Índice morfométrico.

Para una mejor caracterización e identificación de la variabilidad espacial de la fragilidad debido a la morfometría, la CARSCH fue dividida en 9 subcuencas que se muestran en la Figura 13. Como resultado de procesar el DEM, mediante el complemento QSwat.

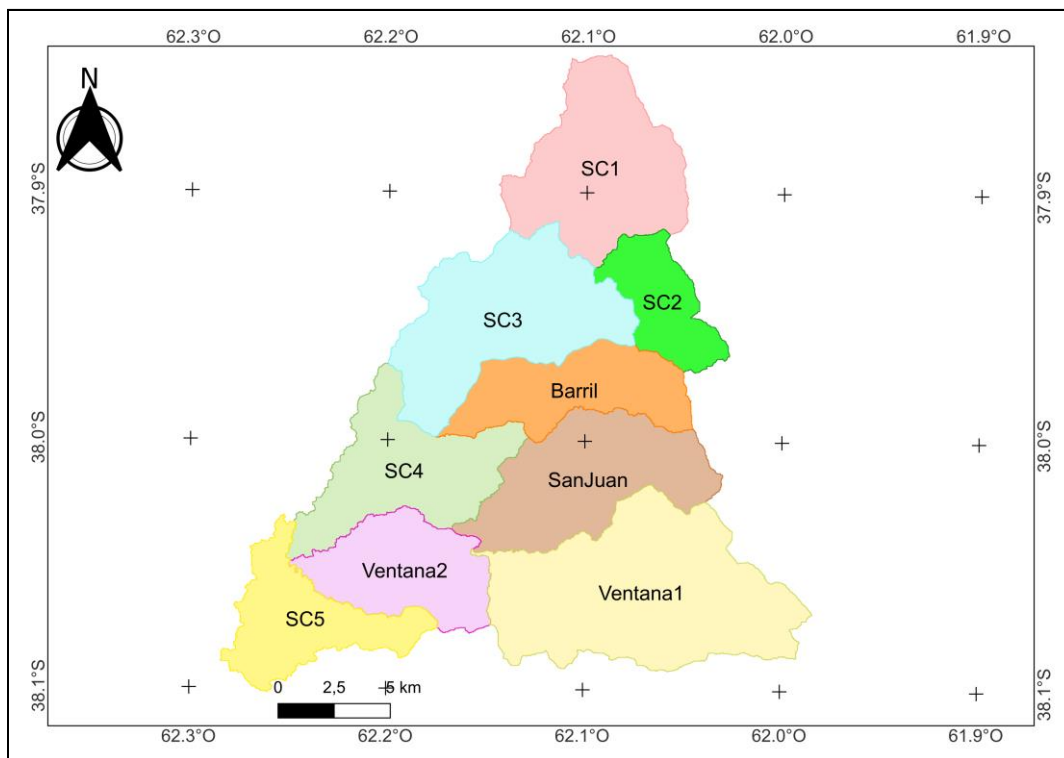


Figura 13. Subcuentas de la cuenca alta del Río Sauce Chico

La CARSCH tiene una superficie de 365,61 km², de forma alargada – triangular, con dos vértices en las cabeceras, generando efluentes de longitud similar, que pueden provocar crecidas significativas (Gaspari, 2007; Cruz Romero et al., 2015; Guzmán et al., 2021). La CARSCH presenta elevaciones comprendidas entre 254 a 1.112 msnm, con una pendiente media de 16,6%. El procesamiento geoespacial del DEM, permitió definir la divisoria de aguas superficial y definir la red de drenaje dendrítico de orden 5, con orientación norte – sur sobre un eje y el otro este – oeste. Según Delgadillo y Páez (2008) la densidad de drenaje de la CARSCH es moderada con un valor de 1,13 km/km².

A nivel de subcuencas los parámetros morfométricos presentados en la Tabla 16 muestran:

- Análisis de forma: de las 9 subcuencas en las que se divide la CARSCH, 8 presentan formas alargadas con bordes redondeados (alargada, rectangular – oblonga), con excepción de la subcuenca SC5, al ser ligeramente ensanchada, su

forma es ovalada. La forma de las subcuencas es uno de los factores que incide en el tiempo de concentración, tal es así que las subcuencas alargadas tienen menos probabilidad de acumular agua y por consiguiente inundarse en eventos de lluvia intensa (Singh et al., 2021; Inácio Silva et al., 2022).

- **Análisis de relieve:** la Figura 14 muestra la distribución de la pendiente en las subcuencas de la CARSCH, se dividen en tres áreas marcadas: las de cabecera (SC1, SC2, SC3, Barril, San Juan y Ventana) con elevaciones superiores a 800 msnm y mayor superficie de ocupación de pendientes que varían entre accidentado a muy escarpado; las de zona media (SC4 y Ventana 2), con altitudes que varían de 350 a 800 msnm y presentan escasa superficie con pendientes mayor al 12%; la zona baja (SC5) presenta cotas menores 350 msnm y casi la totalidad de su superficie presenta pendientes menores al 3%. Inácio Silva et al. (2022), establece la importancia del factor relieve por su influencia en los procesos de escurrimiento que pueden desencadenar procesos de erosión. De acuerdo a los coeficientes R_r , R_h y n las subcuencas de cabecera tienen alta probabilidad de erosión, entre las que sobresalen las subcuencas SC1 y SC2, mientras que en las zonas media y baja la probabilidad de erosión varía de baja a leve, respectivamente.

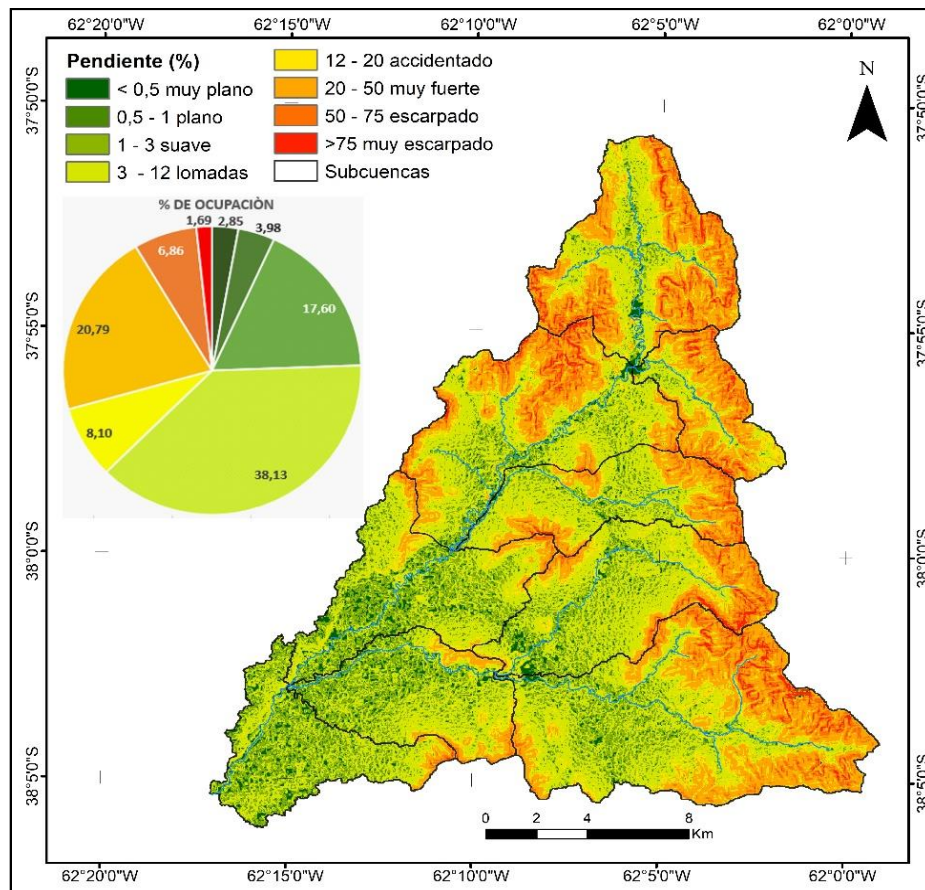


Figura 14. Pendiente en porcentaje de la CARSCH.
Fuente: Guzmán et al. (2021).

- Análisis de drenaje: Los resultados alcanzados coinciden con las descripciones de Strahler (1964), puesto que las subcuencas de cabecera con presencia del relieve montañoso determinan una red de drenaje más densa con mayores texturas, indicando una alta relación con la frecuencia de los cauces. Esto se evidencia en las subcuencas SC1 y Ventana 1, que conforman el 55,33% de cauces de orden 1 y 2, siendo la SC3 el 18,57% del mismo orden, que denota una mayor rugosidad (n) y presencia de inflexiones en el relieve, por roca en superficie y menos permeable, induciendo a la escorrentía en manto generada por cualquier precipitación. El análisis conjunto de los parámetros de drenaje en coincidencia con los de relieve muestra mayor riesgo en las subcuencas SC1, SC2 y adicionalmente Barril; las subcuencas Ventana 1, SC3 y San Juan tienen moderado riesgo; finalmente las subcuencas Ventana 2, SC4 y SC5 el riesgo a erosión es bajo.

Tabla 16. Variables morfométricas de la CARSCH.

	Parámetro	SC1	SC2	Barril	SanJuan	Ventana1	SC3	Ventana2	SC4	SC5	Cuenca Sauce Chico
Parámetros de forma	A (km ²)	46,87	18,89	30,18	43,59	75,95	52,57	30,73	38,53	28,31	365,61
	P (km)	42,42	29,00	37,70	46,95	60,00	45,92	37,43	50,00	48,52	149,79
	La (km)	14,46	8,77	14,94	15,76	18,00	17,36	12,49	13,85	7,00	52,68
	Ff	0,22 (alargada)	0,25 (alargada)	0,14 (muy larga)	0,18 (muy larga)	0,23 (alargada)	0,17 (muy larga)	0,20 (muy larga)	0,20 (muy larga)	0,58 (ligeramente ensanchada)	0,13 (muy larga)
	D (km)	7,73	4,90	6,20	7,45	9,83	8,18	6,26	7,00	6,00	21,58
	Re	0,53 (menos alargada)	0,56 menos alargada	0,41 menos alargada	0,47 menos alargada	0,55 menos alargada	0,47 menos alargada	0,50 menos alargada	0,50 menos alargada	0,86 ovalada	0,41 menos alargada
	Rc	0,33	0,28	0,27	0,25	0,27	0,31	0,28	0,19	0,15	0,68
Parámetros de relieve	Kc	1,76 (rectangular-oblonga)	1,90 (rectangular-oblonga)	1,95 (rectangular-oblonga)	2,02 (rectangular-oblonga)	1,96 (rectangular-oblonga)	1,80 (rectangular-oblonga)	1,92 (rectangular-oblonga)	2,28 (rectangular-oblonga)	2,59 (rectangular-oblonga)	2,22 (rectangular-oblonga)
	Hmax (msnm)	1010	906	944	1112	1112	1004	605	622	571	1112
	Hmin (msnm)	408	408	319	337	334	318	272	272	254	254
	H km	0,602	0,498	0,625	0,775	0,778	0,686	0,333	0,35	0,317	0,858
	PM (%)	27,161	29,154	17,348	14,093	20,558	19,261	6,52	6,175	4,338	16,597
	Rr	1,419059768	1,717161116	1,6577931	1,65065685	1,29663565	1,49395339	0,88962318	0,70005478	0,65330629	0,57281072
	Rh	0,041620575	0,056784493	0,0418284	0,04916889	0,04323063	0,03950703	0,02665706	0,02527441	0,04529218	0,01628825
n	1,17 (alta)	0,92 (alta)	0,69 (moderada)	0,64 (moderada)	1,06 (alta)	1 (alta)	0,15 (leve)	0,14 (leve)	0,08 (bajo)	0,97 (alta)	
Parámetros de drenaje	Lu (km)	91,23	34,893	33,166	35,756	103,634	76,907	13,397	15,772	7,023	412,016
	Dd (km/km ²)	1,95 (baja)	1,85 (baja)	1,10 (baja)	0,82 (extremadamente baja)	1,36 (baja)	1,46 (baja)	0,44 (extremadamente baja)	0,41 (extremadamente baja)	0,25 (extremadamente baja)	1,13 (baja)
	C (1/km* km ⁻²)	0,51 (muy baja)	0,54 (muy baja)	0,91 (muy baja)	1,22 (muy baja)	0,73 (muy baja)	0,68 (muy baja)	2,29 (muy baja)	2,44 (muy baja)	4,03 (muy baja)	0,89 (muy baja)
	Lo (km)	0,256895965	0,270639268	0,45491227	0,60951982	0,36641758	0,34180279	1,14693273	1,22144669	2,015465	0,4436884
	L (km)	14,464	8,77	14,942	15,762	17,9965	17,364	12,492	13,848	6,999	52,676
	HCmax (msnm)	800	551	540	512	508	414	335	321	278	800
	HCmin (msnm)	408	408	319	337	334	318	272	272	254	254
	J (%)	2,71	1,63	1,48	1,11	0,97	0,55	0,50	0,35	0,34	1,04
	Orden de cauce	4	2	4	4	4	5	4	1	5	5
	Nu	156	70	51	52	168	126	4	2	1	630
	Nu1	90	33	30	31	102	59	1	1	0	347
	Ct	1,92	1,75	0,99	0,71	1,34	1,12	0,03	0,03	0,00	0,95
	T (km*#cauce / km ²)	6,48 (fina)	6,85 (fina)	1,86 (muy gruesa)	0,98 (muy gruesa)	3,02 (gruesa)	3,51 (gruesa)	0,06 (muy gruesa)	0,02 (muy gruesa)	0,01 (muy gruesa)	1,94 (muy gruesa)
	Fs # cauces / km ² .	3,33 (baja)	3,71 (baja)	1,69 (baja)	1,19 (baja)	2,21 (baja)	2,40 (baja)	0,13 (baja)	0,05 (baja)	0,04 (baja)	1,72 (baja)
	Te promedio (hora)	3,92	2,85	3,88	4,64	6,02	6,12	4,74	5,74	4,54	13,49
	Tlag (hora)	2,35	1,71	2,33	2,78	3,61	3,67	2,84	3,45	2,72	8,10

La metodología de priorización de subcuencas propuesto por Abdeta et al. (2020; Arulbalaji y Padmalal (2020) y Jothimani et al. (2020), permitió determinar las subcuencas que tienen mayor potencial de pérdida de agua y suelo. Para la priorización de subcuencas, se generó la Tabla 17, que resume todo el proceso para calcular los valores de PCm, que a su vez establecen el nivel de priorización. De las 9 subcuencas en que se divide la CARSCH, 2 son de alta priorización y 2 de nivel moderado, que

requieren planes de manejo inmediatos y efectivos para su conservación; las 5 subcuencas restantes son de baja prioridad y menos susceptibles a la degradación.

Tabla 17. Valores de parámetros morfométricos que intervienen en el cálculo de los valores parámetro compuesto para morfometría (PCm) y priorización de subcuencas.

Parámetro		SC1	SC2	Barril	SanJuan	Ventana1	SC3	Ventana2	SC4	SC5
Forma	Factor de forma Ff	4	2	8	6	3	7	5	5	1
	Relación de elongación Re	4	2	8	7	3	7	6	5	1
	Relación de circularidad Rc	5	2	8	6	7	9	4	3	1
	Índice de compacidad de Gravelius Kc	9	7	5	3	4	8	6	2	1
Relieve	Pendiente media PM	2	1	5	6	3	4	7	8	9
	Relieve relativoRr	5	1	2	3	6	4	7	8	9
	Relación relieve Rh	6	1	5	2	4	7	8	9	3
	Coefficiente de rugosidad n	1	4	5	6	2	3	7	8	9
Drenaje	Densidad de drenaje Dd	1	2	5	6	4	3	7	8	9
	Longitud del flujo terrestre Lo	9	8	5	4	6	7	3	2	1
	Constante de mantenimiento del canal C	1	2	5	6	4	3	7	8	9
	Coefficiente de torrencialidad Ct	1	2	5	6	3	4	7	8	9
	Textura de drenaje T	2	1	5	6	4	3	7	8	9
	Frecuencia de cauce Fs	2	1	5	6	4	3	7	8	9
	Tiempo de concentración Tc	3	1	2	5	8	9	6	7	4
	Tiempo de retardo o Lag Time Tlag	3	1	2	5	8	9	6	7	4
PARÁMETRO COMPUESTO PARA MORFOMETRÍA (PCm)		3,53	2,29	5,00	5,24	4,53	5,47	6,29	6,59	5,71
NIVEL DE PRIORIZACIÓN		ALTA	ALTA	MEDIA	BAJA	MEDIA	BAJA	BAJA	BAJA	BAJA

*La escala de colores muestra la relación directa con inundación o erosión, de acuerdo al parámetro, siendo rojo el valor máximo y verde el valor mínimo.

En concordancia con Arulbalaji y Padmalal (2020), el método geoespacial utilizado para delimitar y priorizar las subcuencas de la CARSCH es una herramienta eficaz y mejora la comprensión de la variabilidad espacial de la fragilidad de la CARSCH. La Figura 15, muestra que la fragilidad se relaciona directamente con la superficie de pendientes pronunciadas.

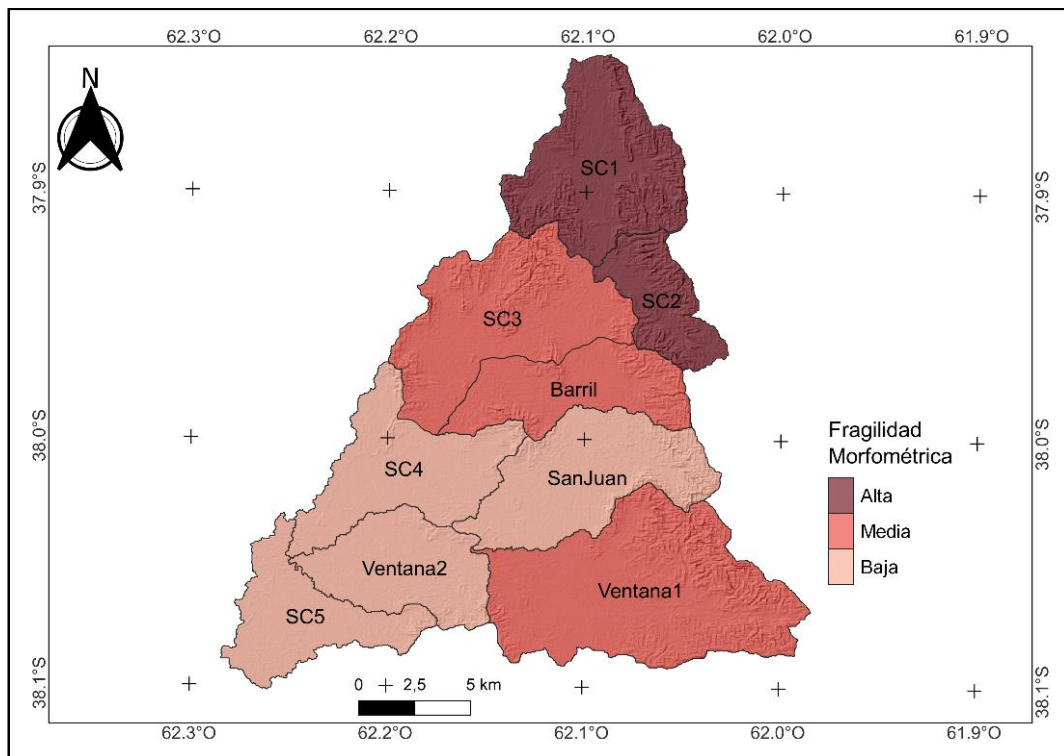


Figura 15. Nivel de priorización de las subcuencas de la CARSCH.

4.1.2. Variabilidad pluvial y térmica.

Una vez recopilados los valores existentes de precipitación acumulada mensual y temperatura promedio mensual provenientes de estaciones meteorológicas y de modelo satelital, se realizó una evaluación estadística para determinar la factibilidad de usar valores estimados que permitan observar la variabilidad espacial y temporal.

Las Figuras 16 y 17 muestran la concentración de los valores estimados por imágenes satelitales (Est.) y valores registrados por la estación meteorológica (Obs.) alrededor de la línea de tendencia lineal positiva. Además, cada gráfica presenta la ecuación de ajuste lineal y en el caso de los coeficientes de determinación (R^2), varían entre 0,6 a 0,81 en el caso de la precipitación; y un R^2 superior a 0,99 en el caso de la temperatura, en todos los casos el valor de p fue menor a 0,05 por lo cual se considera que la correlación es significativa.

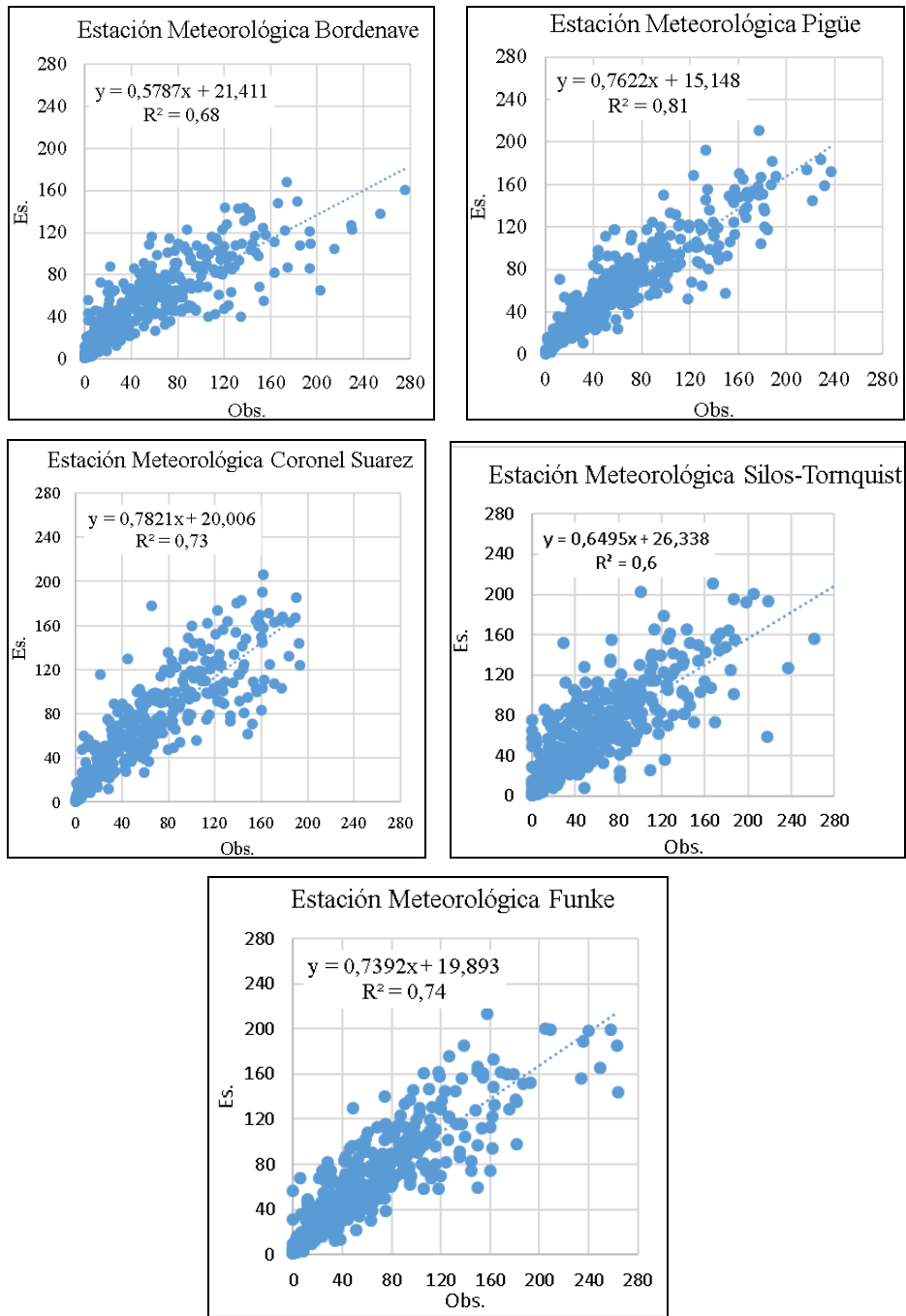


Figura 16. Modelo de regresión lineal entre datos observados (Obs.) y satelitales (Es.) de precipitación acumulada mensual en el periodo 1988 - 2018.

