



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Análisis de la eficacia de diversas medidas de control sobre el vertido de agua, sedimentos y nitrógeno a la laguna costera del Mar Menor mediante el modelo hidrológico distribuido TETIS

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Sepulveda Perez, Juan Francisco

Tutor/a: Francés García, Félix Ramón

Cotutor/a: Lidón Cerezuela, Antonio Luis

Cotutor/a externo: PUERTES CASTELLANO, CRISTINA

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

Trabajo Fin de Máster

ANÁLISIS DE LA EFICACIA DE DIVERSAS MEDIDAS DE CONTROL SOBRE EL VERTIDO DE AGUA, SEDIMENTOS Y NITRÓGENO A LA LAGUNA COSTERA DEL MAR MENOR MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO TETIS

Intensificación:

ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

Juan Francisco Sepúlveda Pérez

Tutor:

Dr. Félix Francés García

Cotutores:

Dra. Cristina Puertes Castellano

Dr. Antonio Lidón Cerezuela

Septiembre, 2023



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: Análisis de la eficacia de diversas medidas de control sobre el vertido de agua, sedimentos y nitrógeno a la laguna costera del Mar Menor mediante el modelo hidrológico distribuido TETIS

Título del TFM en inglés: Analysis of the effectiveness of various control measures on the discharge of water, sediment and nitrogen into the Mar Menor coastal lagoon using the TETIS distributed hydrological model.

Título del TFM en Valenciano: Anàlisi de l'eficàcia de diverses mesures de control sobre l'abocament d'aigua, els sediments i el nitrogen a la llacuna costanera del Mar Menor mitjançant el model hidrològic distribuït TETIS.

Alumno: JUAN FRANCISCO SEPÚLVEDA PÉREZ

Tutor: FÉLIX FRANCÉS GARCÍA

Cotutor/es: DRA. CRISTINA PUERTES CASTELLANO

DR. ANTONIO LIDÓN CEREZUELA

Fecha de Lectura: SEPTIEMBRE, 2023

Resumen

En el presente TFM se ha tomado como caso de estudio la problemática existente en la laguna del Mar Menor (España), la cual ha experimentado un detrimento de la calidad de sus aguas debido a la contaminación difusa proveniente del aumento explosivo de la agricultura intensiva en su cuenca vertiente. La agricultura intensiva ha sido reconocida como una fuente importante de contaminación difusa y sus principales impactos ambientales asociados son la contaminación por nitrógeno y sedimentos de los cuerpos de agua. Es importante mencionar que la agricultura intensiva suele ir asociada a la pobre o nula aplicación de medidas de

conservación de suelos y uso desregulado de fertilizantes, que, en el caso concreto del Mar Menor, se ha manifestado en episodios de anoxia, muerte de flora y fauna y eutrofización.

El Mar Menor es una de las lagunas costeras de agua salada más grandes de Europa, lo que proporciona oportunidades estéticas, turísticas, pesqueras y recreativas para la ciudad, además de tener un alto valor ambiental. Este valor ha sido reconocido internacionalmente al incluirlo en la Lista de Humedales de Importancia Internacional (RAMSAR) y en la Lista de Zonas Especialmente Protegidas de Importancia para el Mediterráneo (ZEPIM), declarándolo Lugar de Importancia Comunitaria (LIC) y Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA). Sin embargo, estas normas de protección no han logrado evitar su deterioro.

Es por ello, que en el presente TFM se centra en la evaluación de la efectividad de diferentes medidas de control en los aportes de nutrientes a la laguna, de forma que permita seleccionar y priorizar aquellas más efectivas y que permitan mejorar el estado ecológico de la laguna. Para ello, se emplea el modelo hidrológico conceptual distribuido TETIS, que dispone de un sub-modelo de sedimentos, un sub-modelo de nitrógeno y un módulo de crecimiento de cultivos.

Para la implementación del modelo TETIS se considera:

- Modelo de Elevación Digital corregido (mapa de líneas azules, interferencias/modificaciones en cauces por elementos antrópicos) a escala 5x5 y 25x25, mapas derivados (CDA, DD, Pendientes)

- Mapa usos de suelo mediante combinación CORINE 2018 y consideraciones específicas.