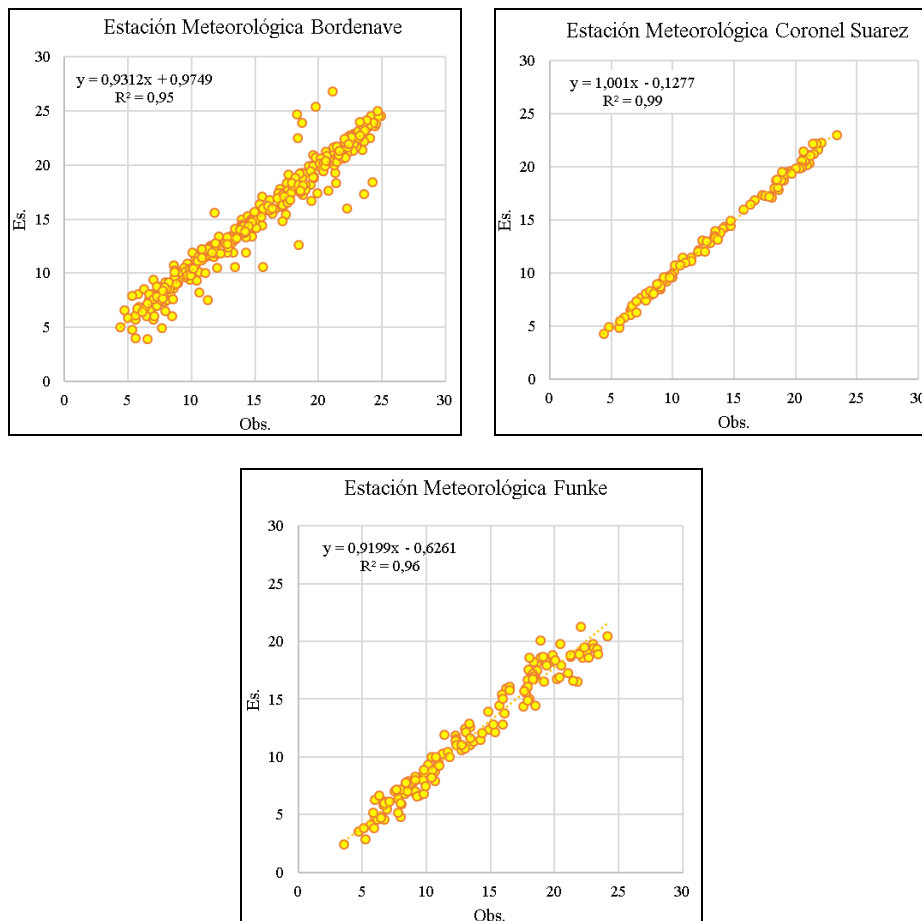


Figura 17. Modelo de regresión lineal entre datos observados (Obs.) y satelitales (Es.) de temperatura promedio mensual en el periodo 1988 - 2018.

Al realizar la evaluación de datos pluviométricos y de temperatura correspondientes a estimaciones satelitales (Es.) versus observados o registrados por estaciones meteorológicas (Obs.) (Tabla 18 y Tabla 19), existe una sobreestimación del modelo satelital (Es.), con excepción de las estaciones Bordenave y Pigüe, que registran una subestimación.

Debido al auge en el uso de datos climáticos provenientes de satélites, existen varios trabajos que realizan esta validación entre Es. Vs Obs. Para este caso se calculó las mismas métricas estadísticas que Satgé et al. (2019) y se obtuvieron valores considerados de alta correlación que validan el uso de estos datos.

De acuerdo a lo expresado por Nash y Sutcliffe (1970), los valores de NSE calculados muestran una concordancia entre los valores Obs. y Es., es decir que tanto en la evaluación de las bases de datos de precipitación y temperatura, es eficiente el uso de

estimaciones satelitales para análisis, sobre todo en la temperatura que presento valores cerca de 1.

Tabla 18. Métricas estadísticas que evalúan la precipitación.

Estación Meteorológica	Sesgo (mm/mes)	Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	Coefficiente de correlación de Pearson (γ)	Coefficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)
Bordenave	-3,53	29,72	0,82	0,66
Pigüe	-0,97	22,75	0,9	0,81
Coronel Suarez	5,84	26,56	0,85	0,71
Silos-Tornquist	4,05	33,67	0,77	0,59
Funke	2,61	30,19	0,86	0,70

Tabla 19. Métricas estadísticas que evalúan la temperatura.

Estación Meteorológica	Sesgo ($^{\circ}$ C/mes)	Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	Coefficiente de correlación de Pearson (γ)	Coefficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)
Bordenave	0,04	1,32	0,97	0,94
Coronel Suarez	0,11	0,40	0,997	0,994
Funke	1,72	2,05	0,98	0,84

4.1.2.1. Anomalía pluvial.

En la Figura 18, se observa que la precipitación disminuye en sentido Norte-este a Sur – oeste, como lo indica Torrero (2009). Además, se denota la posible influencia del sistema serrano de Ventania sobre la precipitación, ya que al tratarse de imágenes satelitales con 4000m de resolución espacial, se puede caracterizar con mejor detalle la variabilidad pluvial, las características se corresponden con un clima templado y subhúmedo seco (Gaspari, 2007). El valor promedio de precipitación moda anual para toda el área de estudio es de 809,67mm. Las subcuencas SC1, SC2 y Barril son las de mayor precipitación con una moda que varía entre 812 a 820 mm. Dicho valor modal

de precipitación va disminuyendo de tal forma que las subcuencas de la desembocadura Ventana 2 y SC5 presentan valores de 797 y 787, respectivamente.

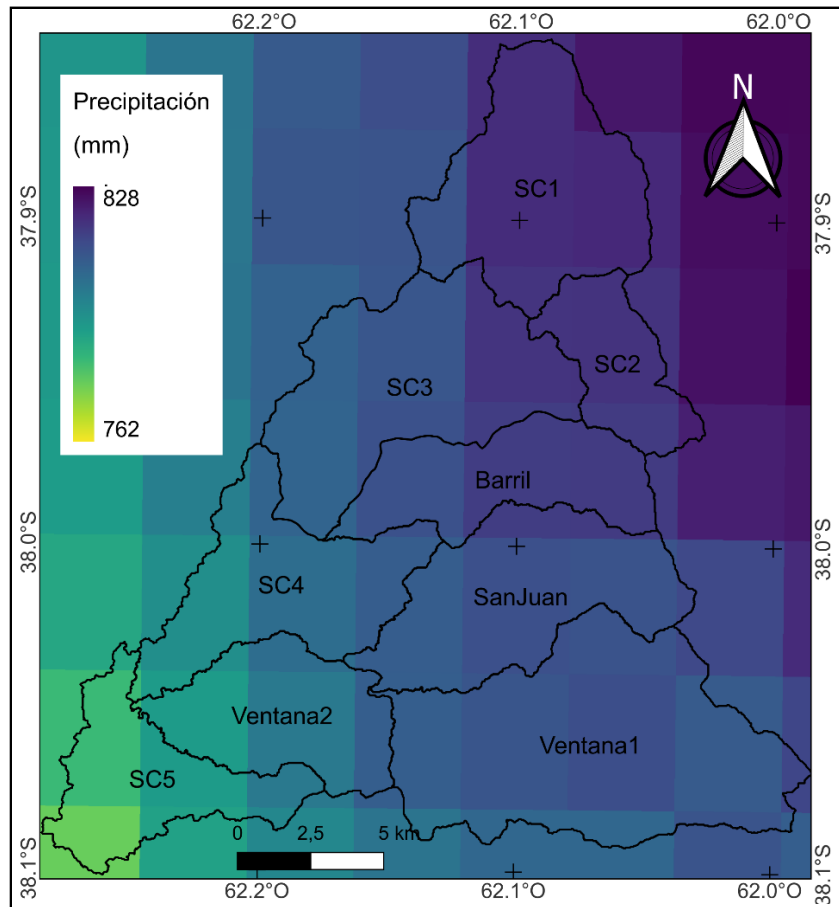


Figura 18. Valor Modal de precipitación anual, correspondiente al periodo 1988-2018.

Durante el periodo de estudio enero de 1988 a diciembre de 2018, los años se agruparon de la siguiente manera: 15 años de tipo normal, 11 seco, 2 muy seco y 3 lluvioso. Los años que están resaltados en amarillo, han sido corroborados por información de resoluciones y decretos de emergencia de la municipalidad de Tornquis.

Tabla 20. Clasificación de la precipitación por criterio de anomalías según Alconada (2008), entre 1988 - 2018.

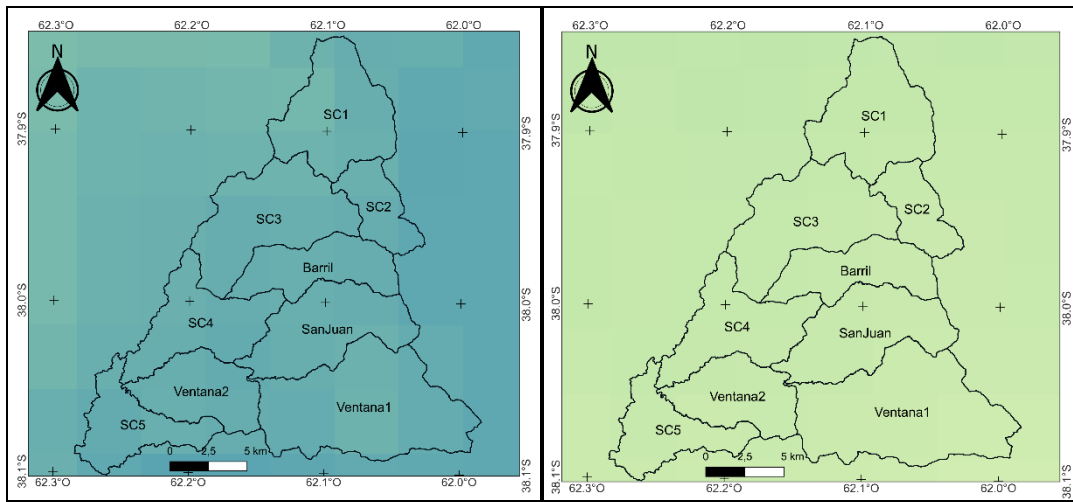
Año	Mínimo (%)	Máximo (%)	Promedio (%)	Tipo de año
1988	-23,47	-22,54	-23,09	Seco
1989	4,71	6,12	5,08	Normal
1990	-4,78	-2,26	-3,31	Seco
1991	13,65	15,64	14,68	Normal
1992	34,23	35,43	34,78	Lluvioso
1993	10,57	12,07	11,20	Normal
1994	4,15	6,23	5,15	Normal
1995	-20,35	-18,87	-19,52	Seco
1996	6,00	7,67	6,98	Normal
1997	7,52	9,01	8,29	Normal
1998	-0,43	1,09	0,27	Normal
1999	7,97	9,63	8,89	Normal
2000	6,62	7,48	7,14	Normal
2001	40,22	41,64	41,00	Lluvioso
2002	18,96	22,18	20,65	Normal
2003	-8,06	-7,08	-7,61	Seco
2004	19,62	24,32	22,03	Normal
2005	-23,13	-21,30	-22,43	Seco
2006	-5,47	-4,13	-4,77	Seco
2007	-1,78	0,12	-0,79	Seco
2008	-29,16	-27,81	-28,60	Muy seco
2009	-27,34	-26,30	-26,78	Muy seco
2010	-6,29	-5,00	-5,86	Seco
2011	-4,15	-3,61	-3,85	Seco
2012	7,11	10,84	8,80	Normal
2013	-17,78	-16,24	-17,38	Seco
2014	36,49	38,49	37,14	Lluvioso
2015	1,35	3,00	2,09	Normal
2016	3,91	8,62	6,37	Normal
2017	20,82	21,77	21,31	Normal
2018	-2,74	-1,91	-2,42	Seco

La Figura 19 muestra un ejemplo de las consecuencias de un año anómalo, como lo fue el 2014 catalogado como lluvioso en la Tabla 20. En las imágenes captadas por Telefe Bahía Blanca (2014), se observa campos inundados de productores del cinturón hortícola de Bahía Blanca que fueron sorprendidos por el desbordamiento del río Sauce Chico, producto de lluvias intensas en la zona serrana.



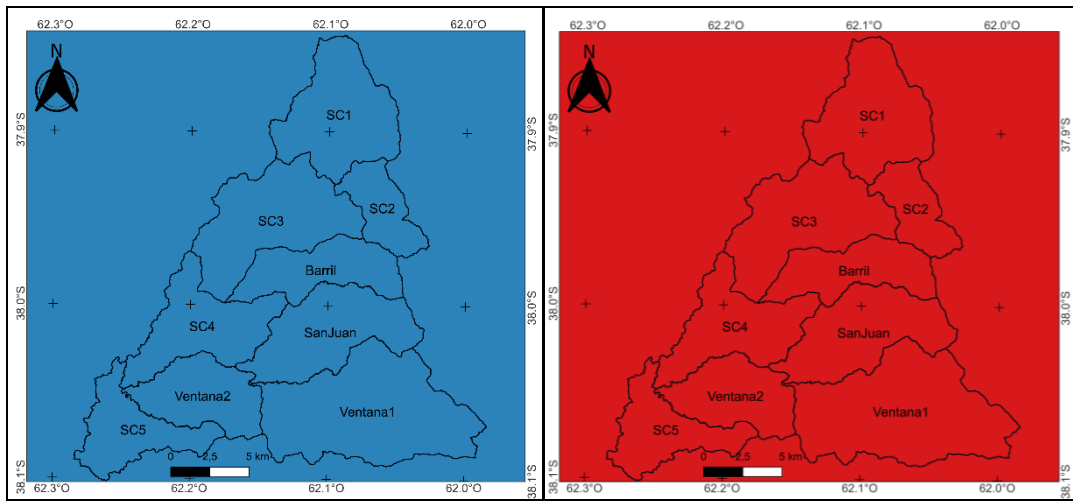
Figura 19. Inundación por desbordamiento del río Sauce Chico en octubre del año 2014.
Fuente: Telefe Bahía Blanca (2014).

Al analizar los 31 años de estudio y clasificarlos de acuerdo a la anomalía pluvial que presentan (Tabla 20), el 48,4% de los años están dentro del rango considerado como normal, el 32,3% se corresponde a clase seca o de baja precipitación, el 9,7% es lluvioso y un porcentaje similar se corresponden con años muy secos con respecto al valor de referencia (moda).



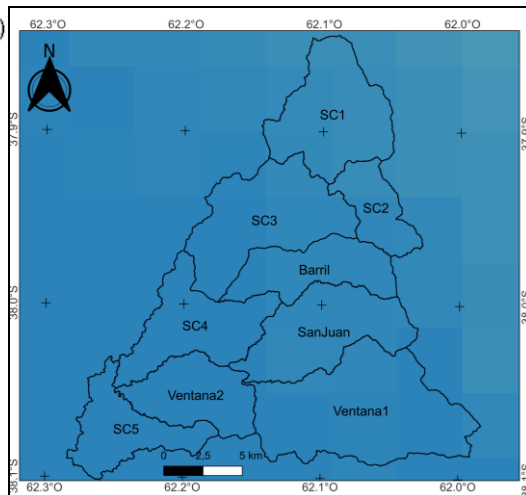
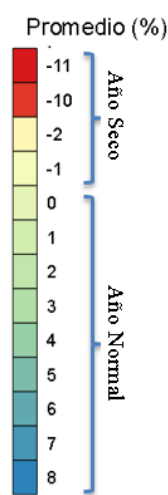
1988 – 1993 (\bar{x} = 6,55)

1994 – 1999 (\bar{x} = 1,68)



2000 – 2005 (\bar{x} = 10,13)

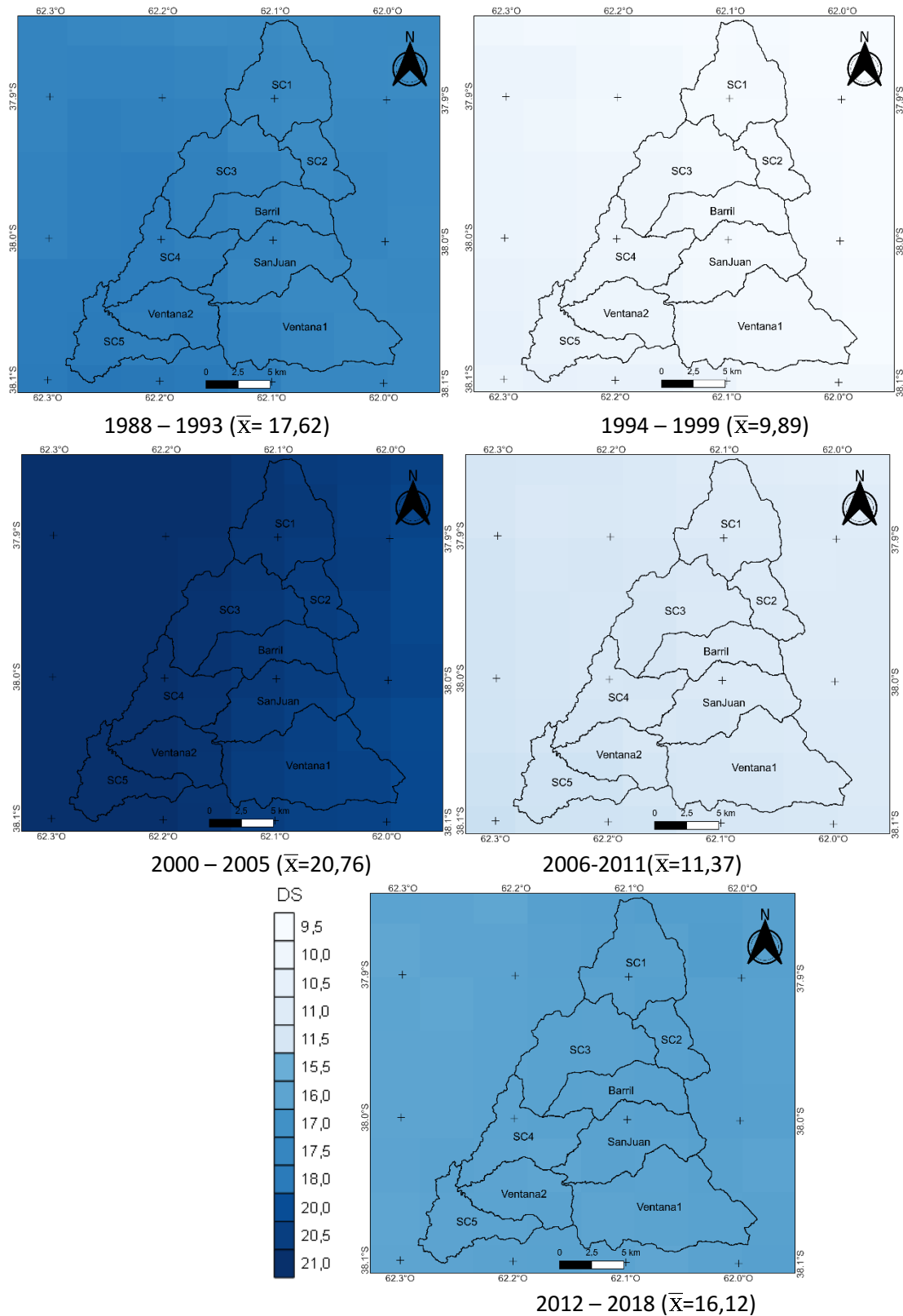
2006-2011(\bar{x} = -11,78)



2012 – 2018 (\bar{x} = 7,99)

\bar{x} : valor promedio de anomalía en porcentaje, para la CARSCH.

Figura 20. Anomalía promedio (%) para cada periodo.



\bar{x} : valor promedio de la desviación estándar para cada periodo en la CARSCH.

Figura 21. Desviación estándar (DS) de la precipitación por periodo.

La desviación estándar presentada en la Figura 21, muestra la variabilidad de anomalía intra periodo, en la mayor parte de los casos existe alta desviación estándar con excepción de los periodos 1994 – 1999 y 2006 – 2011. En el primer caso los años son normales con excepción de 1995 y en el segundo caso se trata de un periodo seco conformado por años secos y muy secos.

La Figura 22, muestra la tendencia de anomalía en el área de estudio, a través del coeficiente Z de MK, con un nivel de significancia del 95%. De acuerdo con la tabla 12 de Vu y Mishra (2016), la tendencia que se registra en todas las subcuencas de la CARSCH es de tipo decreciente no significativa., es decir existe cierta tendencia a años secos, principalmente en las subcuencas SC1, SC2 y Barril, con mayor superficie de ocupación serrana.

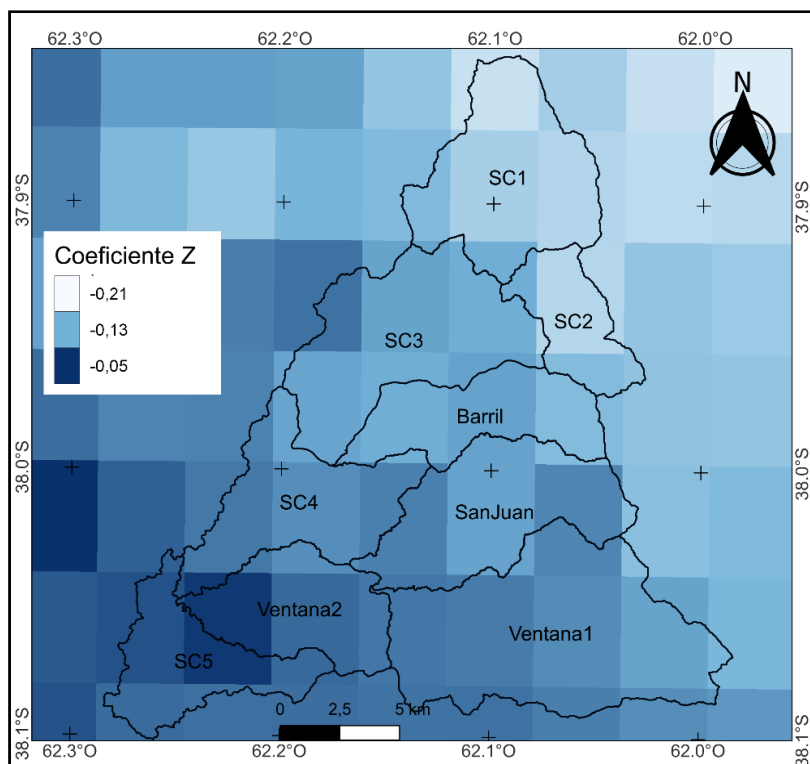


Figura 22. Tendencia de la anomalía de precipitación para el periodo 1988 - 2018.

4.1.2.2. Anomalía de temperatura.

La tabla 21, refiere a la clasificación de los años de estudio de acuerdo al índice de Calentamiento Global (ICG), con base en los estadísticos de toda el área de estudio. Los valores de ICG no superan el +/- 1°C. El 51,6% de los años de estudio son considerados

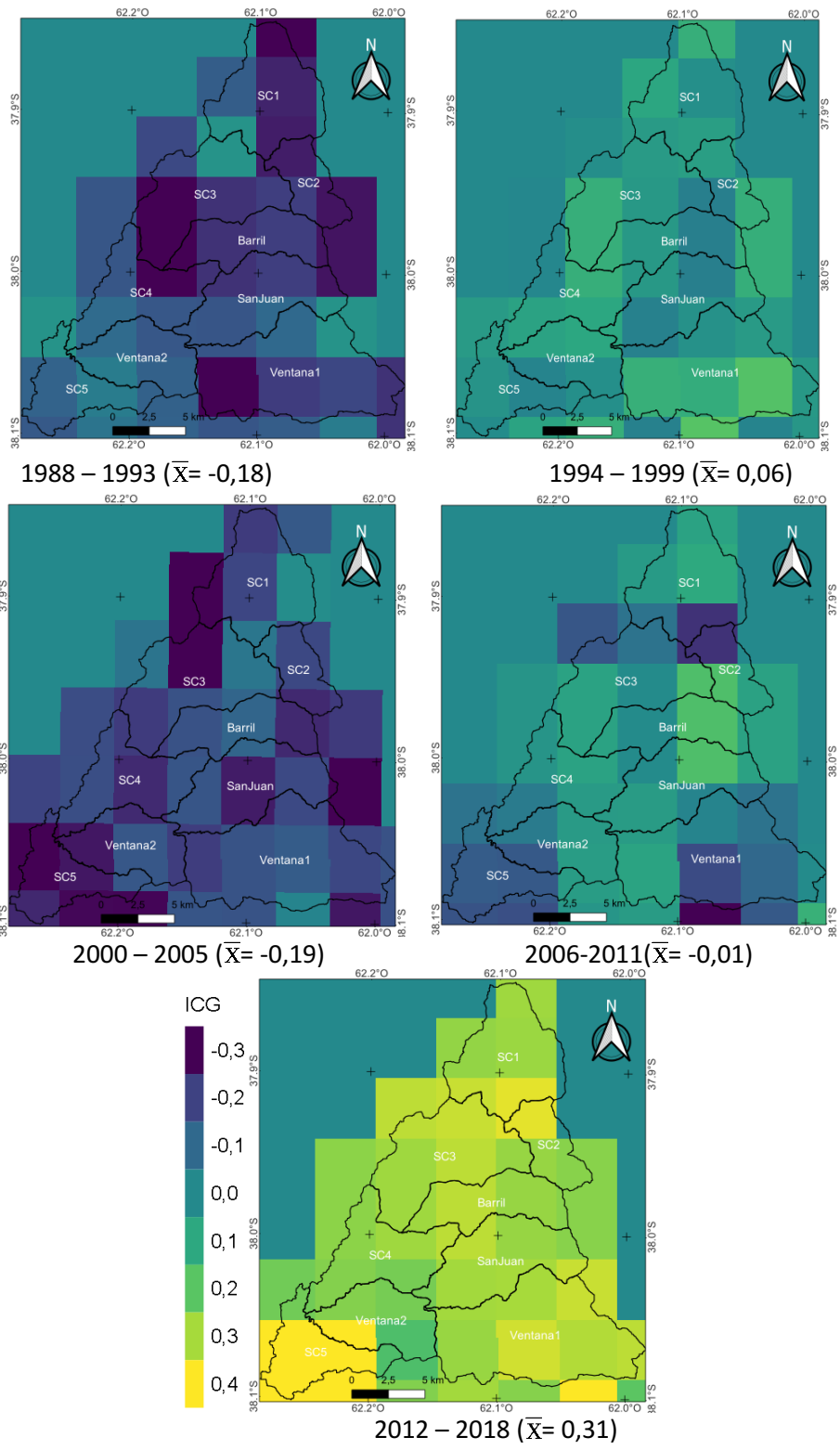
presentan valores de ICG superiores a 0; mientras que el 48,4% presentan valores de anomalía de temperatura o ICG, menor a 0.

Tabla 21. Clasificación de la temperatura ambiente por criterio de Índice de Calentamiento Global (ICG), entre 1988 - 2018.

Año	Mínimo (°C)	Máximo (°C)	Promedio (°C)
1988			
1989	-0,15	0,68	0,17
1990	-0,28	0,43	0,12
1991	-0,61	-0,04	-0,27
1992	-0,75	-0,32	-0,56
1993	-0,61	-0,02	-0,38
1994	0,28	0,75	0,54
1995	-0,39	0,56	0,11
1996	-0,39	0,31	0,02
1997	-0,17	0,56	0,11
1998	-0,40	0,31	-0,15
1999	-0,61	-0,03	-0,31
2000	-0,72	-0,25	-0,49
2001	-0,47	0,18	-0,14
2002	-0,76	0,14	-0,31
2003	-0,47	0,64	0,09
2004	-0,15	0,49	0,13
2005	-0,85	0,21	-0,40
2006	-0,28	0,10	-0,04
2007	-1,22	-0,40	-0,75
2008	-0,53	0,10	-0,12
2009	0,14	1,10	0,75
2010	-0,31	0,48	0,17
2011	-0,35	0,28	-0,08
2012	-0,07	0,53	0,20
2013	-0,03	0,61	0,36
2014	0,06	0,61	0,36
2015	0,31	0,80	0,58
2016	-0,42	0,28	-0,08
2017	-0,02	0,93	0,28
2018	0,10	0,94	0,50

La Figura 23 muestra la variabilidad espacial de la anomalía térmica. El rango de variación es suave, ya que no es mayor a 1°C, tal como lo menciona la Consejería de

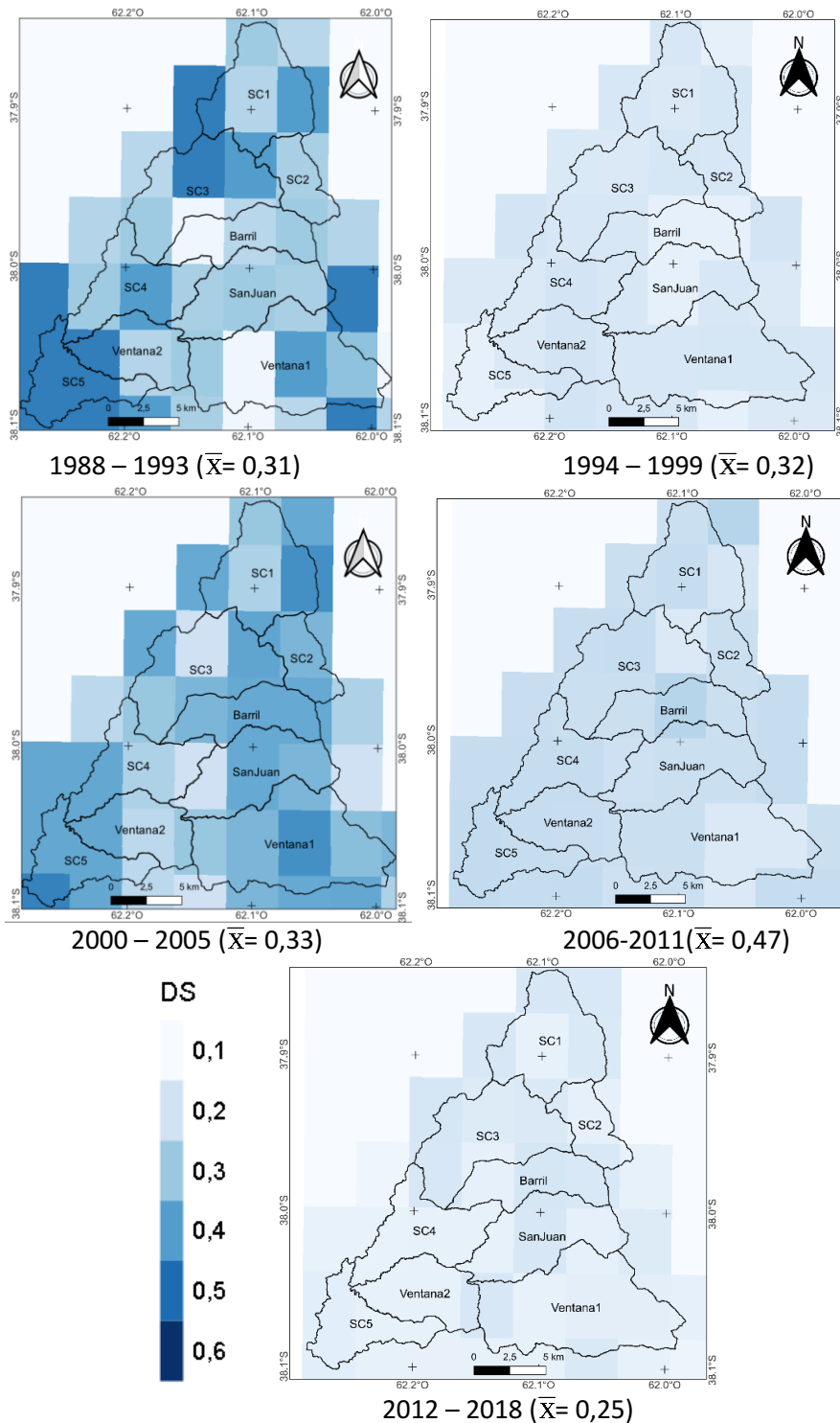
Agricultura, Ganadería de Andalucía (2021). El periodo 2012 – 2018 se muestra más cálido que los demás y los periodos 1988 – 1993, 2000-2005 son templados.



\bar{x} : valor promedio de anomalía térmica para cada periodo en la CARSCHE.

Figura 23. Anomalía térmica para cada periodo en °C.

En referencia a la variabilidad temporal expresada por la desviación estándar (Figura 24), los periodos 1988-1993 y 2000-2005, presentan mayor variabilidad, que el resto de periodos.



\bar{X} : valor promedio de la desviación estándar para cada periodo en la CARSCH.

Figura 24. Desviación estándar (DS) por periodo.

La Figura 25, muestra la tendencia de anomalía térmica expresado por el ICG en el área de estudio. El coeficiente Z de MK al 95% de confianza, divide al área de estudio en dos tipos de tendencia: en rojo se muestran las áreas crecientes significativas y en tono pálido las áreas crecientes no significativas, según la clasificación de Vu y Mishra (2016). De forma general toda el área de estudio registra una tendencia de incremento de temperatura.

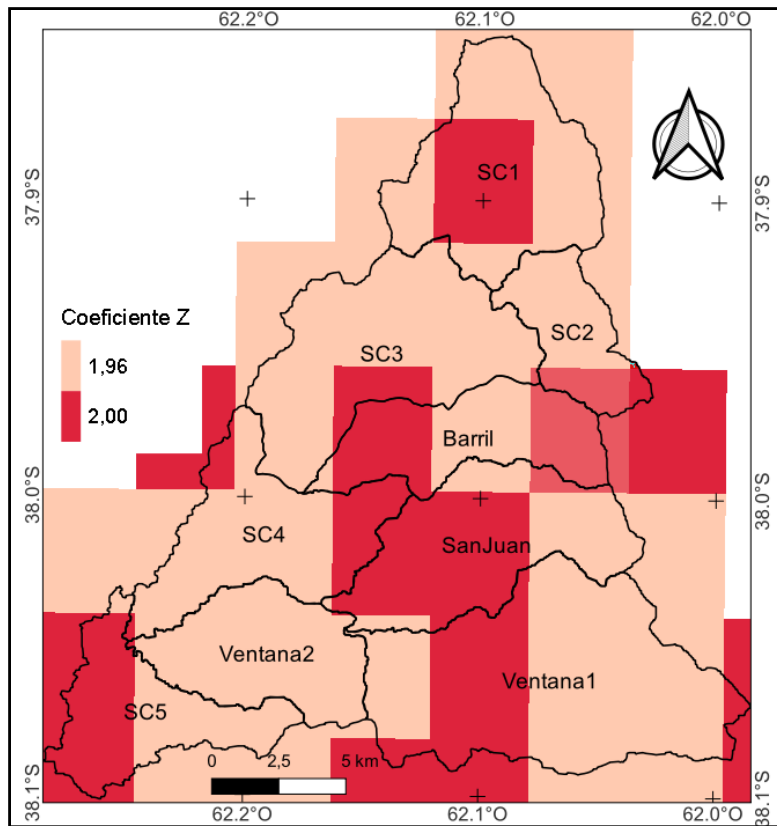


Figura 25. Tendencia del Índice de calentamiento global para el periodo 1988 – 2018.

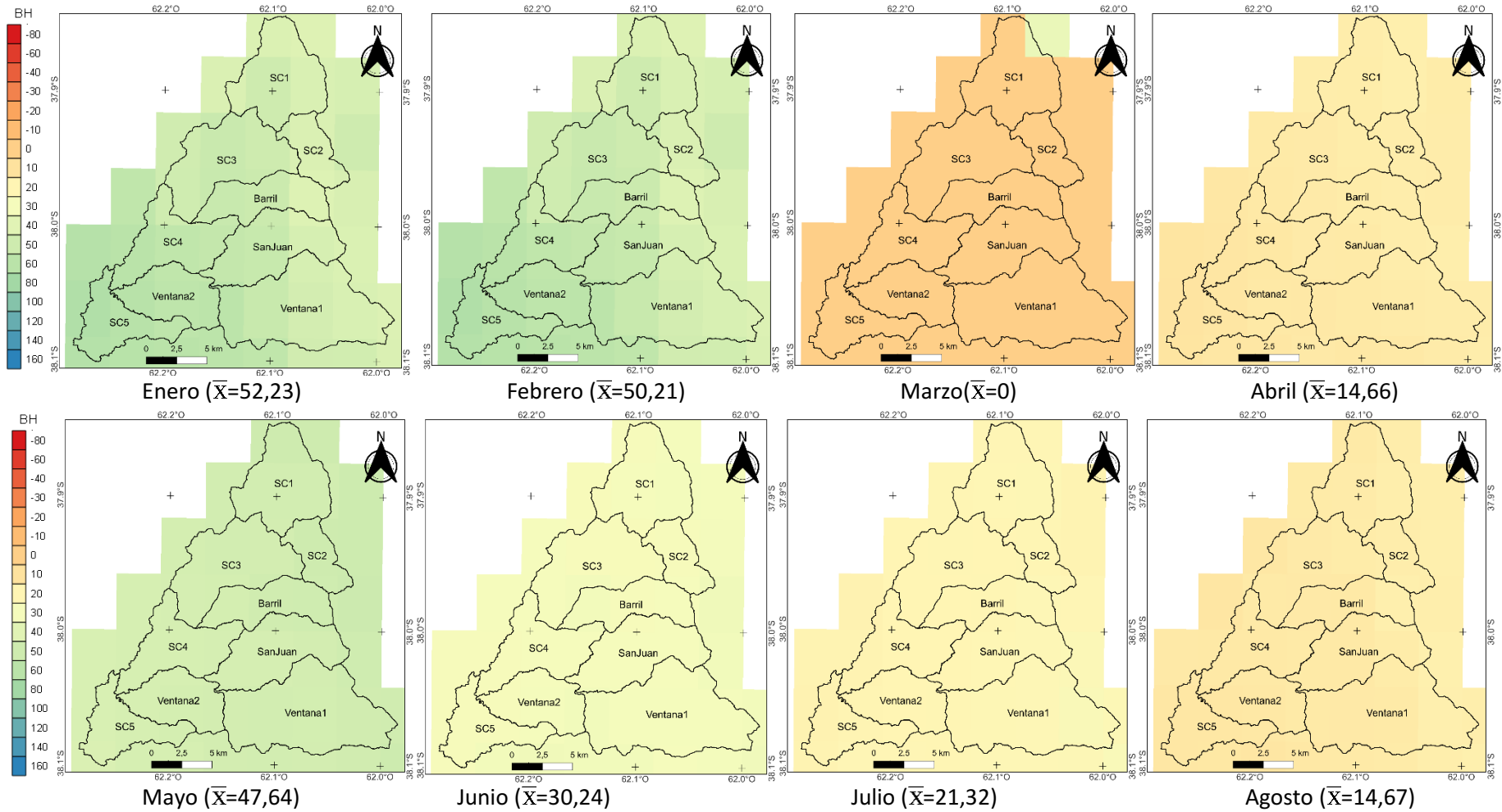
4.1.2.3. Balance hídrico climático.

Las Figuras 26, 27, 28, 29 y 30, muestran el cálculo del balance hídrico (déficit-excedente hídrico) espacialmente distribuido en el área de interés y la variabilidad mensual en cada uno de los periodos de estudio. En general existe un exceso hídrico con pocas excepciones como ser: febrero 1994-1999, febrero y noviembre 2000-200, agosto 2006-2011, marzo y noviembre 2011-2018. Los escenarios de déficit o de bajo exceso hídrico cercano a cero se incrementan e intensifican en cada periodo de estudio. De los meses que presentan excesos hídricos más del 50% presentan valores no mayores a 20

mm. Estas observaciones concuerdan con los hallazgos de Guzmán (2020), al realizar en BH a nivel de estación meteorológica.

El BH del periodo 2006-2011 se caracteriza por ser el más seco con bajos excesos que repuntan en marzo y diciembre, en concordancia con los resultados presentados en las Tablas 20 y 21. El periodo 2012 -2018 se caracteriza por mostrar alta variabilidad intra-anual con presencia de meses muy húmedos con excesos superiores a los 50mm, seguidos por déficit que puede llegar a los 20 mm, como se observa en noviembre.

En relación a la variabilidad espacial, son pocos los meses en los que se puede distinguir la heterogeneidad del área de estudio. Al finalizar la primavera y en verano se distingue bajo excesos o déficit hídrico que se acentúa en las zonas serranas, que en el resto de la cuenca. En periodos húmedos (2012-2018) o secos (2006-2011) se observa que en primavera las sierras presentan mayor exceso que el resto de la cuenca en estudio.



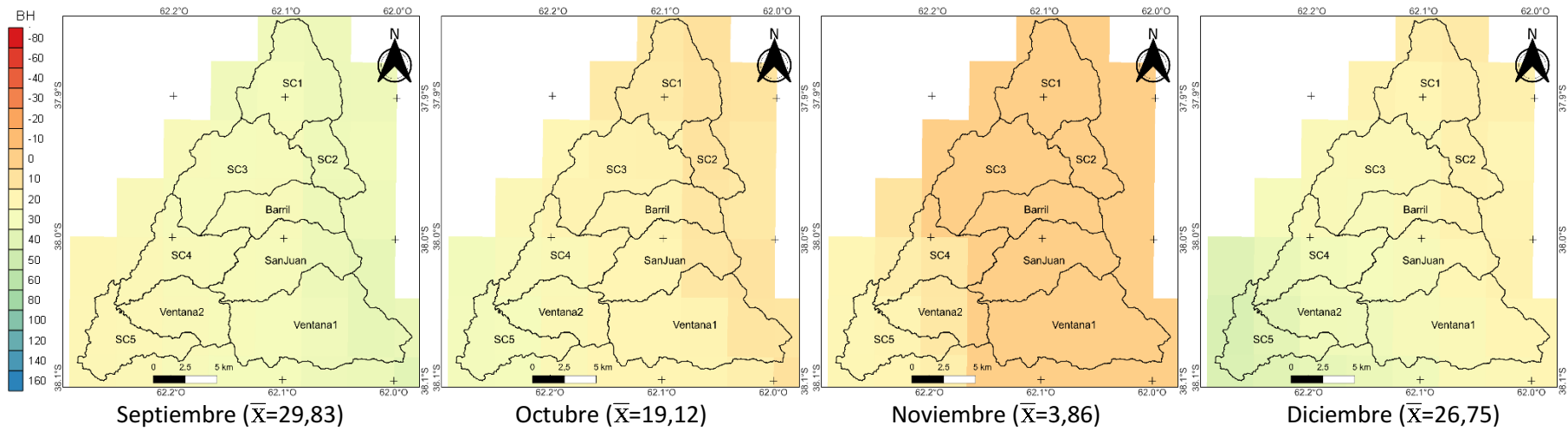
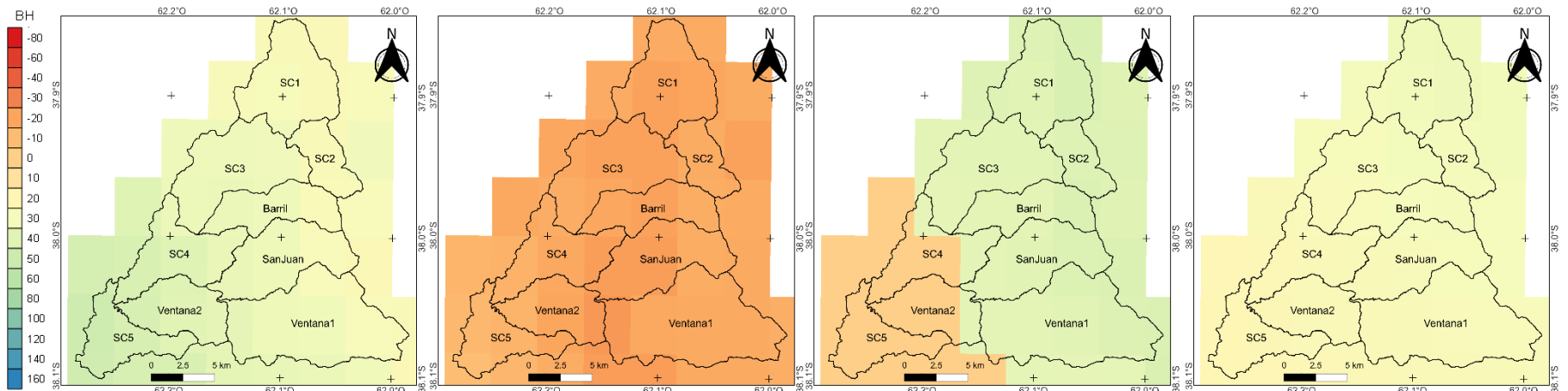


Figura 26. Balance hidrológico (mm) del periodo 1988 - 1993.

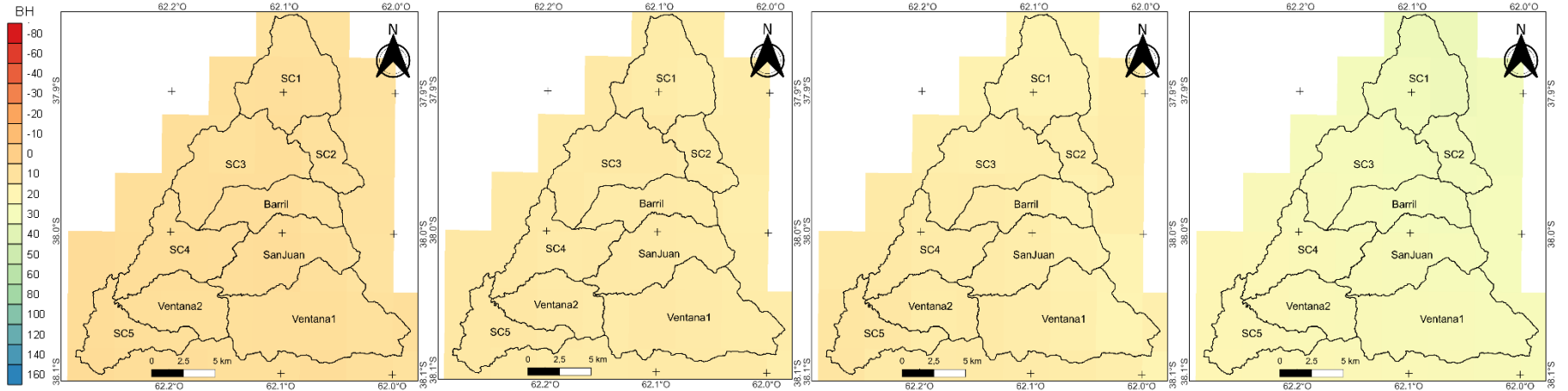


Enero ($\bar{x}=34,69$)

Febrero ($\bar{x}=-18,29$)

Marzo ($\bar{x}=31,46$)

Abril ($\bar{x}=28,37$)



Mayo ($\bar{x}=8,79$)

Junio ($\bar{x}=14,52$)

Julio ($\bar{x}=16,25$)

Agosto ($\bar{x}=9,79$)

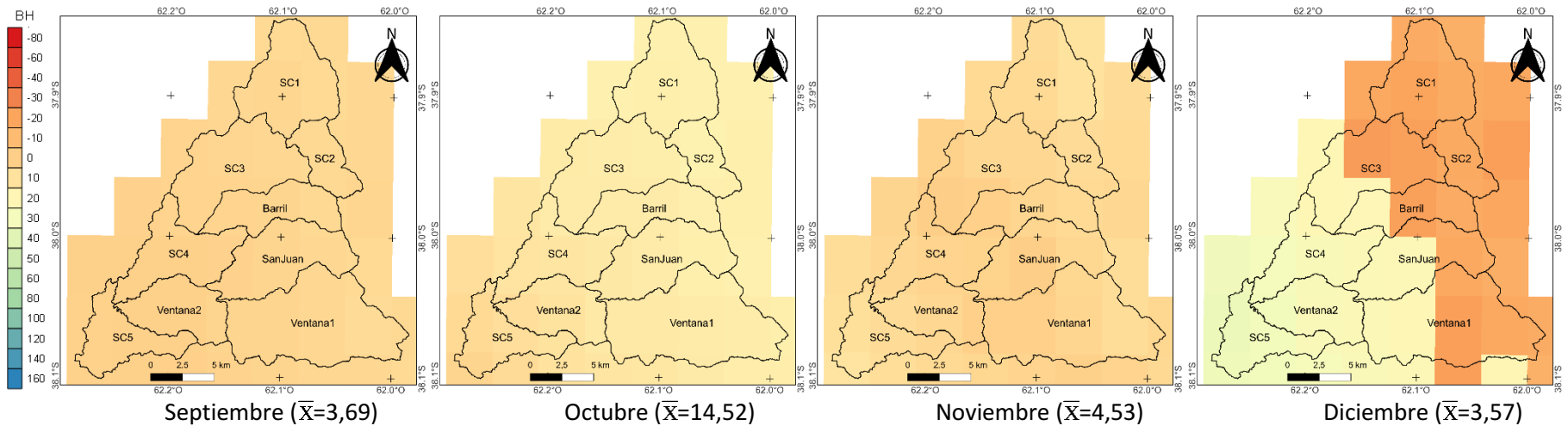
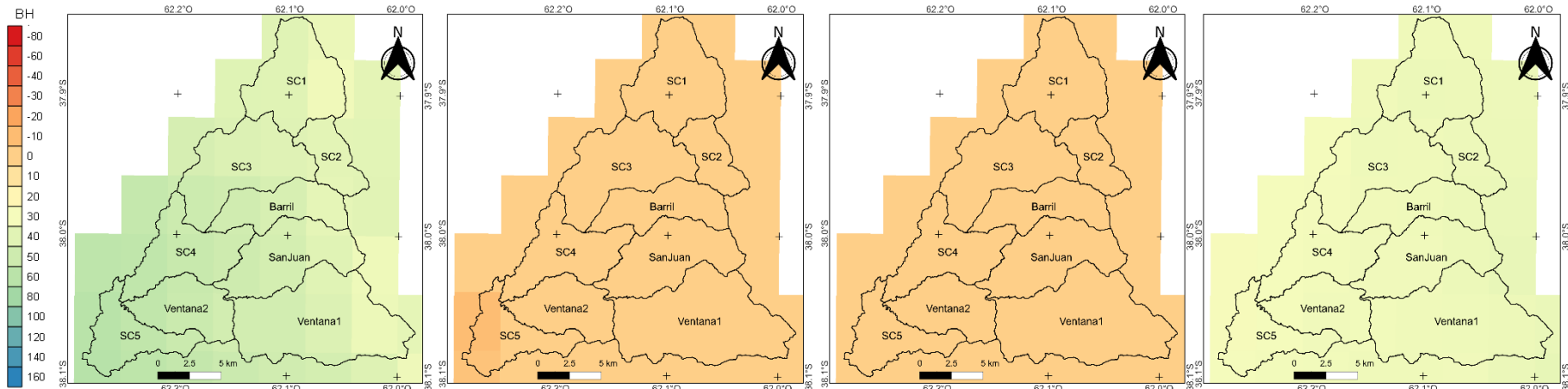


Figura 27. Balance hidrológico (mm) del periodo 1994 - 1999.

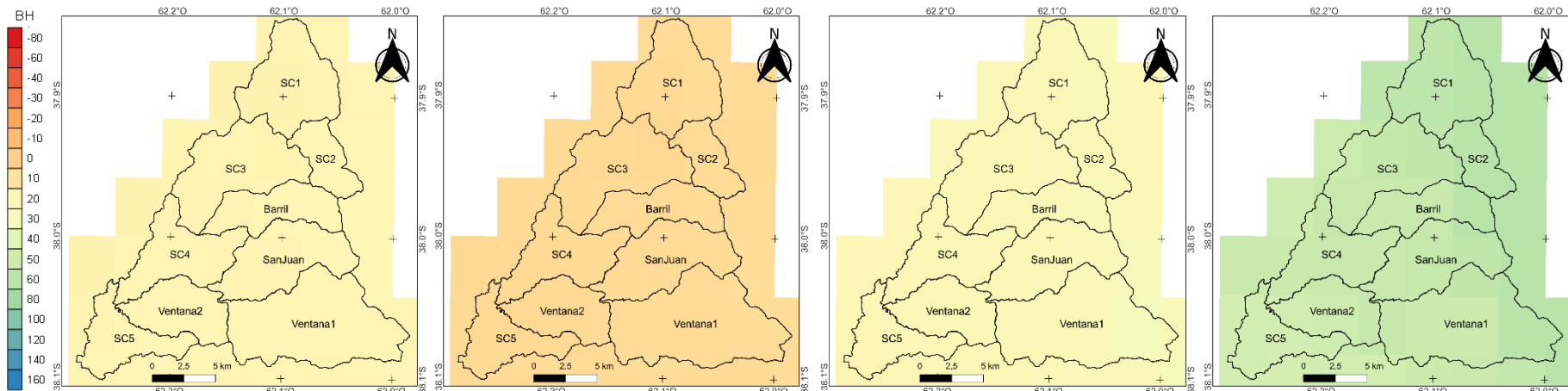


Enero ($\bar{x}=46,18$)

Febrero ($\bar{x}=-0,42$)

Marzo ($\bar{x}=0$)

Abril ($\bar{x}=32,95$)



Mayo ($\bar{x}=19,87$)

Junio ($\bar{x}=6,48$)

Julio ($\bar{x}=25,01$)

Agosto ($\bar{x}=54,64$)

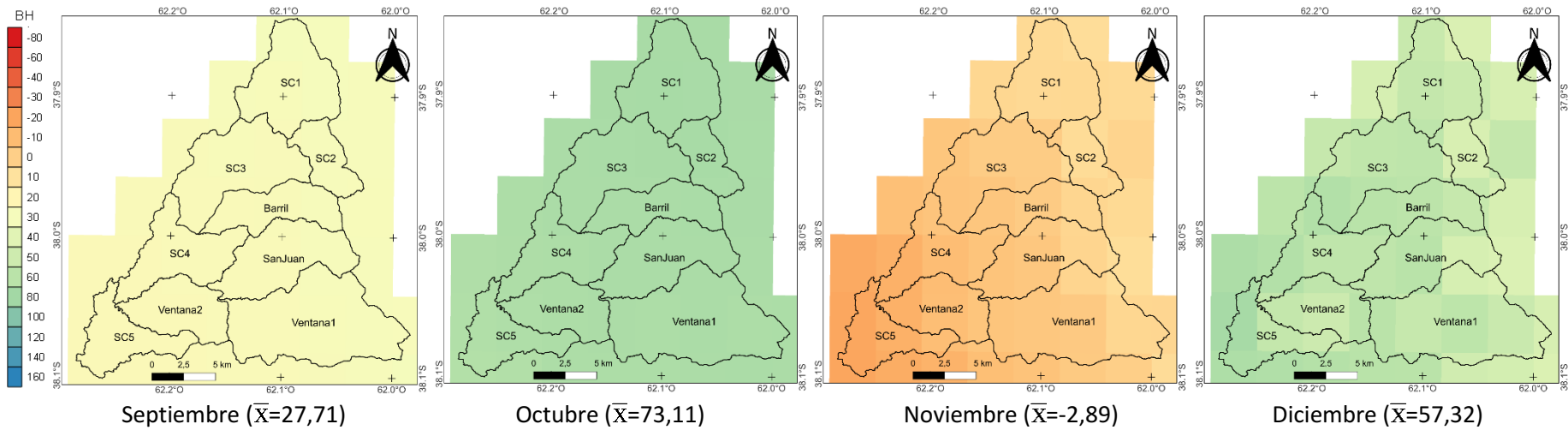
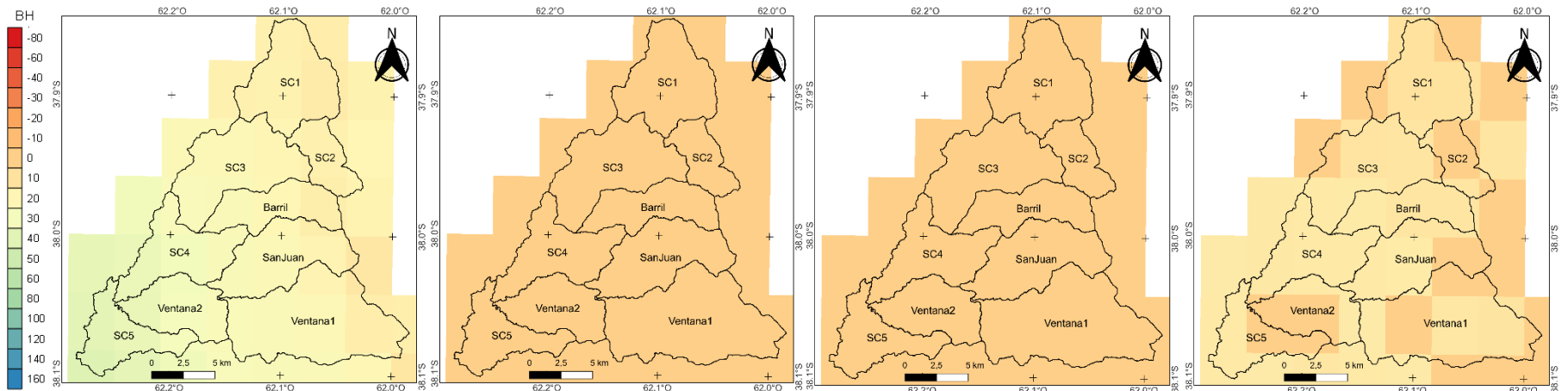


Figura 28. Balance hidrológico del periodo (mm) 2000 - 2005.

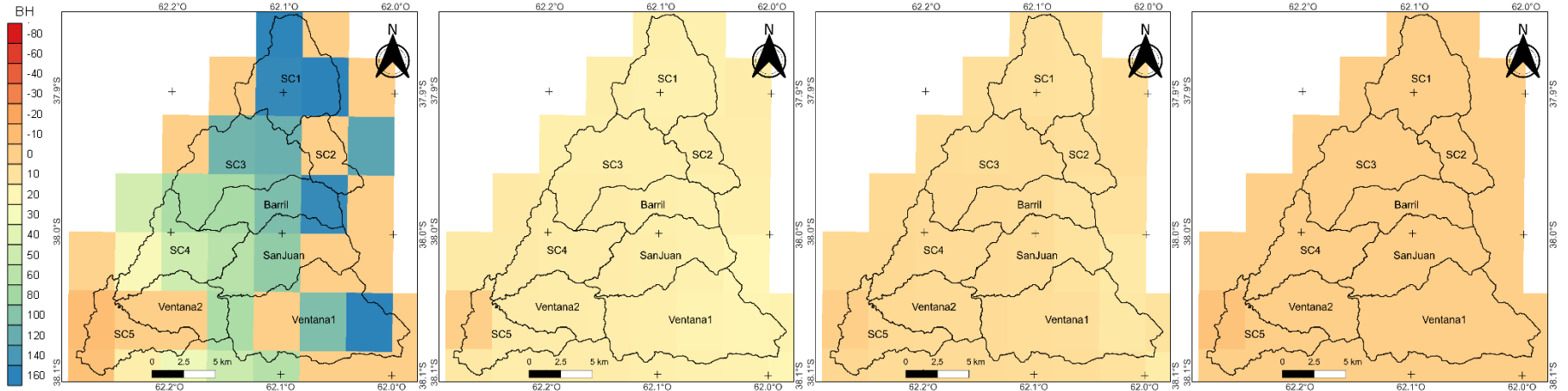


Enero ($\bar{x}=24,74$)

Febrero ($\bar{x}=0$)

Marzo ($\bar{x}=0$)

Abril ($\bar{x}=9,84$)

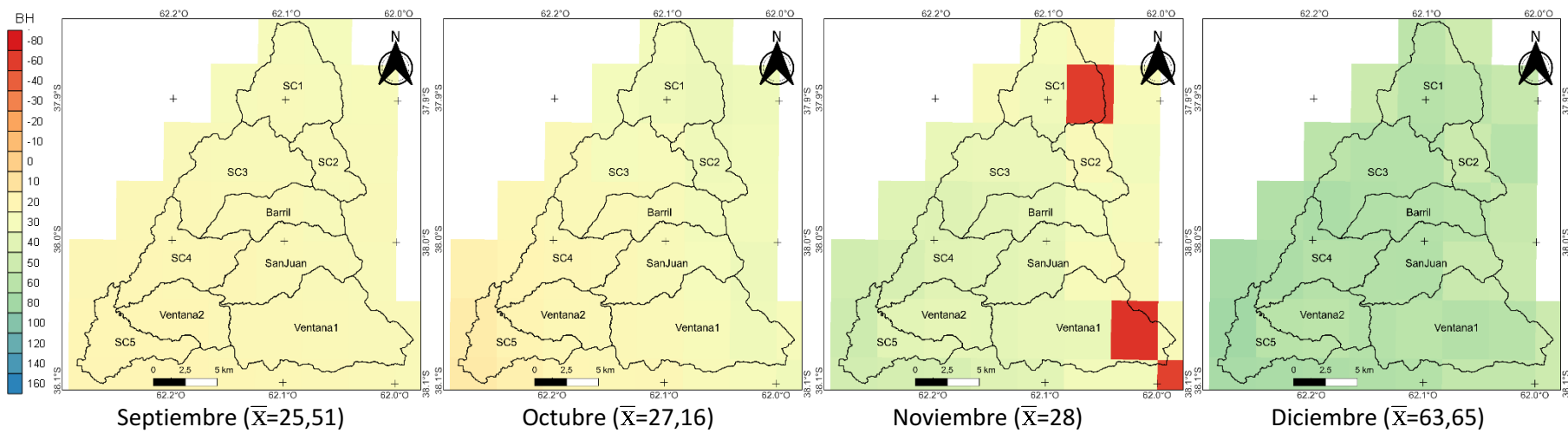


Mayo ($\bar{x}=77,09$)

Junio ($\bar{x}=16,14$)

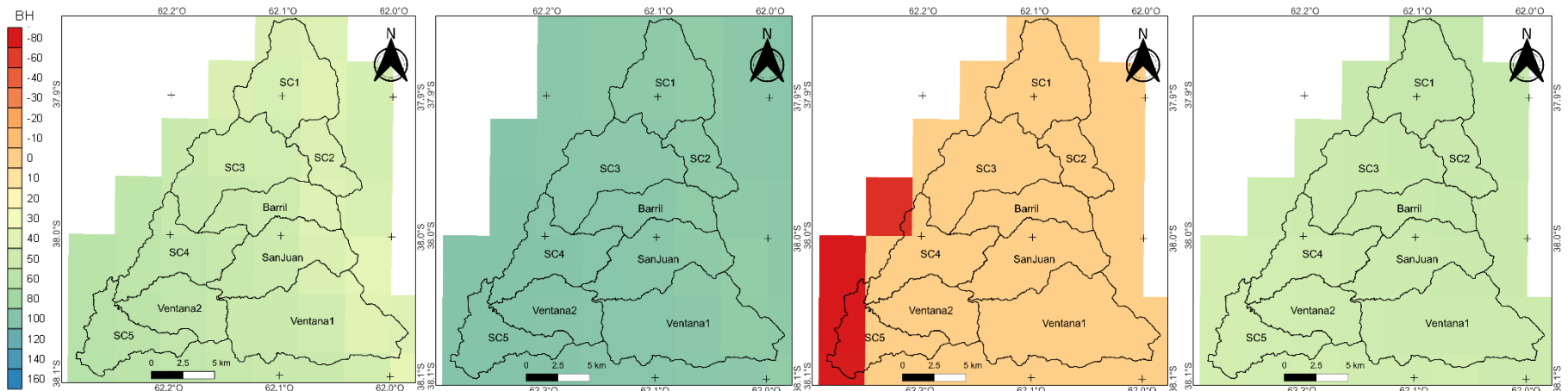
Julio ($\bar{x}=7,95$)

Agosto ($\bar{x}=-0,03$)



*Los cuadros de color rojo se deben a valores atípicos de la imagen satelital debido a interferencias en la recepción de señal.

Figura 29. Balance hidrológico (mm) del periodo 2006 - 2011.

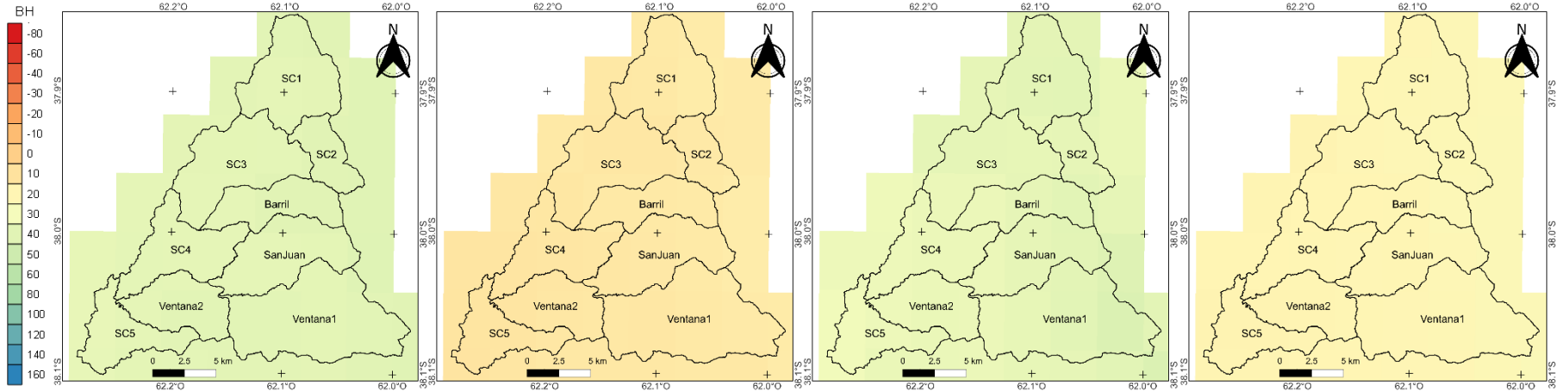


Enero ($\bar{x}=50,15$)

Febrero ($\bar{x}=96,29$)

Marzo ($\bar{x}=-3,97$)

Abril ($\bar{x}=51,11$)

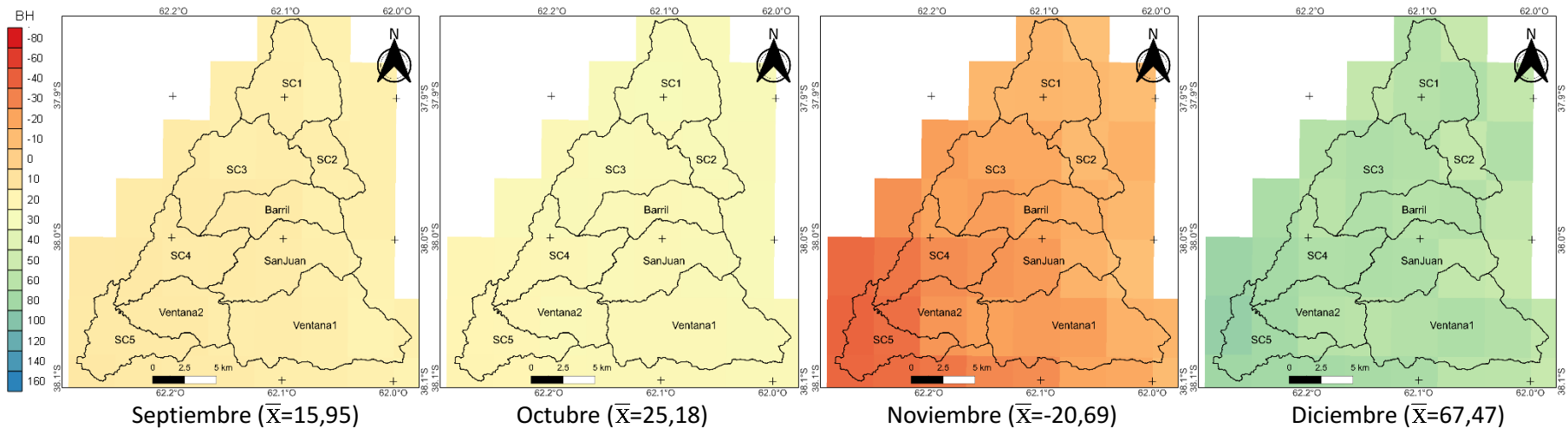


Mayo ($\bar{x}=38,89$)

Junio ($\bar{x}=13,46$)

Julio ($\bar{x}=37,16$)

Agosto ($\bar{x}=21,68$)



*Los cuadros de color rojo se deben a valores atípicos de la imagen satelital debido a interferencias en la recepción de señal.

Figura 30. Balance hidrológico (mm) del periodo 2012 - 2018.

4.1.3. Uso de suelo.

Para la elaboración de los mapas de cobertura y uso de suelo, se identificó las siguientes clases:

- **Pastizal-Roca:** esta cobertura se refiere a los ambientes de roquedal y serrano, con afloramiento rocoso descubierto completamente, o con una delgada capa de loess con escasa vegetación natural (Fotografía 10). Según Lizzi et al. (2007), este tipo de pastizales se caracteriza por tener poca biomasa aérea pero abundante biomasa subterránea.



Fotografía 10. Clase pastizal natural con roca
Fuente: Guzmán, 2020.

- **Pastizal natural:** se refiere a la vegetación natural como pastizal y pajonal serrano que abarcan una diversidad de especies vegetales principalmente gramíneas y leguminosas con abundante biomasa aérea. Los pastizales de tipo estepa herbácea xerófila están poblados por grandes extensiones de paja vizcachera acompañada de otras gramíneas como cebadilla, pasto miel, paja voladora, paja colorada, festuca y cortadera con pocos arbustos. Como lo indica Sanhueza et al.(2014), en las campañas realizadas se observó que los pastizales

naturales han sido profundamente modificados, debido a la propagación de especies exóticas por la presión antrópica que existe por el avance de la frontera agrícola y pastoreo sobre este tipo de vegetación, quedando así relegada a zonas periserranas, fondos de valle, en las que se abren paso las nacientes de los cursos de agua que conforman el río Sauce Chico.



Fotografía 11. Ambientes peri serrana y valle ocupado por pajonal y pastizal serrano.

Fuente: Guzmán, 2020.



Fotografía 12. Diversidad de especies presentes en el pastizal serrano.

Fuente: Guzmán, 2020.

- **Forestal:** en la CARSCH no existen sistemas forestales con fines productivos. Las especies arbóreas son sumamente escasas, encontrándose pocos chañares, piquillines, sauces, mollens o aguaribay. Como se menciona en el ítem 2.6.3. la cobertura forestal está en forma de manchones repartidos por toda el área de estudio y se usan con fines ornamentales, cortinas rompe viento, sobre todo en zonas de ganadería como montes de abrigo y en las márgenes de los arroyos, existe una presencia importante constituido principalmente por especies exóticas.



Fotografía 13. Forestaciones ubicadas en las márgenes del arroyo Sauce Chico.
Fuente: Guzmán, 2020.



Fotografía 14. Forestación utilizada como monte de abrigo para ganadería
Fuente: Guzmán, 2020.

- **Cultivo Anual:** se refiere a lotes que presentan una evolución típica de NDVI de cultivos ya sean invernales como trigo o de verano como girasol, maíz y soja. Para identificarlos se basó, observar valores bajos de NDVI, ya que los lotes de encuentran laboreados previo a la siembra, según criterio técnico de personal de INTA, alcanza su valor máximo cuando llega a la floración y maduración y luego se evidencia un descenso significativo de NDVI, debido a la cosecha.
- **Campo natural:** se refiere a lotes que estuvieron destinados a la agricultura, pero que en la campaña en que se realizó el mapa de cobertura y uso de suelo, no estuvieron laboreados, es decir están en descanso, por ello, los valores de NDVI son bajos. Por lo general estos lotes están destinados a pastoreo.



Fotografía 15. Lote con rastrojo



Fotografía 16. Lote con rastrojo en pastoreo.

- **Rotación cultivo forrajero:** describe a lotes que presentan dos picos de NDVI tanto en verano como en invierno y caídas intermedias como consecuencia de la cosecha, como se observa en la Figura 31, las situaciones b y e se refieren a las etapas de floración y maduración de los cultivos en los que alcanzan su máximo NDVI y las caídas bruscas de este valor se debe a etapas de cosecha y preparación del suelo para la siembra. Mediante el criterio técnico del INTA Tornquist, se diferenció de doble cultivo por el valor de NDVI, que en cultivos forrajeros en los puntos de muestreo es cercano o mayor a 0,8; mientras que en cultivos el valor máximo es bajo.

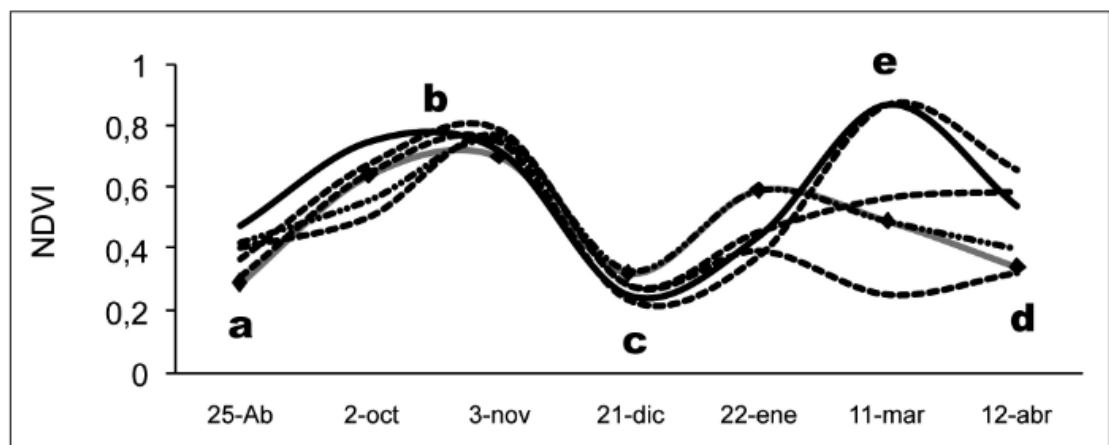


Figura 31. Evolución del NDVI, para rotación de cultivos forrajeros de invierno y verano (las líneas se corresponden a lotes de referencia de cultivos).

Fuente: Marini, 2008.



Fotografía 17. Forraje de verano en senescencia y forraje de invierno en crecimiento.

- **Pastura:** refiere a pastura permanente con base en alfalfa, cuyos valores de NDVI son intermedios, ya que existe poca estacionalidad por lo tanto las caídas en los valores de NDVI no distan mucho de los picos, y se presentan estables durante toda la campaña.



Fotografía 18. Lote con Pastura implantada y de cosecha.

- **Verdeo de verano:** son lotes que durante la primavera están sembrados o preparados para la siembra y cuando comienza el verano o en su transcurso los valores de NDVI son muy altos, cercano o superior a 0,8; mientras que cultivos agrícolas presentan valores de NDVI menores a 0,6.



Figura 32. Ejemplo de cultivos de verdeo de verano.
Fuente: Aello et al., 2018.

- **Urbano:** Se corresponde a las urbanizaciones Villa Serrana la Gruta y Villa San Andrés de las Sierras. Los primeros pobladores datan de 1998/1999, pero a partir del 2002, que obtuvieron personería jurídica y empieza la cobertura de servicios básicos, terminando de consolidarse hacia el 2005 en adelante (Sociedad de Fomento San Andrés, n.d.).



Figura 33. Vista aérea de Villa Serrana La Gruta.
Fuente: Villa Serrana, 2003.



Fotografía 19. Villa Serrana la Gruta.

Fuente: Guzmán, 2020.

5.5.2. Análisis del cambio de uso / cobertura de suelo

Registros históricos de principios del siglo XIX describen la basta fauna y flora que los primeros viajeros encontraron en su paso por las sierras. Sin embargo, en la actualidad resulta casi relictual la presencia de pastizal natural, ya que la expansión de áreas agrícolas ha reducido notablemente la cobertura original, disminuyendo considerablemente la fauna asociada. Los pastizales de los valles interserranos son los que más modificaciones tienen por actividades forestales y agropecuarias (Redondas de Pascualini y Fiordelmondo, 1991).



Fotografía 20. Avance de la agricultura sobre los valles interserranos.



Fotografía 21. Avance de la ganadería sobre las laderas de las sierras.

Las Figuras 34, 35 y 36 muestra el alto grado de antropización de la CARSCH. Las actividades productivas que mayormente se realizan son agropecuarias, de ahí que la principal producción se centre en especie forrajeras, el tipo de ganado presente en la cuenca son vacunos, ovino y caprino.

Las coberturas naturales como pastizal y pastizal con roca representan entre el 36 a 48 % de la superficie de ocupación de la cuenca, mientras que las coberturas/usos relacionados a la agricultura ocupan la superficie restante.

Esta intensificación del uso agropecuario se ha extendido principalmente sobre los valles interserranos, faldeos de las sierras y ribera de los arroyos. Las zonas de vegetación natural se han reducido de 48,5% en el periodo 1988-1989 a 36% en la campaña 2005-2006 y finalmente en el 2017-2018 el porcentaje es de 38,1%. Esta recuperación en el último periodo puede deberse al incremento de campo natural. Otra grave amenaza hacia los relictos de pastizal y pajonal serrano son los constantes incendios forestales en las sierras (Michalijos et al., 2022).

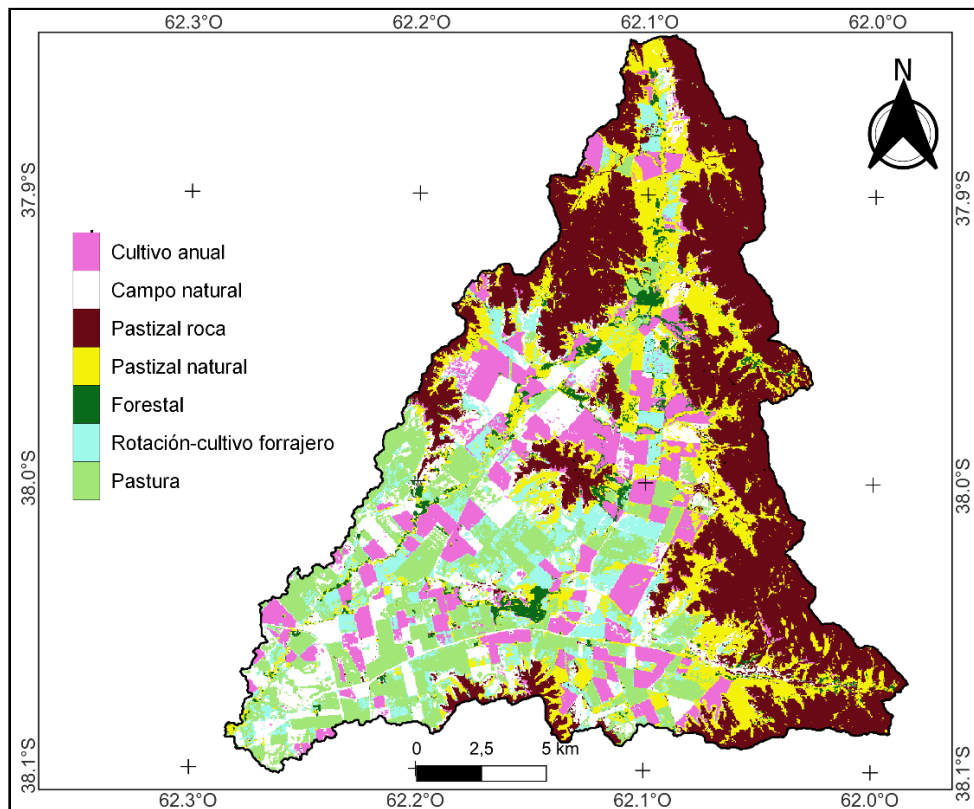


Figura 34. Mapa de uso/cobertura de suelos de la campaña 1988-1989.

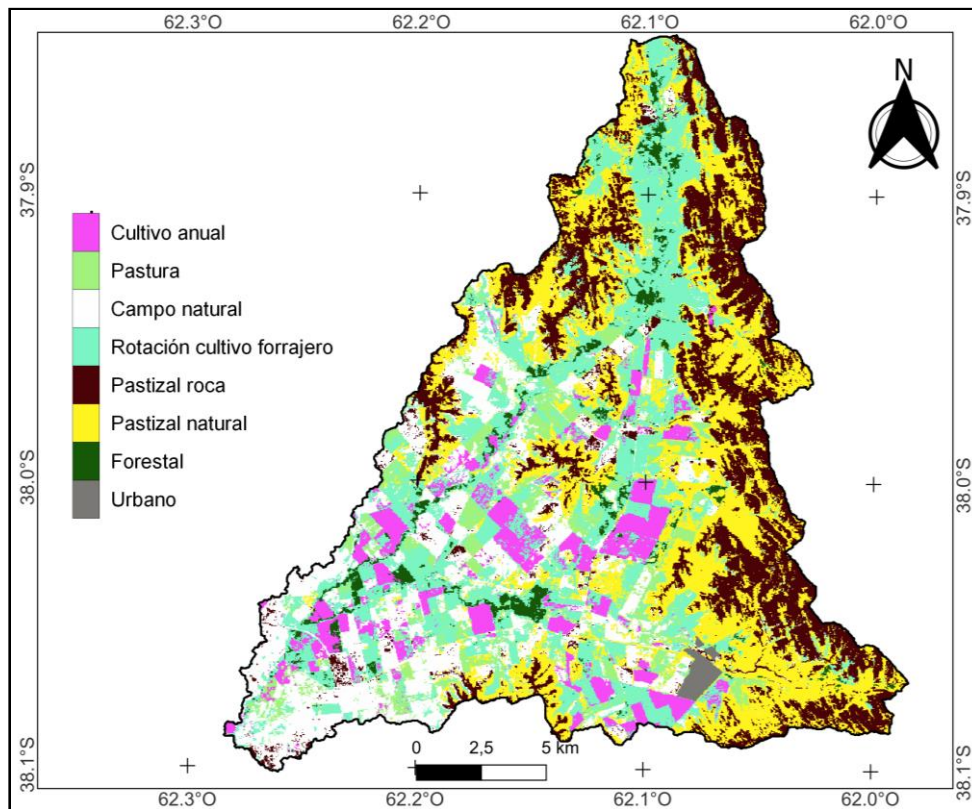


Figura 35. Mapa de uso/cobertura de suelos de la campaña 2005-2006.

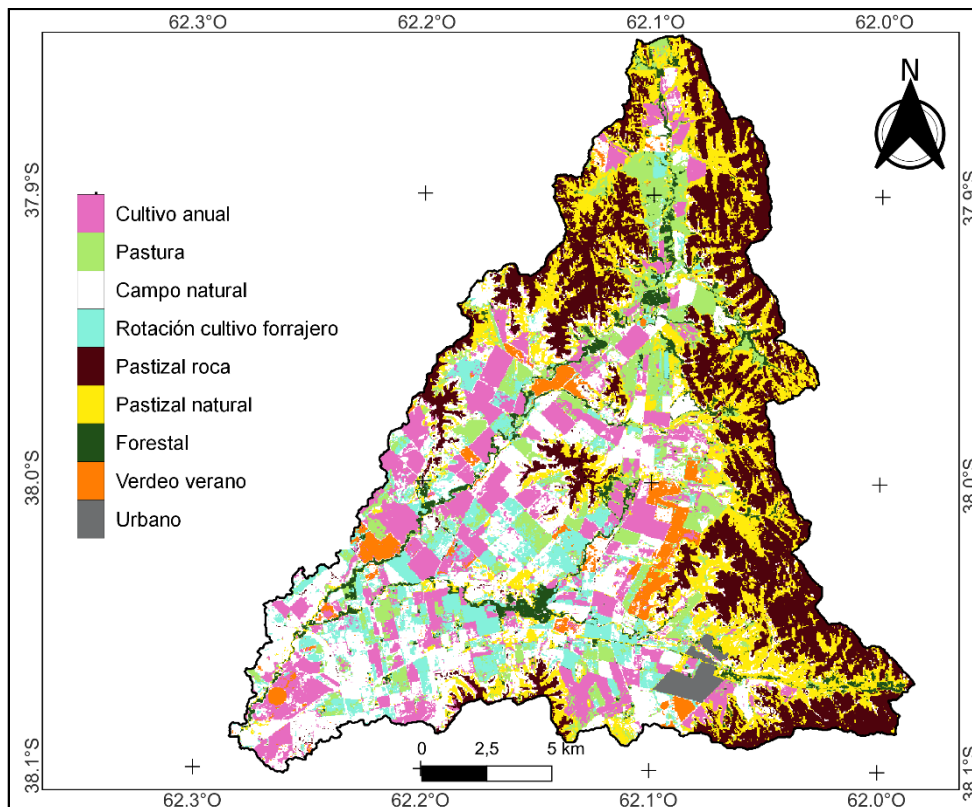


Figura 36. Mapa de uso/cobertura de suelos de la campaña 2017-2018.

La Figura 37 es un resumen del cambio que ha existido en cada una de las coberturas/uso de suelo a lo largo de los 31 años de estudio. En esta gráfica se confirma la disminución de la cobertura natural, la aparición de nuevos usos como el urbano sobre el arroyo Ventana, en el último periodo de observa un nuevo manejo como es la implementación de verdeos de verano y la situación que llama la atención es el incremento del campo natural, que a su vez es un indicador del aumento en la ganadería, ya que la mayor parte de estos campos están destinados al pastoreo, corroborando de esta forma lo indicado por Marini (2008) y Picardi y Giacchero (2015).

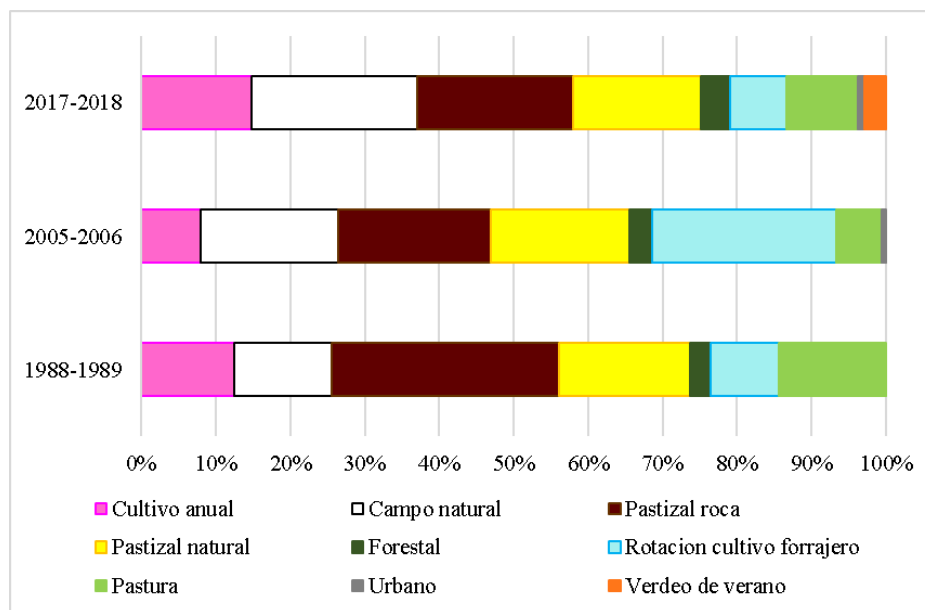


Figura 37. Cambios en la superficie de ocupación de la cobertura y/o uso de suelo en el periodo 1988-2018.

4.1.3.1. Índice de pérdida de suelo por erosión hídrica superficial.

a) Factor de erosividad de la lluvia ($R, J \cdot cm \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$).

La Figura 38, muestra la variabilidad espacial y temporal del factor R. Dicha variabilidad se encuentra en coincidencia con los rangos que muestra el mapa de factor de erosividad de las lluvias (R) en la República Argentina para el área de estudio (Gaitán et al., 2017). Para este caso los rangos están entre 400 y 500 $J \cdot cm \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$.

Al relacionar las Figuras 21 (DS de la anomalía pluvial) y 38, se observa que el valor del factor R para cada periodo tiene una relación directa con la DS, es decir mientras más homogéneos son los años menor es la erosividad.

Crettaz et al. (2016), encontraron una alta correlación el factor R y el IMF, obtenidos a partir de registros pluviométricos. Para el presente estudio se observó que los valores de R estimados a partir del IMF, tanto para mediciones meteorológicas y provenientes de modelos satelitales, que representan la intensidad de las lluvias, existen situaciones como es el caso de los años 1988 y 1995 que presentan una lluvia anual acumulada de 606 y 627 mm, respectivamente (Estación los Silos-Tornquist), pero su valor de R anual fue de 503 y 430 $J \cdot cm \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$. Esta diferencia de 73 puntos se debe a la diferencia de precipitación intra anual y su agresividad.

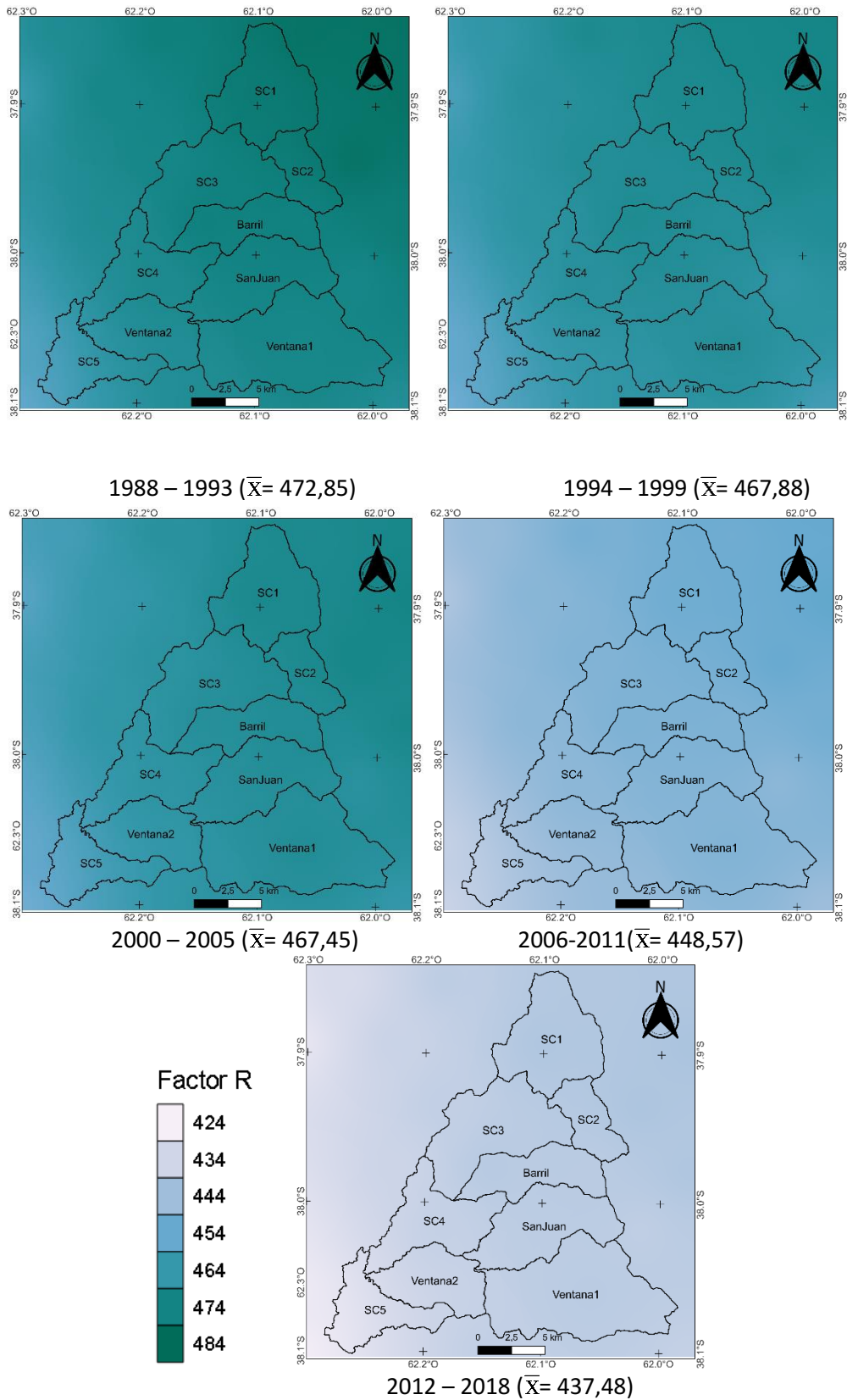


Figura 38. Factor de erosividad de la lluvia ($R, J \cdot cm \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$) para el periodo 1988 - 2018.

b) Factor de erodabilidad del suelo ($K, Mg \cdot m^2 \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot J^{-1} \cdot cm^{-1}$).

La Figura 39 muestra la variabilidad espacial de la susceptibilidad del suelo a erosionarse debido a sus propiedades. Se observa que los valores más altos de K y por lo tanto más susceptibles, se encuentran de los zonas fluviales y alrededores.

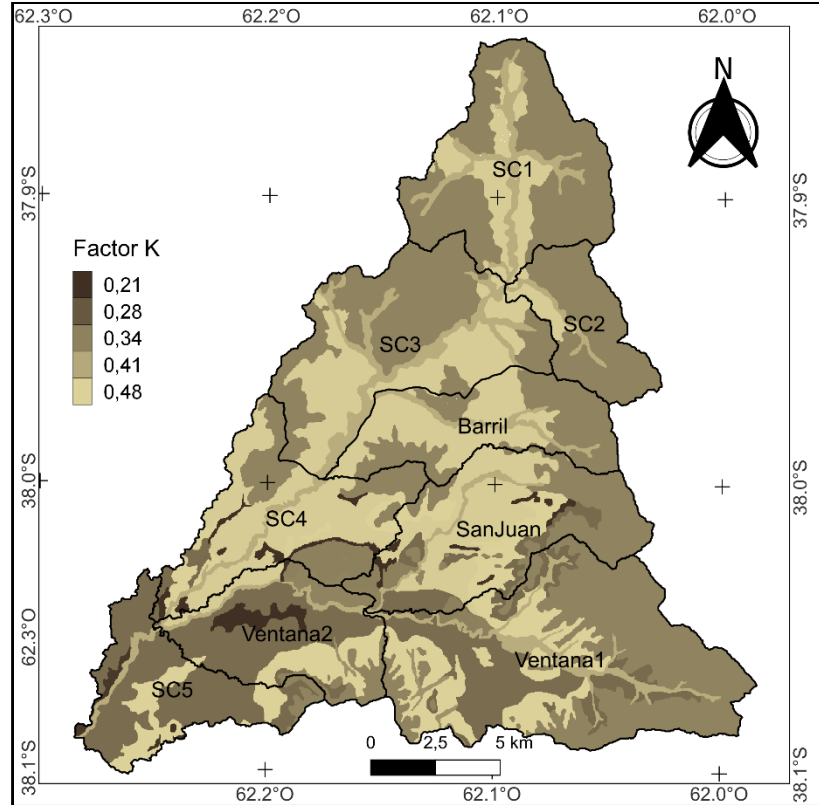


Figura 39. Factor de erodabilidad del suelo ($K, Mg \cdot m^2 \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot J^{-1} \cdot cm^{-1}$) para el periodo 1988 - 2018.

c) Factor de longitud e inclinación de la pendiente (LS).

La longitud y grado de pendiente del terreno está representado por el factor LS (Orúe et al., 2007). La Figura 40, muestra la variabilidad espacial del factor LS, a medida que se incrementa el valor de este factor, mayor es el riesgo de erosión, de ahí que zonas con pendiente muy fuerte y escarpada (Figura 40) presenten los valores de LS más altos.

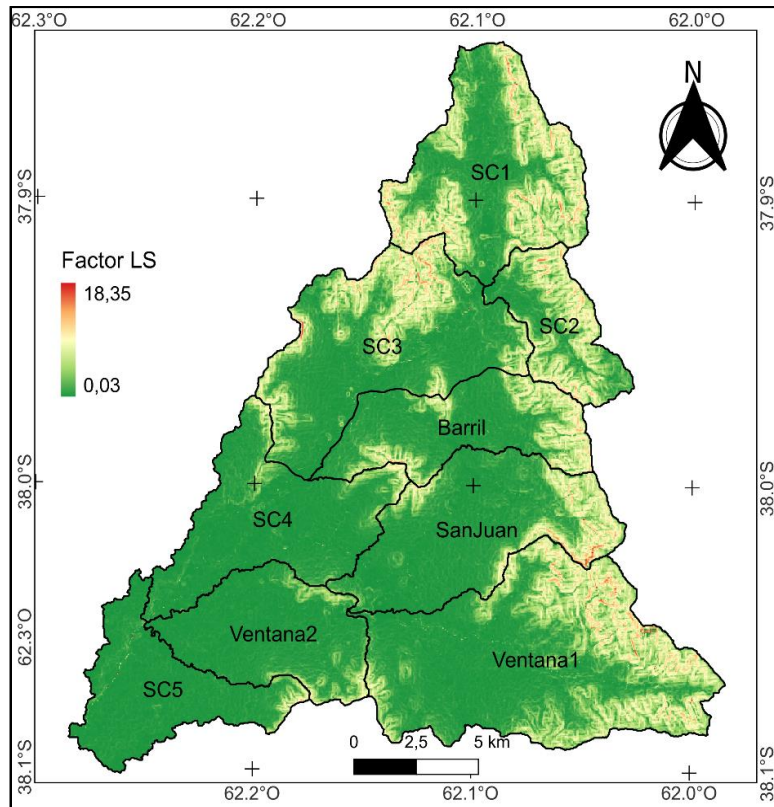


Figura 40. Factor de longitud e inclinación de la pendiente (LS) de la CARSCH.

d) **Factor de cultivo (C).**

La variación espacial y temporal del factor de cobertura C, está representada en la Figura 41. En la CARSCH este factor varía entre 0,01 a 1,05. El valor más alto se observa en los relictos de cobertura natural (pastizal natural y pastizal con roca).

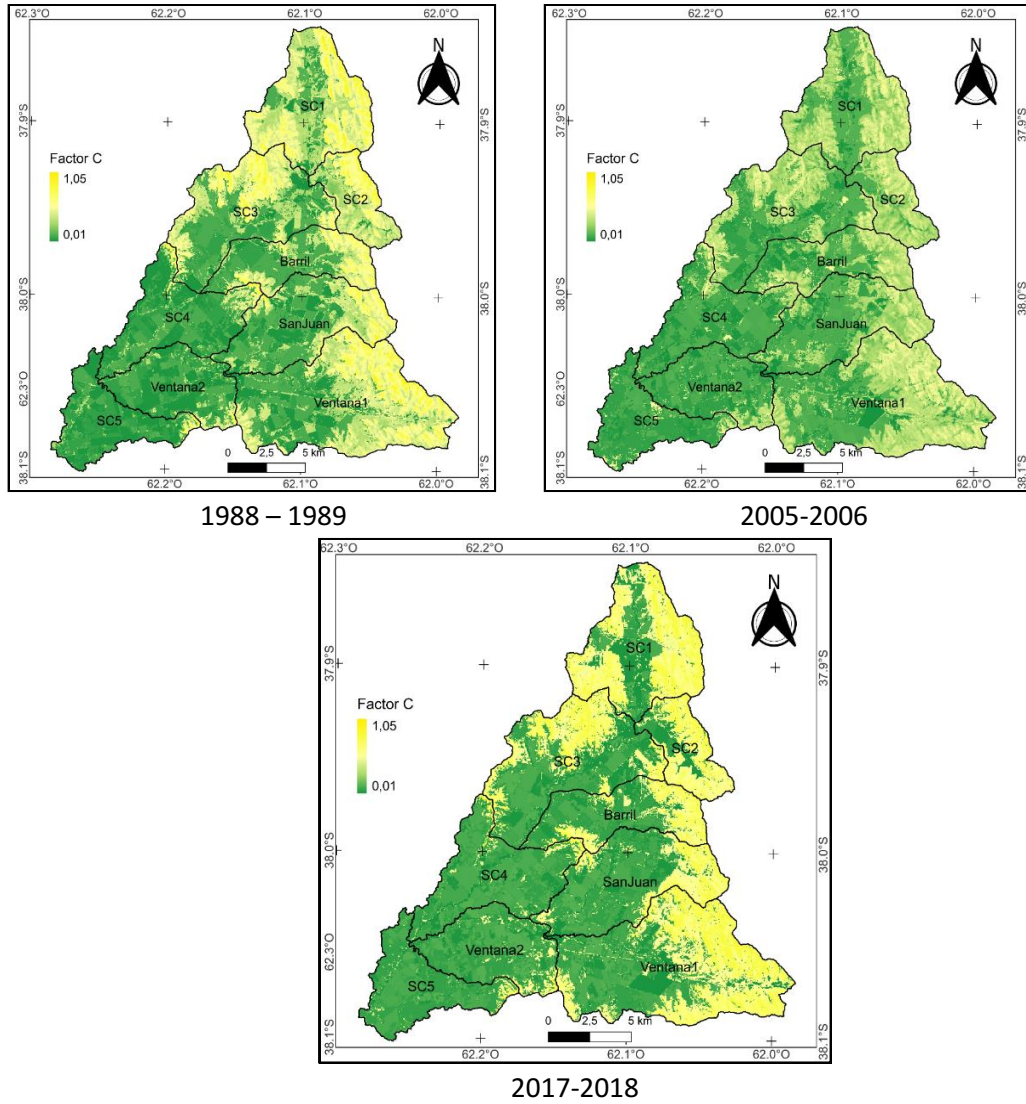


Figura 41. Factor de cultivo (C) para distintos periodos de estudio.

e) **Factor de prácticas de manejo conservacionista (P).**

Dado que, en los trabajos revisados sobre aplicación de la USLE en Argentina (Gaitán et al., 2017), el factor P no presenta valores que hagan referencia a prácticas conservacionistas diferentes a las terrazas y curvas de nivel (Gaspari et al., 2013). Para el presente estudio únicamente se georreferenció practicas conservacionistas de curvas de nivel.

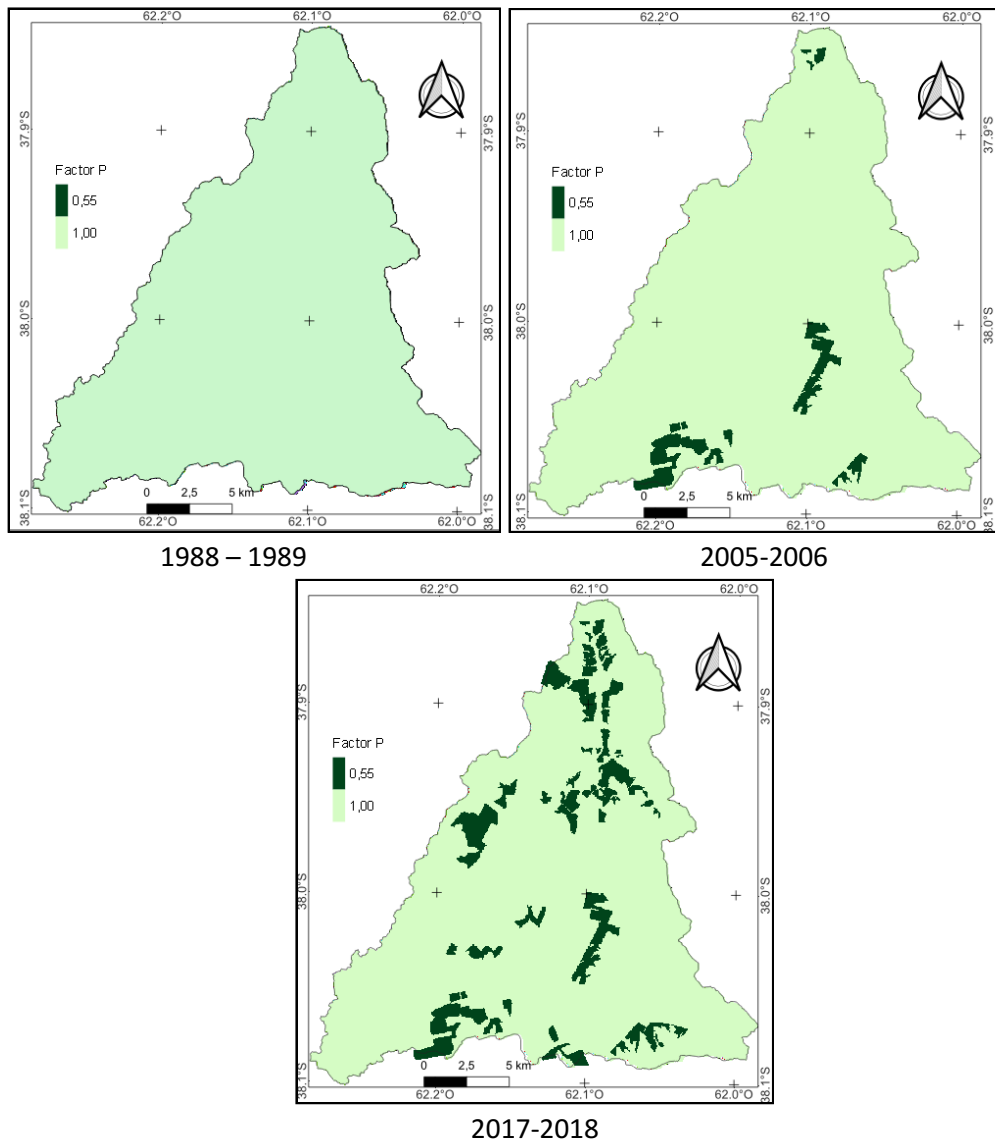


Figura 42. Factor de prácticas de manejo conservacionista (P) para distintos periodos de estudio.



Fotografía 22. Lote en curvas de nivel, como práctica conservacionista.

Las Figuras 43 y 44, hacen alusión a la variabilidad espacial y temporal de la USLE, los principales cambios se observan en las zonas serranas con mayor pendiente y vegetación natural. Estas zonas muestran los valores más altos de pérdida de suelo por erosión hídrica. Entre el periodo 2000 a 2011 se observa una disminución en el nivel de erosión en comparación al periodo anterior, pero en los siete años siguientes (2012-2018), nuevamente existe un repunte en las áreas de zonas con riesgo de erosión mayor a 200 Mg/ha*año.

Esta variabilidad en las zonas serranas en las que predomina relictos de vegetación de natural como pastizal y pastizal con roca, según Lizzi et al. (2007); Gil et al. (2016) y Rodriguez y Gaspari (2019), se debe a varios factores como ser: la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones, mismas que presentan una tendencia no significativa de disminución (Figura 22); avance de la agricultura y ganadería sobre el cordón serrano, que contribuyen a la propagación de especies introducidas; resiliencia de estas zonas a incendios constantes en épocas de sequía como los acaecidos en los años 2013 y 2018, en estos casos a pesar de una recuperación rápida en los valores de NDVI previos al incendio, queda pendiente determinar las características de la vegetación de rebrote.

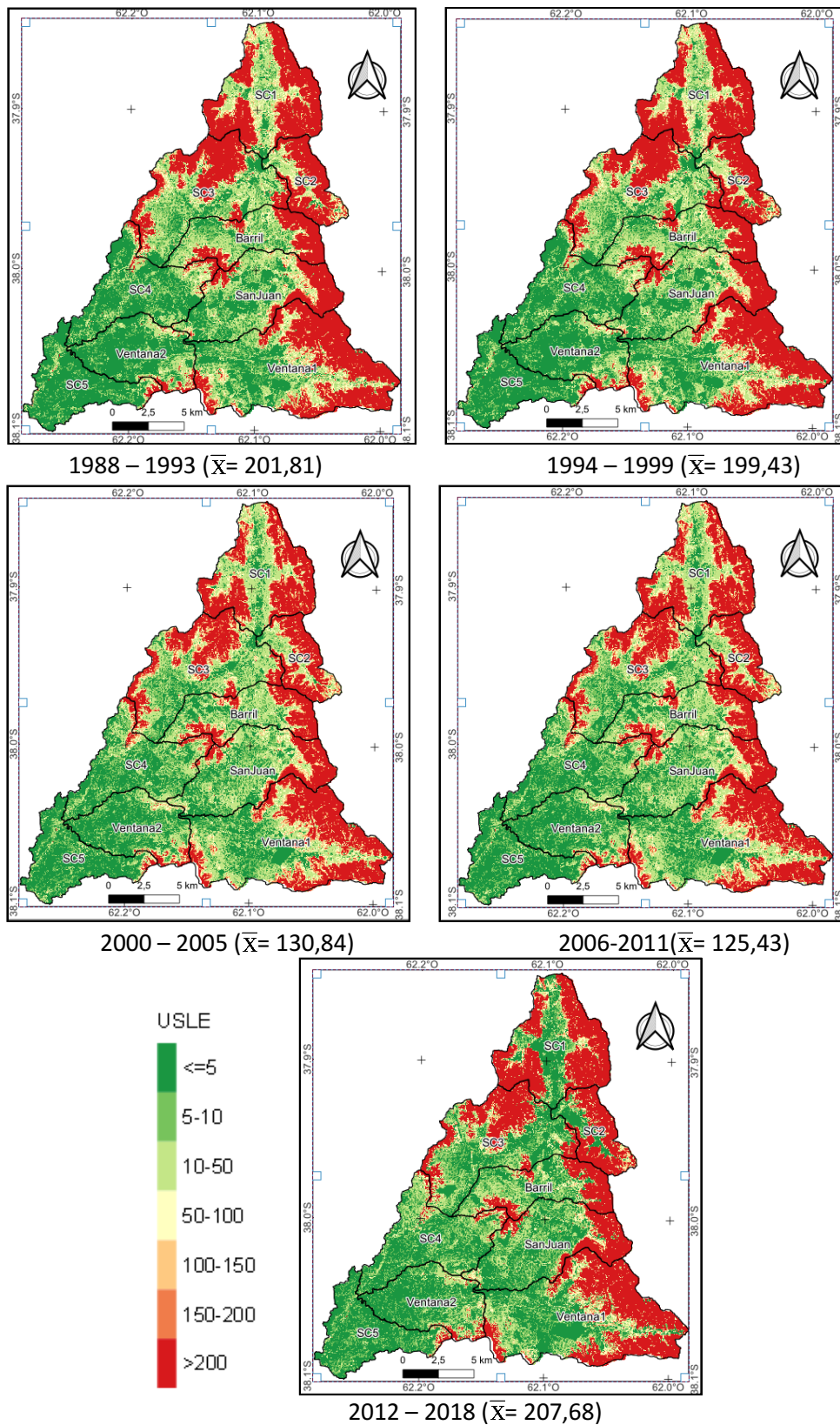


Figura 43. Pérdida de suelo (USLE, Mg/ha*año) para distintos periodos de estudio.
Fuente: Elaboración propia

La zona de estudio tiene un alto grado de antropización con transformaciones significativas a partir de 1980, por la tendencia del país a intensificar la producción agrícola (Marini, 2008). En el caso de la CARSCH, las zonas bajas con pendiente menor al 12%, están destinadas a la agricultura, debido a sus características topográficas y edáficas, presentan menor riesgo de erosión (menor a 50 Mg/ha*año), la variabilidad que se observa se debe al manejo de los lotes. Disminución de erosión hídrica en predios con medidas conservacionistas o aplicación de rotación de cultivos, e incremento en áreas de campo natural (rastrojo o lote en descanso).

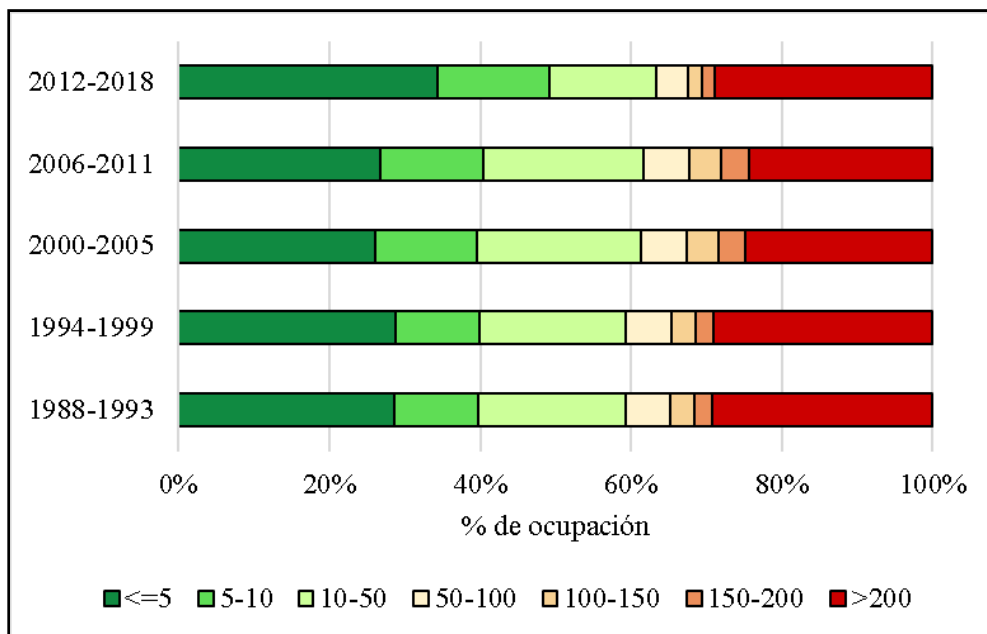


Figura 44. Porcentaje de ocupación de los diferentes niveles de USLE (Mg/ha*año) para distintos periodos de estudio.

4.1.4. Construcción del índice de vulnerabilidad hidrológica (IVH)

El IVH es una forma operacionalizar los conceptos expuestos, que son base de la presente tesis. Los indicadores seleccionados representan a cada uno de los factores que caracterizan las propiedades inherentes de la CARSCH, los cambios y variabilidad en temperatura, precipitación y uso de suelo.

El IVH se encuentra graduado en un rango de 0 (nula vulnerabilidad) a 1 (máxima vulnerabilidad). El modelo de medición del IVH basado en la metodología planteada por Anandhi y Kannan (2018), no es estático sino que cambian con el tiempo y el

espacio, como se ha tratado de resumir en la Figura 45. Para el área de estudio el IVH varía entre 0 y 0,5; las zonas serranas presentan mayor variabilidad del IVH e incremento del valor. Siendo las subcuencas SC1 y SC2 las que presentan los rangos más altos de vulnerabilidad, debido a que sus superficies de ocupación están predominadas por pendientes escarpadas.

Las zonas en azul o de baja vulnerabilidad se corresponden con usos de suelo dedicados a la agricultura en zonas de bajo relieve (ondulado-plano).

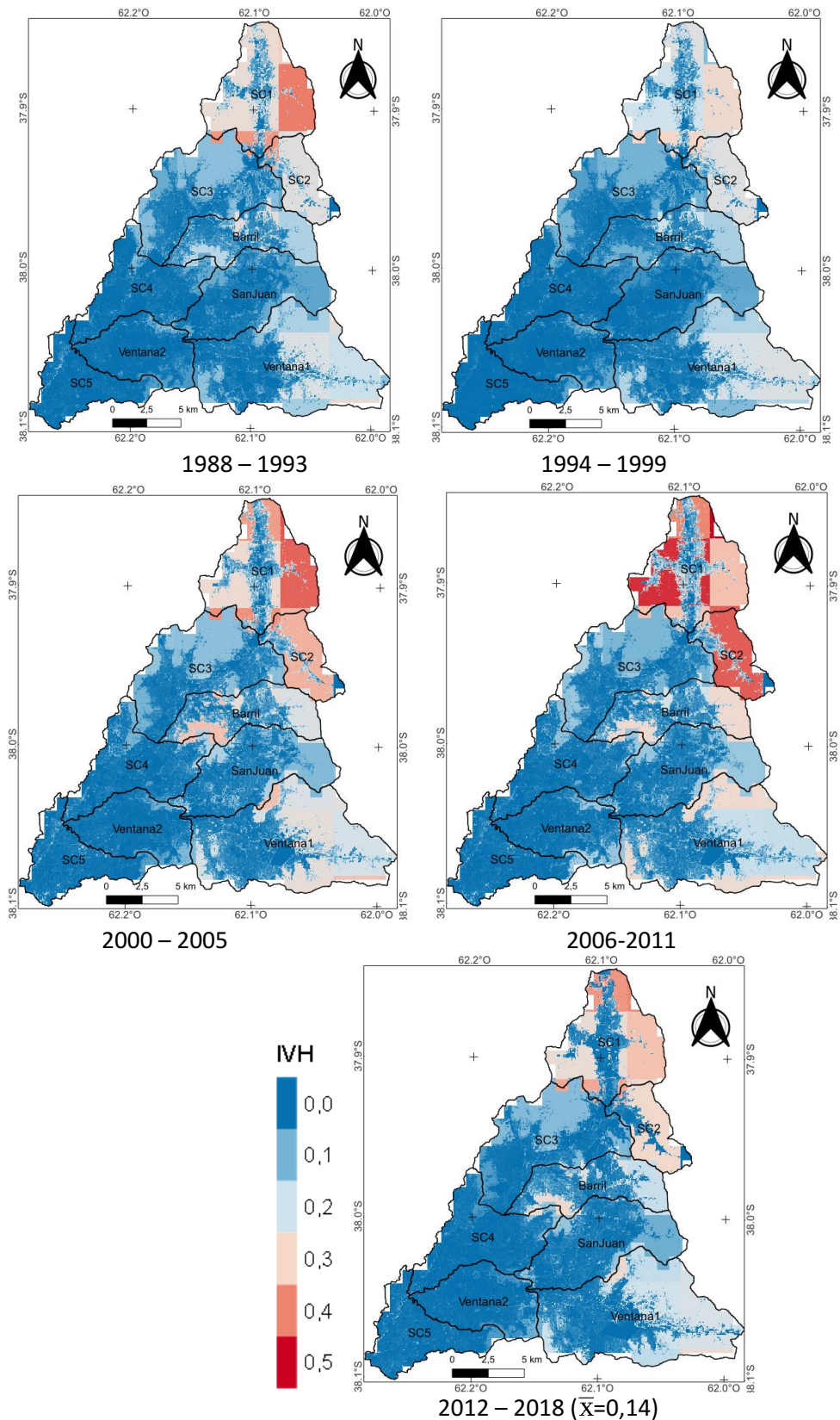


Figura 45. Índice de vulnerabilidad hidrológica (VH), para distintos periodos de estudio.

4.2. Comprobación de hipótesis.

4.2.1. Índice de Provisión de Servicios Ecosistémicos (IPSE) como indicador de uso de suelo.

La Figura 46 muestra la distribución espacial de la estimación de los servicios Ecosistémicos a través del IPSE. Este índice se basa en dos atributos de la dinámica estacional del NDVI, que guarda estrecha relación con la densidad de vegetación y su vigorosidad (Paruelo, 2008). A partir de esta relación se puede decir que el IPSE, es un indicador directo del secuestro de carbono y regulación de la disponibilidad del agua (Paruelo et al., 2016).

En el área de estudio se observa un incremento de los valores de IPSE en zonas dedicadas a la agricultura, esto se podría deber a las prácticas de manejo que se han venido implementando como la rotación de cultivos en invierno y verano. Sin embargo, lo contrario sucede en las zonas serranas de elevada pendiente, en las que se observa un ligero incremento del IPSE, coincidiendo con el periodo húmedo (2012-2018).

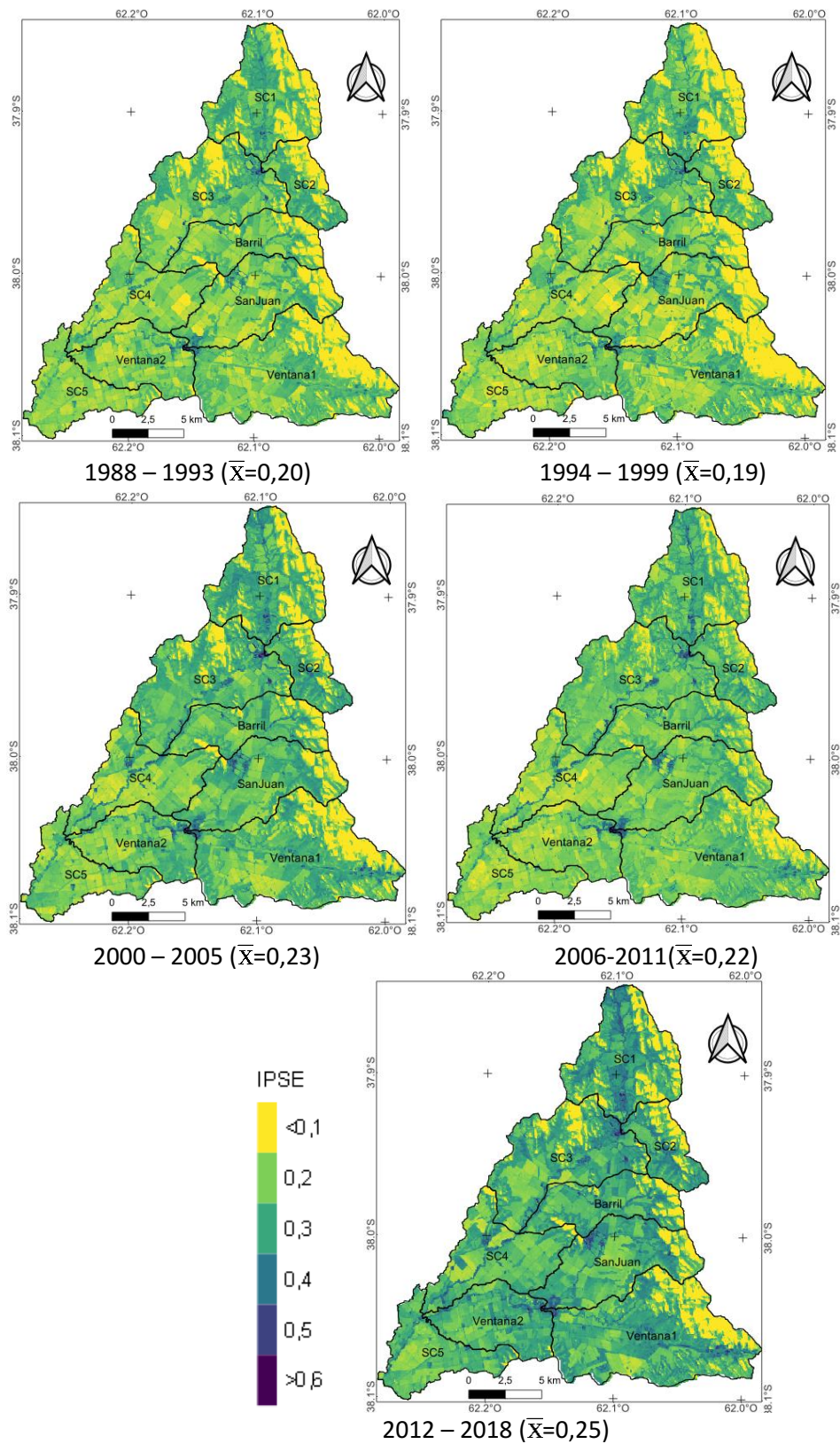


Figura 46. Índice de provisión de servicios ecosistémicos, para distintos periodos de estudio.

De acuerdo a la clasificación de tendencia presentada por Vu y Mishra (2016), en la Figura 47, se observa que la provisión de servicios ecosistémicos en la CARSCH presenta una tendencia creciente significativa principalmente en zonas dedicadas a la agricultura y con medidas de conservación; en gran parte del cordón serrano de Curamalal y en menor proporción en el Ventania predomina la tendencia creciente y decreciente no significativa.

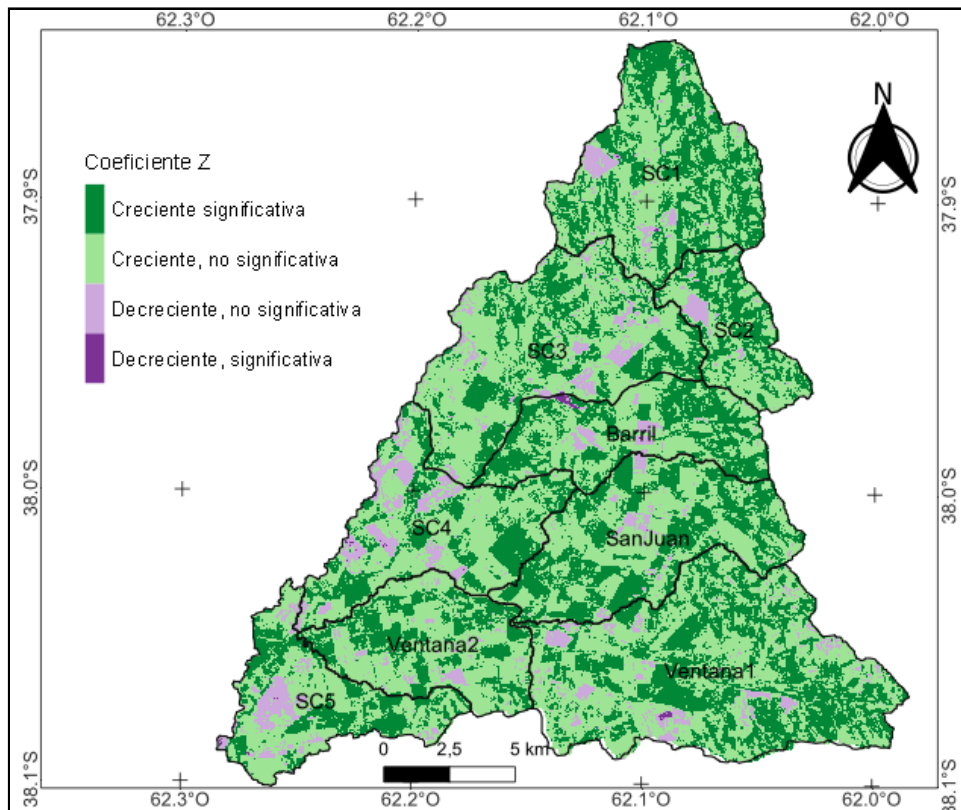


Figura 47. Tendencia del Índice de provisión de servicios ecosistémicos, para el periodo 1988-2018.

4.2.2. Coeficiente de correlación de Pearson (r).

Para la comprobación de hipótesis se seleccionó el índice IPSE, debido a que permite caracterizar la variabilidad de la fenología de la vegetación mediante el NDVI y sus descriptores funcionales, factores que están estrechamente relacionados al cambio de uso o cobertura de suelo (Paruelo et al., 2016).

La Figura 48 muestra el nivel y tipo de correlación que existe entre el IVH e IPSE con un 1km de resolución espacial, para el periodo 1989-2018. En las zonas serranas y punto de cierra de la cuenca en estudio, se observa una concentración de valores de r

negativos que indican que a mayor IPSE es menor la vulnerabilidad de las zonas, en áreas en las que predomina la agricultura y ganadería no se observa un patrón en la correlación entre IPSE e IVH.

Es decir, se observa que en el área de estudio existe cierta influencia de la cobertura vegetal natural en la disminución de la vulnerabilidad hidrológica, ya que como lo indica Paruelo et al. (2016), mayor IPSE se traduce en un incremento del servicio ecosistémico relacionado a disminución del riesgo de erosión, mayor capacidad de infiltración y dentro del área de estudio Lizzi et al. (2007) al caracterizar la vegetación natural de Sierra de la Ventana a distintas altitudes resalta la capacidad estabilizadora del suelo a través de su incremento de biomasa subterránea.

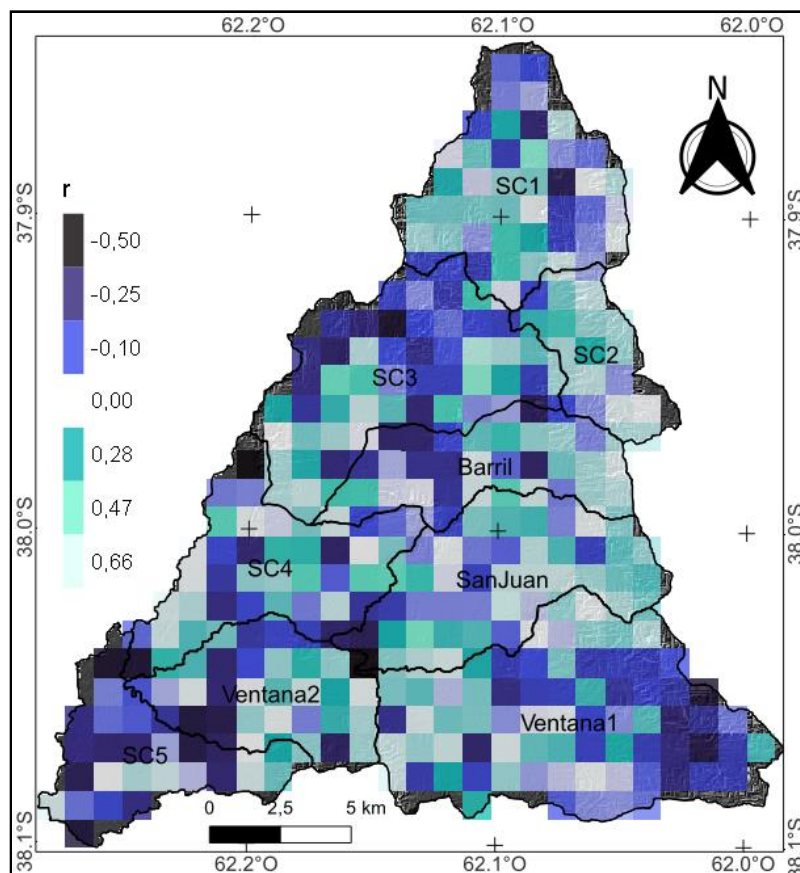


Figura 48. Coeficiente de correlación de PEARSON (r), para el periodo 1988-2018.

4.2.2.1. Test de significancia del coeficiente de correlación de Pearson (CCP).

Al aplicar el test de significancia se observa que en pocas zonas existe una correlación significativa entre el IVH e IPSE, los valores significativos se concentran principalmente en la cadena serrana Curamalal con zonas de vegetación natural y zonas boscosas. Como se explicó en el ítem anterior, existe una relación entre la vulnerabilidad hidrológica y la cobertura vegetal natural, sin embargo, esta no llega a ser significativa en la mayor parte de los casos.

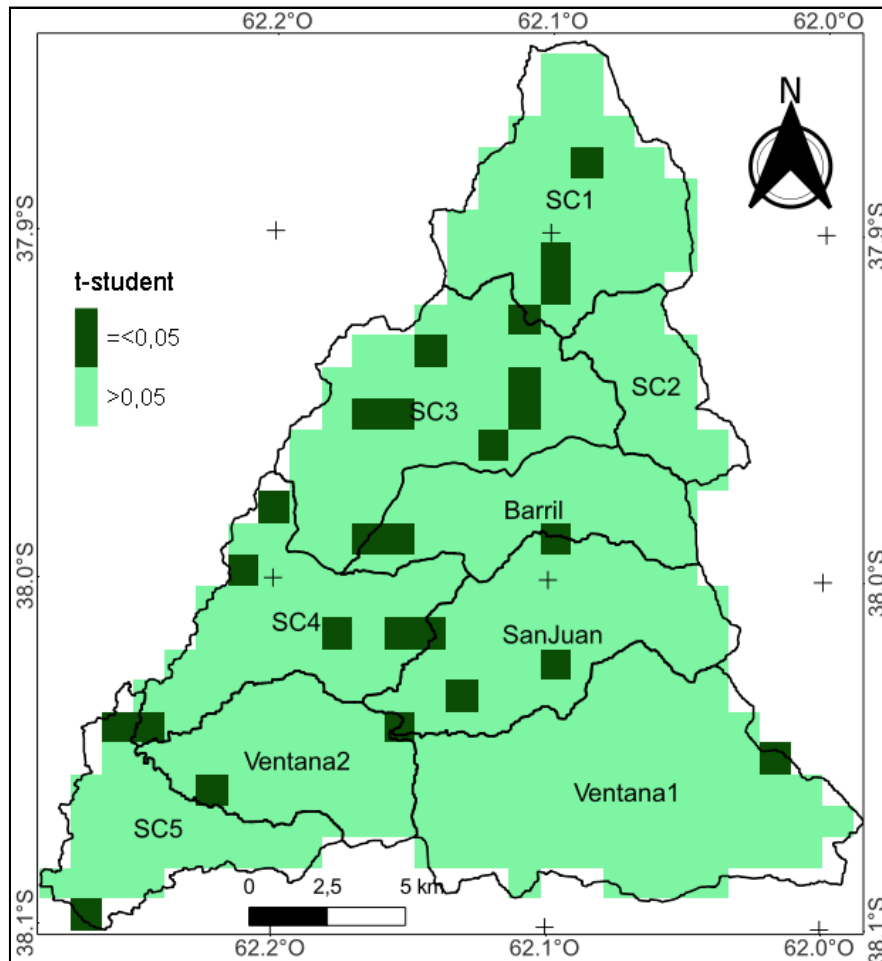


Figura 49. t- valor de student para el periodo 1988-2018.

Al buscar un factor que tenga mayor influencia sobre la vulnerabilidad hidrológica en la zona de estudio, se realizó una correlación lineal - espacial con la pendiente, para ello se empleó el complemento RasterDataPlotting de QGIS y el programa R. La Figura 50 muestra la correlación espacial existente entre la pendiente expresada en porcentaje

versus el IVH. La ecuación de la correlación lineal es $f(x) = 3,6394 + 125,6904 * x$, r^2 de 43% y un r de 0,73.

Del análisis estadístico se puede inferir que la presencia de las sierras son un factor determinante en la vulnerabilidad hidrológica de la cuenca sobre todo en las subcuencas de cabecera, criterio que coincide con los estudios realizados por Gaspari (2007); Torrero (2009) y Guzmán (2020), en los que se observa que la mayor degradación ambiental por erosión se produce principalmente en la zona serrana.

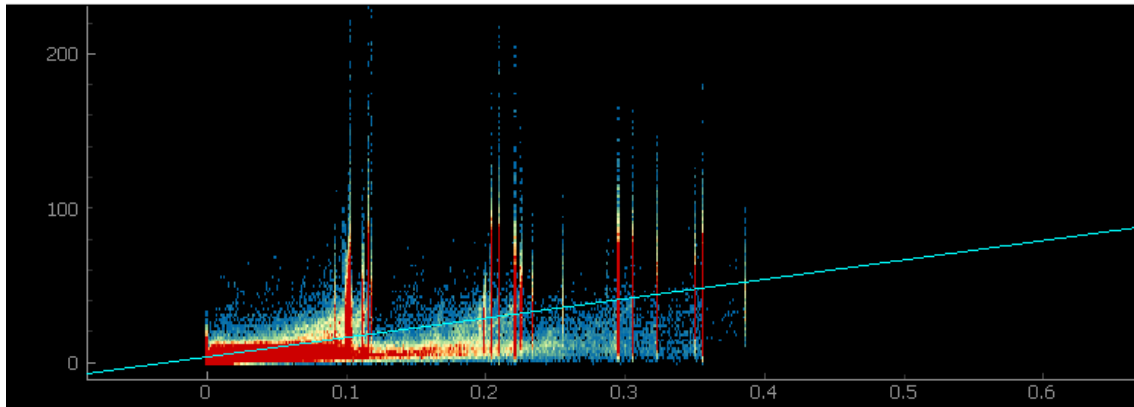


Figura 50. Correlación espacial de la pendiente expresada en porcentaje Vs IVH promedio.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. Conclusiones.

En años que presentan anomalías de precipitación y temperatura ambiente la vulnerabilidad hidrológica es mayor como se observa en el periodo 2000-2011.

Existe cierta tendencia al incremento de la temperatura ambiente y una disminución de las precipitaciones, que, a pesar de no ser estadísticamente significativas, otorgan un indicio de periodos cada vez más frecuentes con años anómalos.

Un incremento de pérdida de suelo por erosión hídrica en las zonas serranas, está dado por la fragilidad de la cuenca debido a las características edáficas y de cobertura, como muestra la USLE.

La verificación estadística de la hipótesis indica que la cobertura vegetal guarda relación con el IVH, pero el factor determinante es la configuración topográfica o pendiente, de ahí la importancia de establecer medidas de conservación en las zonas serranas y periserranas para disminuir la vulnerabilidad de la cuenca.

El análisis geoespacial del balance hidrológico de la cuenca en una escala espacial de 4x4km, expresa que las zonas serranas presentan un comportamiento particular, que pueden estar relacionado con la configuración topográfica, donde en los periodos húmedos (2012-2018) o secos (2006-2011), indican mayor exceso hídrico que el resto de la cuenca y esto denota su importancia como zona de recarga y de contribución a la seguridad hídrica de la zona.

Es importante el manejo y conservación tanto en las zonas serranas, como en las zonas circundantes a los arroyos, no solo por su importancia hidrológica para la seguridad hídrica de toda la cuenca, sino también porque los humedales presentes en la red de drenaje sirven de conexión entre los ecosistemas serranos.

El uso de información proveniente de modelos satelitales da la posibilidad de realizar análisis espacio-temporales, permitiendo captar la variabilidad de la respuesta hidrológica de la cuenca.

Los resultados alcanzados en la presente tesis definen un índice de vulnerabilidad hidrológica a partir de información espacial, que es útil para el establecimiento de medidas de conservación en función de la topografía y uso del suelo, acorde a las características de la zona, conformando una herramienta útil para que los tomadores de

decisiones asignen de manera óptima las inversiones en conservación, producción, turismo y recreación en la CARSCH.

5.2. Recomendaciones.

Considerar el uso de información satelital como un complemento a la registrada por mediciones a campo, para poder comprender la variabilidad espacial y temporal del funcionamiento de la cuenca hidrográfica en este caso.

Considerar la presente investigación como instrumento que permita comprender el funcionamiento espacial y temporal de la Cuenca Alta del Río Sauce Chico, para tomar decisiones de conservación, reconociendo el valor que tiene para la población circundante, desde el punto de vista hídrico y turístico.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Abdeta, G. C., Tesemma, A. B., Tura, A. L., y Atlabachew, G. H. (2020). Morphometric analysis for prioritizing sub-watersheds and management planning and practices in Gidabo Basin, Southern Rift Valley of Ethiopia. *Applied Water Science*, 10(7). <https://doi.org/10.1007/S13201-020-01239-7>
- Adger, N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 268–281. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2006.02.006>
- Adler, J., y Parmryd, I. (2010). Quantifying colocalization by correlation: The Pearson correlation coefficient is superior to the Mander's overlap coefficient. *Cytometry Part A*, 77(8), 733–742. <https://doi.org/10.1002/cyto.a.20896>
- Aello, M., Cicchino, M., y Otondo, J. (2018). Verdeos de verano para pastoreo o reserva forrajera. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*, 1–5.
- Albouy, R., y Bonorino, G. (1997). Hidrogeología de la cuenca superior del río Sauce Chico, Sierras Australes, Provincia de Buenos Aires. *Asociación Geológica Argentina*, 52. Retrieved from [https://doi.org/10.15359/rgac.58-1.12](https://books.google.com.ar/books?id=R-A33RuUAiUCypg=PA81ylpg=PA81ydq=albouy+saucos+chicoysource=blyots=ZyYbi6jEr5ysig=ACfU3U1f6ga8sp_fiBhWHLUYzTQ83NIWcgyhl=es-419ysa=Xyved=2ahUKEwilkJ_k79LkAhUvIbkGHa4BDYQQ6AEwAHoECAkQAQ#v=onepageq=albouy saucos chicoyf=)
- Amiotti, N. M., Bravo, O., Zalba, P., y Peinemann, N. (2007). Effect of landscape position on the acidification of loess-derived soils under *Pinus radiata*. *Austral Ecology*, 32(5), 534–540. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2007.01725.x>
- Anandhi, A., y Kannan, N. (2018). Vulnerability assessment of water resources – Translating a theoretical concept to an operational framework using systems thinking approach in a changing climate: Case study in Ogallala Aquifer. *Journal of Hydrology*, 557, 460–474. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.032>
- Araya, A., y Calvo, G. (2017). Diagnóstico sobre la vulnerabilidad ecológica y calidad del agua en la quebrada La Central, Pacayas de Alvarado, Costa Rica. *Tecnología En Marcha*, 30. <https://doi.org/10.18845/tm.v30i3.3272>
- Arulbalaji, P., y Padmalal, D. (2020). Sub-watershed Prioritization Based on Drainage Morphometric Analysis: A Case Study of Cauvery River Basin in South India. *Journal of the Geological Society of India*, 95(1), 25–35. <https://doi.org/10.1007/S12594-020-1383-6>
- Ataucuri, R., y Caceres, K. (2018). *Análisis de la vulnerabilidad, hidrológica del tramo de la carretera INTEROCEANICA comprendido entre el km 12 + 000 al km 14+00 en la variante de Uchumayo Arequipa*. Universidad San Agustín de Arequipa.

- Avila, L. J., Fulvio Perez, C. H., Minoli, I., y Morando, M. (2012). A new species of Homonota (Reptilia : Squamata : Gekkota : Phyllodactylidae). *Zootaxa*, 3431, 19–36.
- Behrends Kraemer, F., Chagas, C., iBañez, luCas, CarFagno, patriCia, y Vangeli, seBastián. (2018). Análisis de la erosividad de las lluvias para el partido de san pedro (Bs. As.). *Ciencia Del Suelo*, 36(1), 124–137.
- Bolsa de Comercio de Rosario. (2023). *Siguen los recortes para la cosecha, Argentina: la soja pierde 4 Mt y el maíz 3 Mt*. Informe Especial Mensual Sobre Cultivos. Retrieved from https://www.bcr.com.ar/sites/default/files/2023-04/informe_especial_159_2023_04_12.pdf
- Cabral, V., y Zulaica, L. (2015). Análisis de la vulnerabilidad socioambiental en áreas del periurbano de Mar del Plata (Argentina) expuestas a agroquímicos. *Multiciencias*, 15(1317–2255). Retrieved from https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/62432/CONICET_Digital_Nro.00eb15b0-1591-45a7-b9d4-9ed240b8285d_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Càceres, K. (2001). *Metodologías para estimar degradación y vulnerabilidad a desastres naturales: aplicación a la microcuenca los Naranjos, lago de Yojoa, Honduras*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Caicedo Toro, M. D., Cabrera Estupiñán, E., Zambrano Navarrete, X. A., Rodríguez Bravo, M. E., Intriago Zambrano, P. E., Caicedo Toro, M. D., ... Intriago Zambrano, P. E. (2021). Estudio de características morfológicas de la cuenca “Cañitas” y su relación con el riesgo de inundaciones repentinas. *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*, 8(SPE2). <https://doi.org/10.46377/DILEMAS.V8I.2605>
- Camino, M., Bó, M., Cionchi, J., López de Armentia, A., Del Río, J., y De Marco, S. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 27. Retrieved from http://bibliotecadigital.uns.edu.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-42652018001100005
- Campo, A., Aldalur, N., y Fernández, S. (2012). Morfometría fluvial aplicada a una cuenca urbana en Ingeniero White, República Argentina. *Investigaciones Geográficas*, 77. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112012000100002
- Campo, A., Gil, V., Gentili, J., Volonté, A., y Duval, V. (2011). Inventario de eventos climáticos - meteorológicos extremos, suroeste bonaerense (1995-2010). *Párrafos Geográficos*. Retrieved from http://igeopat.org/parrafosgeograficos/images/RevistasPG/2011_V10_1/15-7.pdf
- Campo, A., Gil, V., Ybarra, G., y Volonté, A. (2016). Tipificación Morfológica De Cursos Principales. Cuenca Del Arroyo El Negro, Sistema De Ventania, Argentina. *Boletín Geográfico*, 38(1), 49–60.
- Campo, A., Silva, A., y Gil, V. (2016). Aplicación de cartografía temática para identificación y análisis de exposición al peligro de inundación por crecidas repentinas. Sierra de la Ventana, Buenos Aires Argentina. *Revista Geográfica Del Sur*, 73–86.
- Casado, A., y Campo, A. (2019). Extremos hidroclimáticos y recursos hídricos: estado de conocimiento en el suroeste bonaerense, Argentina. *Cuadernos Geográficos*, 58(1), 6–26. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v58i1.6751>

- Centro de Formación Profesional Nro. 401. (2005). *Manual del Curso Coordinador Turístico* (M. de Tornquist, Ed.). Tornquist.
- CEPAL. (2019). Análisis multicriterio. Retrieved from https://www.cepal.org/es/search?as_q=multicriterio
- Consejería de Agricultura, Ganadería, P. y D. S. de A. (2021). *Anomalías térmicas e índice de calentamiento global*. Retrieved from https://descargasrediam.cica.es/repos/RUR?path=%2F16_INDICADORES_ESTADISTICAS%2F01_IMA%2FIMA_2020%2FEstadisticas_indicadores%2F02_Cambio_climatico
- Coral, A., García, J., y Leal, A. (2015). Cálculo de balance hídrico usando modelamiento de datos espaciales: estudio aplicado a la cuenca del río Buena Vista, Ecuador. *Formação*, 1(22), 119–137. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/360311434_Calculo_de_balance_hidrico_usando_modelamiento_de_datos_espaciales_estudio_aplicado_a_la_cuenca_del_rio_Buena_Vista_Ecuador
- Crettaz, E., Gvozdenovich, J., y aluzzio M. (2016). *Calculo del factor r de la usle a traves del indice modificado de Fournier*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/321058206_CALCULO_DEL_FACTOR_R_DE_LA_USLE_A_TRAVES_DEL_INDICE_MODIFICADO_DE_FOURNIER
- Cruz Romero, B., Gaspari, F., Rodríguez Vagaría, A., Carrillo González, F., y Téllez-López, J. (2015). Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México. *Investigación y Ciencia: De La Universidad Autónoma de Aguascalientes*, (64), 26–34.
- Cuevas, Y., y Zalba, S. (2013). Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica. *Boletín de La Sociedad Argentina de Botánica*, 48(2), 315–322. Retrieved from https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/10127/CONICET_Digital_Nro.14008.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Daga, D. (2014). *Evaluación de la vulnerabilidad socio-ambiental del periurbano de Mar del Plata y lineamientos para el Ordenamiento Ambiental del Territorio*. UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES.
- Darghouth, S., Ward, C., Gambarelli, E., y Roux J. (2008). Watershed Management Approaches, Policies, and Operations: Lessons for Scaling Up. The World Bank (Washington, EEUU). *Water Sector Board Discussion Paper Series*, No. 11. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/142971468779070723/pdf/442220NWP0dp111Box0327398B01PUBLIC1.pdf>
- De Antueno, Lucía, Gaspari, F. J., y Guzmán Guaraca, A. (2020). Análisis del efecto del cambio en el uso del suelo sobre el escurrimiento en la cuenca alta del río Sauce Chico, Argentina. *Revista Estudios Ambientales - Environmental Studies Journal*, 8(1), 20–42. <https://doi.org/10.47069/ESTUDIOS-AMBIENTALES.V8I1.659>
- Del Águila, S., y Mejía, A. (2021). Caracterización morfométrica de dos cuencas altoandinas del Perú utilizando sistemas de información geográfica. *Instituto Mexicano de Tecnología Del Agua*, 12(2), 02–12. Retrieved from <http://www.revistatya.org.mx/index.php/tyca/article/view/2235/2313>
- Delgadillo, A., y Páez, G. (2008). Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo. In *Plan de desarrollo urbano del Municipio Antonio Pinto Salinas*,

bajo el enfoque de gestión del riesgo. Caracterización del riesgo de la cuenca del valle Mocoties. Mérida: FUNDAPRIS.

- Delgado, I. (2009). *Estudio de la dinámica del ciclo hidrológico en sitios forestados, en el sistema serrano bonaerense de Ventania, Argentina.* FCAYF - Universidad Nacional de la Plata.
- Deshmukh, A., y Singh, R. (2016). Physio-climatic controls on vulnerability of watersheds to climate and land use change across the United States. *Water Resources Management Research*, 52. Retrieved from <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/2016WR019189>
- Docampo, L., Rico, E., Sevillano, M., y Rallo, A. (1990). Análisis morfométrico de las redes fluviales del país Vasco. *KOBIE (Serie Ciencias Naturales) Bilbao*. No.XIX. https://www.bizkaia.eus/fitxategiak/04/ondarea/Kobie/PDF/3/Kobie_19_ANALISIS%20MORFOMETRICO%20DE%20LAS%20REDES%20FLUVIALES%20DEL%20P.pdf?hash=5b362a48cf987a117bab8aff5906948e
- Echegaray, S., De Paola, S., Danil, A., y Hang, M. (1968). *Estudio Socio-Agro económico del Partido de Tornquist* (INTA, Ed.). Tornquist.
- Espósito, M., Zalba, P., Ribet, D., Blanco, M. del C., y Amiotti, N. (2016). Efectos del riego con aguas de elevados contenidos de As sobre la disponibilidad de micronutrientes. *XXV Congreso Argentino de La Ciencia Del Suelo*, 337.
- FAO. (2016). *Land cover classification system*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i5232e.pdf>
- Farhan, Y., Anbar, A., Enaba, O., y Al-Shaikh, N. (2015). Quantitative Analysis of Geomorphometric Parameters of Wadi Kerak, Jordan, Using Remote Sensing and GIS. *Journal of Water Resource and Protection*, 07(06), 456–475. <https://doi.org/10.4236/JWARP.2015.76037>
- Feidas, H. (2010). Validation of satellite rainfall products over Greece. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(1–2), 193–216. <https://doi.org/10.1007/S00704-009-0135-8>
- Fernández, S., Sequeira, M., Espósito, M., y Paoloni, J. (2015). Estudio del comportamiento fluviométrico e hidrológico superficial de una cuenca del sur de la región Pampeana con datos limnigráficos diarios instantáneos - caracterización hídrica para los fines de riego caracterización hidr. *Cuadernos Del CURIHAM*, 21.
- Flotemersch, J. E., Leibowitz, S. G., Hill, R. A., Stoddard, J. L., Thoms, M. C., y Tharme, R. E. (2016). A Watershed Integrity Definition and Assessment Approach to Support Strategic Management of Watersheds. *River Research and Applications*, 32(7), 1654–1671. <https://doi.org/10.1002/RRA.2978>
- Fortunatti, N., Delpino, S., y Dimieri, L. (2001). Análisis preliminar de la deformación interna en cuarcitas de la Formación Napostá, Grupo Ventana, Sierras Australes de Buenos Aires. *Asociación Geológica Argentina*, 5, 89–95.
- Frangi, J., y Bottino, O. (1995). Comunidades Vegetales de Ventana, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de La Facultad de Agronomía de La Plata*, 71.
- FUNS. (2011). *Prefactibilidad de sistematización y aprovechamiento de la cuenca del río Sauce*

Chico.

- Gaitán, J., Navarro, M., Tenti, L., Pizarro, M., Carfagno, P., y Rigo, S. (2017). *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina*. Retrieved from https://inta.gob.ar/sites/default/files/libro_erosion_hidrica_rep_argentina.pdf
- Garay, D. D. (2021). Análisis comparativo entre datos anuales de precipitación estimada por satélite y observaciones pluviométricas de los Llanos de La Rioja. *INTA*. Retrieved from https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_infomre_precipitacion_estimada_por_satelite_y_observaciones_pluviometricas.pdf
- García, Y. (2017). Índice de vulnerabilidad del recurso hídrico con fines de riego en la cuenca hidrográfica del Río Naranjo, Cuba. *Revista Geográfica de América Central*, 1(58), 315. <https://doi.org/10.15359/rgac.58-1.13>
- Gaspari, F. (2007). *Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas utilizando sistemas de información geográfica (S.I.G.)* (Universidad Internacional de Andalucía sede Iberoamericana Santa María de la Rábida). Retrieved from https://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/59/0031_Gaspari.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Gaspari, F., y Bruno, J. (2003). Diagnóstico de degradación ambiental por erosión hídrica en la cuenca del arroyo Napostá Grande. *Ecología Austral*, 13(1), 109–120.
- Gaspari, F. J., Delgado, M. I., y Denegri, G. (2009). Estimación espacial, temporal y económica de la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial. *Terra Latinoamericana*. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792009000100006&script=sci_arttext
- Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Delgado, I., y Besteiro, S. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas* (Primera ed). Editorial de la Universidad Nacional de la Plata.
- Gavilán, S. (2019). *Modelado del Balance Hídrico a partir de datos satelitales y meteorológicos para el análisis de los flujos superficiales del ciclo hidrológico* (Universidad Nacional de La Plata). Retrieved from http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/74374/Documento_completo-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Gavilan, S., Pastore, J. I., Uranga, J., Ferral, A., Lighezzolo, A., y Aceñolaza, P. (2019). Metodología operativa para la obtención de datos históricos de precipitación a partir de la misión satelital Tropical Rainfall Measuring Mission. Validación de resultados con datos de pluviómetros. *Revista de La Facultad de Agronomía*, 118(1), 115–125. <https://doi.org/10.24215/16699513e011>
- Gil, Valeria, Gil, V., y Campo, A. (2014). Capacidad de carga turística en el sendero del Cerro Ventana: Parque Provincial Ernesto Tornquist, Argentina. *Estudios y Perspectivas En Turismo*, 23(2), 362–375.
- Gil, Verónica. (2009). *Hidrogeomorfología de la cuenca alta del río Sauce Grande aplicada al peligro de crecidas*. Universidad Nacional del Sur.
- Gil, Verónica, Gentili, J., Campo, A., Jelinski, G., y Crisafulli, M. (2016). Evaluación del peligro potencial de crecidas en cuencas serranas. Sistema de Ventania, provincia de

Buenos Aires. 3er. *Encuentro de Investigadores En Recursos Hídricos*.

González, W. (2011). *Manejo y protección de zonas de recarga hídrica y fuentes de agua para consumo humano en la subcuenca del río Zaratí, Panamá*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

Guzmán, A. (2020). *Localización Histórica/Potencial de Humedales en la Cuenca Serrana del Río Sauce Chico y su importancia en la Provisión de Servicios Ecosistémicos*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA.

Guzmán, A. C., De Antueno, L., y Gaspari, F. J. (2021). Análisis de la variabilidad geoespacial de la fragilidad morfométrica en la cuenca alta del Río Sauce Chico, Argentina. *Revista de La Facultad de Agronomía UNLP*, 120(1), 069. <https://doi.org/10.24215/16699513E069>

Guzmán, A., Díaz, R., Montealegre, F., y Cruz, B. (2020). Análisis comparativo de clasificadores de uso y cobertura de suelo en cuencas costeras de México con GEE. *15º Encuentro Del Centro Internacional de Ciencias de La Tierra, E-ICES 15*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/349573164_Analisis_comparativo_de_clasificadores_de_uso_y_cobertura_de_suelo_en_cuencas_costeras_de_Mexico_con_GEE

Guzmán Guaraca, A. C., Gaspari, F. J., De Antueno, L., y Montealegre Medina, F. A. (2009). Identificación de anomalías climáticas a través de precipitación satelital, en el sistema serrano bonaerense. Argentina. In Centro Boliviano de Estudios Multidisciplinarios (Ed.), *Congreso virtual: Desarrollo sustentable y desafíos ambientales “Pensando alternativas para el abordaje ambiental”* (p. 295). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/344025657_IDENTIFICACION_DE_ANOMALIAS_CLIMATICAS_A_TRAVES_DE_PRECIPITACION_SATELITAL_EN_EL_SISTEMA_SERRANO_BONAERENSE_ARGENTINA

Harrington, H. (1947). Explicación de las Hojas Geológicas 33 m y 34 m, Sierras de Curamalal y Ventana. *Servicio Nacional de Minería y Geología, Boletín*, 61, 1–43.

Hauri, B. (2006). *Determinación de la erosión hídrica superficial asociada al uso del suelo en la cuenca hidrográfica del arroyo Belisario, Tornquist, Buenos Aires*. FCAYF - Universidad Nacional de la Plata.

Hernández, J., Espinoza, C. F., Rodríguez, J. E., Chacón, R. J. G., Toloza, S. C. A., Arenas, T. M. K., ... Bermúdez, P. V. J. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 37(5), 586–601. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=559/55963207025/55963207025.pdf>

Hernando, D., y Romana, M. G. (2016). Estimate of the (R)USLE rainfall erosivity factor from monthly precipitation data in mainland Spain. *Journal of Iberian Geology*, 42(1), 113–124. https://doi.org/10.5209/rev_JIGE.2016.v42.n1.49120

Hofste, R., Reig, P., y Schleifer, L. (2019). 17 Countries, Home to One-Quarter of the World's Population, Face Extremely High Water Stress. Retrieved from World Resources Institute website: <https://www.wri.org/blog/2019/08/17-countries-home-one-quarter-world-population-face-extremely-high-water-stress>

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of*

- Humacata, L. (2015). Análisis socioespacial de los partidos de la cuenca media del río Luján (Argentina), utilizando sistemas de información geográfica. *Revista Geográfica de Valparaíso*, 52(0718–9877), 78. Retrieved from http://www.pucv.cl/uuaa/site/artic/20180316/asocfile/20180316172907/52_7.pdf
- Inácio Silva, J. R., de Assunção Montenegro, A. A., Lins de Andrade Farias, C. W., da Rosa Ferraz Jardim, A. M., Freire da Silva, T. G., y Lima Montenegro, S. M. G. (2022). Morphometric characterization and land use of the Pajeú river basin in the Brazilian semi-arid region. *Journal of South American Earth Sciences*, 118, 103939. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2022.103939>
- Iurtia, C., Cruzate, G., y Gapasri, F. (2007). Aplicación de la USLE en la provincia de Buenos Aires para establecer tasas de erosión hídrica. Guía de divulgación técnica. 1era. ed. ISBN 978-987-05-3664-2-
- Isaac, E., y Chikweru, E. (2018). Test for Significance of Pearson's Correlation Coefficient. *International Journal of Innovative Mathematics, Statistics and Energy Policies*, 6(1), 11–23.
- Jiménez, F., Velásquez, S., y Faustino, J. (2004). Análisis integral de la vulnerabilidad a amenazas naturales en cuencas hidrográficas de América Central. *VI Semana Científica 2004*, 50–53.
- Jothimani, M., Abebe, A., y Dawit, Z. (2020). Mapping of soil erosion-prone sub-watersheds through drainage morphometric analysis and weighted sum approach: a case study of the Kulfo River basin, Rift valley, Arba Minch, Southern Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(4), 2377–2389. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00820-y>
- Khurana, D., Rawat, G., Raina, R., Sharma, R., y P, J. (2019). GIS-Based Morphometric Analysis and Prioritization of Upper Ravi Catchment, Himachal Pradesh, India. *Advances in Water Resources Engineering and Management*.
- Kirpich, Z. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 6, 362, 1940.
- Lizzi, J. M., Garbulsky, M. F., Golluscio, R. A., y Deregibus, A. V. (2007). Mapeo indirecto de la vegetación de Sierra de la Ventana, provincia de Buenos Aires. *Ecología Austral*, 17(2), 217–230.
- López, A., y Martínez, M. (2015). Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y Ciencias de Agua*, (March).
- Loydi, A., y Distel, R. A. (2010). Diversidad florística bajo diferentes intensidades de pastoreo por grandes herbívoros en pastizales serranos del Sistema de Ventania, Buenos Aires. *Ecología Austral*, 20(3), 281–291.
- Mandale, V., y Bansod, R. (2019). Quantitative Morphometric Analysis of the Adula Watershed, in Ahmednagar Maharashtra Using the ESRI- ArcGIS Tool. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 36(5), 1–10. <https://doi.org/10.9734/cjast/2019/v36i530252>
- Marini, M. F. (2008). El avance de la frontera agrícola en el área adyacente al sistema Sierras de

- la Ventana (Buenos Aires, Argentina). *Investigaciones Geográficas*, 47(47), 111–121. <https://doi.org/10.14198/ingeo2008.47.06>
- Martínez, B. G., Gil, V., Carbone, M. E., y Simeón, C. P. (2016). Caracterización Del patrón hidromorfológico del arroyo de la ventana en su tramo medio alto (buenos aires Argentina). *Estudios Geográficos*, 77(281), 521–541. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201617>
- Martínez, J., Tavarez, C., Díaz, F., y Cámara, R. *Ordenación para la gestión integrada de cuencas hidrográficas .*, (2013).
- Mastache, V. I., y González, F. J. (2018). Metodología para la estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en cuencas utilizando SIG. *XXVIII Congreso latinoamericano de hidráulica Buenos Aires, Argentina, septiembre de 2018*. Retrieved from http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/edafologia/vectorial_ser
- Mendez Rivas, R. A. (2016). *Productos de precipitación satelital de alta resolución espacial y temporal en zonas de topografía compleja* (Pontifica Universidad Católica de Chile). Retrieved from https://repositorio.uc.cl/bitstream/handle/11534/21480/RUTH_ARACELLY_MÉNDEZ_RIVAS.pdf?sequence=1
- Michalijos, M., Geraldí, A., y Barragan, F. (2022). Análisis de la distribución de la precipitación y su incidencia en el peligro de incendio. Estudio de caso: Sierra de la Ventana, Argentina. *Revista Párrafos Geográficos*, vol. 21, nº1. Retrieved from <http://www.revistas.unp.edu.ar/index.php/parrafosgeograficos/article/view/808/722>
- Michalijos, M. L., y Zapperi, P. (2015). Análisis morfométrico aplicado a la caracterización de redes fluviales para la gestión de peligro de incendios forestales. *Revista Del Departamento de Geografía*, 15, 53–70.
- Ministerio de Agroindustria. (2018). *Informe especial de sequía, campaña 17/18, abril de 2018*. Retrieved from https://www.agroindustria.gob.ar/sitio/_pdf/Informe_especial_Sequia_Agroindustria_Mayo18.pdf
- Moretto, B., Gentili, J., Ortuño, M., y Campo, A. (2018). El agua: recurso y peligro. Análisis normativo-institucional para la vertiente norte del Sistema de Ventania (Argentina). *Geográfica Digital*, 16(31), 29. <https://doi.org/10.30972/geo.16313598>
- Muñoz, A. (2004). Landscape evaluation: An environmental management. *Revista Chilena de Historia Natural*, 77(1), 139–156. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2004000100011>
- Nash, J. E., y Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290. Retrieved from [https://sci-hub.se/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://sci-hub.se/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Navarro, E. L., y Cano, D. M. (2017). *Análisis morfométrico comparativo de los tramos superiores de las cuencas de los arroyos Sauce Chico, Napostá y Sauce Grande, Sierras Australes, uso de técnicas digitales*. Retrieved from IV Congreso Internacional Científico y Tecnológico-CONCYT 2017 website: <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/6712>
- Oliveira-Andreoli, E. Z., Moraes, M. C. P. de, Faustino, A. da S., Vasconcelos, A. F., Costa, C. W., Moschini, L. E., ... Lorandi, R. (2021). Multi-temporal analysis of land use land cover interference in environmental fragility in a Mesozoic basin, southeastern Brazil.

- Oliveras, J., y Saladié, O. (2012). *Desenvolupament Sostenible*, Rovira-España. Editorial de la Universidad de Rovira i Virgili e-book: <http://www.desenvolupamentsostenible.org/es/-los-riesgos-naturales/3-concepto-y-tipo-de-riesgo/3-1-concepto-de-riesgo/3-1-3-exposicion>
- Orúe, M. E., Laterra, P., y Cabria, F. (2007). Expansión de la frontera agrícola en Argentina y erosión hídrica: mapas de riesgo utilizando el Modelo Usle con apoyo de SIG. *TELEDETECCIÓN*, 2.
- Pal, S., Dominguez, F., Bollatti, P., Oncley, S. P., Yang, Y., Alvarez, J., y Garcia, C. M. (2021). Investigating the Effects of Land Use Change on Subsurface, Surface, and Atmospheric Branches of the Hydrologic Cycle in Central Argentina. *Water Resources Research*, 57(11). <https://doi.org/10.1029/2021WR029704>
- Panizza, M. C., Guiamet, P. S., Oliva, F., y Devoto, G. (2015). Aproximaciones al estudio de los procesos de deterioro sobre el arte rupestre, las estructuras líticas y las piedras paradas del sistema serrano de Ventania. *Revista de Antropología Del Museo de Entre Ríos*, 1.
- Paruelo, J. M. (2008). Functional characterization of ecosystems using remote sensing. *Ecosistemas*, 17(3), 4–22. Retrieved from <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=575>
- Paruelo, José M, Texeira, M., Staiano, L., Mastrángelo, M., Amdan, L., y Gallego, F. (2016). An integrative index of Ecosystem Services provision based on remotely sensed data. *Ecological Indicators*, 71, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.054>
- Pérez, C. A. (1995). *Productividad en pastizales serranos a lo largo del gradiente altitudinal*. Universidad Nacional de la Plata.
- Picardi, M., y Giacchero, A. (2015). Productividad de la tierra agrícola en el sudoeste bonaerense. *Estudios Económicos*, 32. Retrieved from http://bibliotecadigital.uns.edu.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2525-12952015002200004&lng=en&nrm=iso
- Polsky, C., Neff, R., y Yarnal, B. (2007). Building comparable global change vulnerability assessments: The vulnerability scoping diagram. *Global Environmental Change*, 17(3–4), 472–485. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2007.01.005>
- Radio Reflejos. (2021). Nuevas tarifas en el Parque Provincial Ernesto Tornquist – Noticias Radio Reflejos. Retrieved September 6, 2021, from <https://www.noticiasradioreflejos.com.ar/noticias/index.php/2019/12/30/nuevas-tarifas-en-el-parque-provincial-ernesto-tornquist/>
- Rajasekhar, M., Raju, G. S., y Raju, R. S. (2020). Morphometric analysis of the Jilledubanderu River Basin, Anantapur District, Andhra Pradesh, India, using geospatial technologies. *Groundwater for Sustainable Development*, 11. <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2020.100434>
- Ramos, V. A., Chemale, F., Naipauer, M., y Pazos, P. J. (2014). A provenance study of the Paleozoic Ventania System (Argentina): Transient complex sources from Western and Eastern Gondwana. *Gondwana Research*, 26(2), 719–740.

<https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.07.008>

- Ravelo, A., y Santa, J. (2000). Estimación de las precipitaciones utilizando información satelital y terrestre en la provincia de Córdoba (Argentina). *Agriscientia*, 17(0), 21–27.
- Redondas de Pascualini, P., y Fiordelmondo, M. G. (1991). *Relevamiento del partido de Tornquist*. Tornquist.
- Renda, E., Rozas, M., Moscardini, O., y Torchia, N. *Manual de elaboración de mapas de riesgo* ., (2017).
- Rodriguez, J., y Gaspari, F. (2019). Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica superficial ante incendios forestales en cuenca del Arroyo Ventana, Provincia De Buenos Aires. *15° Encuentro Internacional de Ciencias de La Tierra - E-ICES*, 1. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/346493771_ESTIMACION_DE_PÉRDIDA_DE_SUELO_POR_EROSION_HIDRICA_SUPERFICIAL_ANTE_INCENDIOS_FORESTALES_EN_CUENCA_DEL_ARROYO_VENTANA_PROVINCIA_DE_BUENOS_AIRES
- Rodriguez, M., Armendáriz, L. C., y Capítulo, A. (2017). A new genus and species of Ingolfiellidae (Crustacea, Ingolfiellida) from the hyporheic zone in the Sierra de la Ventana, and its biogeographic relevance. *Zootaxa*, 4290(1), 99–112. <https://doi.org/10.11646/ZOOTAXA.4290.1.5>
- Rosso, M., Pérez, A., Méndez, Y., Tavera, H., Cárdenas, J., Martínez, M., y Torres, S. (2022). Análisis de la fragilidad ecosistémica como estrategia para la estimación del riesgo asociado a la contaminación atmosférica en el Alto San Jorge, Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 31(2), 303-323. Epub November 17, 2022. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v31n2.95774>
- Ruiz-Álvarez, O., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M., Ontiveros Capurata, R., y López-López, R. (2012). Balance hídrico y clasificación climática del estado de Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, 28(1). Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0186-29792012000100001yscript=sci_arttext
- Sanchez, R., y Bohn, V. (2016). Incremento de la resolución de los índices de productividad en el Sudoeste Bonaerense. *XXV Congreso Argentino de La Ciencia Del Suelo*, 407.
- Sanhueza, C., Germain, P., Zapperi, G., Cuevas, Y., Damiani, M., Piovan, M. J., ... Loydi, A. (2014). *Plantas nativas de Bahía Blanca y alrededores: descubriendo su historia, belleza y magia*. (1era ed.). Bahía Blanca.
- Satgé, F., Ruelland, D., Bonnet, M. P., Molina, J., y Pillco, R. (2019). Consistency of satellite-based precipitation products in space and over time compared with gauge observations and snow- hydrological modelling in the Lake Titicaca region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(1), 595–619. <https://doi.org/10.5194/hess-23-595-2019>
- Schumm, S. (1956). Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badlands at Perth Amboy. *Bulletin Geological Society of America*, 67, 597–646.
- Schumm, S. (1963). A tentative classification of alluvial river channels. *GEOLOGICAL SURVEY CIRCULAR*, 477.
- Sfeir, A., Oliva, C., y Devoto, M. (2013). Distribución del registro monumental presente en el

- sistema serrano de Ventania y su relación con las poblaciones actuales. *Anuario de Arqueología, Rosario* (2013), 5, 427–444.
- Shivanna, S., y D, V. (2019). Geomorphological study of Yelahanka watershed, Bangalore rural district, Karnataka, India. *International Journal of Advanced Scientific Research and Managment*, 4(8). Retrieved from http://ijasrm.com/wp-content/uploads/2019/08/IJASRM_V4S8_1634_73_77.pdf
- Singh, N., Jha, M., Tignath, S., y Singh, B. N. (2020). Morphometric analysis of a badland affected portion of the Mandakini River sub-watershed, central India. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(11). <https://doi.org/10.1007/S12517-020-05405-8>
- Singh, W., Barman, S., y Tirkey, G. (2021). Morphometric analysis and watershed prioritization in relation to soil erosion in Dudhnai Watershed. *Applied Water Science*, 11. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01483-5>
- Smith, K. (1950). Standards for grading texture of erosional topography. *American Journal of Science*, 248, 655–668.
- Sociedad de Fomento San Andrés. (n.d.). Historia. Retrieved September 20, 2022, from <https://sociedaddefomentosanandres.com.ar/historia/>
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union*, 38(6), 913–920.
- Strahler, A. N. (1964). *Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks*. In: Chow, V. (McGraw Hill, Ed.). New York.
- Thanh Noi, P., y Kappas, M. (2017). Comparison of Random Forest, k-Nearest Neighbor, and Support Vector Machine Classifiers for Land Cover Classification Using Sentinel-2 Imagery. *Sensors* 2018, Vol. 18, Page 18, 18(1), 18. <https://doi.org/10.3390/S18010018>
- Tomezzoli, R. N., y Cristallini, E. O. (2004). Secciones estructurales de Las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires: Repetición de la secuencia estratigráfica a partir de fallas inversas? *Revista de La Asociacion Geologica Argentina*, 59(2), 330–340.
- Torrero, M. P. (2009). *Río Sauce Chico: estudio hidrográfico para un desarrollo sustentable*. Universidad Nacional del Sur.
- Urquiza, A., y Cadenas, H. (2015). Sistemas socio-ecológicos: Elementos teóricos y conceptuales para la discusión en torno a vulnerabilidad hídrica. *L'Ordinaire Des Amériques*. Retrieved from <https://journals.openedition.org/orda/1774>
- Van der Knijff, J. M., Jones, R. J., y Montanarella, L. (2000). *Soil Erosion Risk Assessment in Italy* (Space Applications Institute, Ed.). Retrieved from https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/serae/GRIMM/italia/eritaly.pdf
- Vélez, J., y Botero, A. (2010). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. *DYNA*, 78(2346–2183). Retrieved from <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25640/39138>
- Venkatesh, M., y Anshumali. (2019). A GIS-based assessment of recent changes in drainage and morphometry of Betwa River basin and sub-basins, Central India. *Applied Water Science*, 9. Retrieved from <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s13201-019-1033-6.pdf>

- Vera Rodríguez, J. M., y Albarracín Calderón, A. P. (2017). Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante amenazas de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales en cuencas hidrográficas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 109–136. <https://doi.org/10.18359/rcin.2309>
- Vu, T. M., y Mishra, A. (2016). Spatial and temporal variability of Standardized Precipitation Index over Indochina Peninsula. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42(1), 221–232. <https://doi.org/10.18172/cig.2928>
- Waikar, M., y Nilawar, P. (2014). Morphometric analysis of a drainage basin using geographical information system : a case study. *International Journal Multidisciplinary and Current Research*, (2012), 179–184.
- Wang, K., Kong, L., Yang, Z., Singh, P., Guo, F., Xu, Y., ... Hao, J. (2021). GPM annual and daily precipitation data for real-time short-term nowcasting: A pilot study for a way forward in data assimilation. *Water (Switzerland)*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/w13101422>
- Wilson, J., Chandrasekar, N., y Magesh, N. (2012). Morphometric Analysis of Major Sub-Morphometric Analysis of Major Sub- Watersheds in Aiyar y Karai Pottanar Basin , Central Tamil Nadu , India Using Remote Sensing y GIS Techniques. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, 2(May 2016), 8–15.
- Wischmeier, W. H. (1959). A Rainfall Erosion Index for a Universal Soil-Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal*, 23(3), 246–249. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1959.03615995002300030027X>