Una vez implementado, ha sido posible calcular los balances medios anuales de agua, sedimentos y nitrógeno. Calculados los balances en situación actual, el modelo ya calibrado se ha empleado para simular el efecto de las medidas de control y obtener así los balances medios anuales para cada una de las actuaciones. Para que los balances sean comparables, se han empleado las mismas condiciones climáticas (mismo periodo de simulación) y las mismas condiciones iniciales.

Se han considerado las siguientes actuaciones:

- Creación de Áreas de Renaturalización (ARN), consistentes en recuperación de cubierta vegetal, con el objetivo de interceptar los aportes de sedimentos desde escorrentías.

- Canales de drenaje que recogen escorrentía de terrenos agrícolas hacia embalses de retención de sedimentos.

- Zona buffer de restricción y exclusión de cultivos.

-Agricultura de precisión

-Ley 3 2020

Resum

En el present TFM s'ha pres com a cas d'estudi la problemàtica existent en la llacuna de la Mar Menor (Espanya), la qual ha experimentat un detriment de la qualitat de les seues aigües a causa de la contaminació difusa provinent de l'augment explosiu de l'agricultura intensiva en la seua conca vessant. L'agricultura intensiva ha sigut reconeguda com una font important de contaminació difusa i els seus principals impactes ambientals associats són la contaminació per nitrogen i sediments dels cossos d'aigua. És important esmentar que l'agricultura intensiva sol anar associada a la pobra o nul·la aplicació de mesures de conservació de sòls i ús desregulat de fertilitzants, que en el cas concret de la Mar Menor, s'ha manifestat en episodis d'anòxia, mort de flora i fauna i eutrofització.

La Mar Menor és una de les llacunes costaneres d'aigua salada més grans d'Europa, la qual cosa proporciona oportunitats estètiques, turístiques, pesqueres i recreatives per a la ciutat, a més de tindre un alt valor ambiental. Aquest valor ha sigut reconegut internacionalment en incloure'l en la Llista d'Aiguamolls d'Importància Internacional (RAMSAR) i en la Llista de Zones Especialment Protegides d'Importància per al Mediterrani (ZEPIM), declarant-lo Lloc d'Importància Comunitària (LIC) i Zona d'Especial Protecció per als Ocells (ZEPA). No obstant això, aquestes normes de protecció no han aconseguit evitar la seua deterioració.

És per això, que en el present TFM se centra en l'avaluació de l'efectivitat de diferents mesures de control en les aportacions de nutrients a la llacuna, de manera que permeta seleccionar i prioritzar aquelles més efectives i que permeten millorar l'estat ecològic de la llacuna. Per a això, s'empra el model hidrològic conceptual distribuït TETIS, que disposa d'un sub-model de sediments, un sub-model de nitrogen i un mòdul de creixement de cultius.

Per a la implementació del model TETIS es considera:

-Model d'Elevació Digital corregit (mapa de línies blaves, interferències/modificacions en llits per elements antròpics) a escala 5x5 i 25x25, mapes derivats (CDA, DD, Pendants)

-Mapa usos de sòl mitjançant combinació CORINE 2018 i consideracions específiques.

Una vegada implementat, ha sigut possible calcular els balanços mitjans anuals d'aigua, sediments i nitrogen. Calculats els balanços en situació actual, el model ja calibrat s'ha emprat per a simular l'efecte de les mesures de control i obtindre així els balanços mitjans anuals per a cadascuna de les actuacions. Perquè els balanços siguen comparables, s'han empelado les

mateixes condicions climàtiques (mateix període de simulació) i les mateixes condicions inicials.

S'han considerat les següents actuacions:

-Creació d'Àrees de renaturalització (ARN), consistents en recuperació de coberta vegetal, amb l'objectiu d'interceptar les aportacions de sediments des d'escolaments.

-Canales de drenatge que recullen escolament de terrenys agrícoles cap a embassaments de retenció de sediments.

-Zona buffer de restricció i exclusió de cultius.

-Agricultura de precisió

-Llei 3 2020

Summary

In this Master's thesis, the problem in the Mar Menor lagoon (Spain) has been taken as a case study. The lagoon has experienced a decline in water quality due to diffuse pollution resulting from the explosive increase in intensive agriculture in its watershed. Intensive agriculture has been recognized as a significant source of diffuse pollution, with its main associated environmental impacts being nitrogen and sediment contamination of water bodies. It is important to note that intensive agriculture often lacks or poorly implements soil conservation measures and regulates fertilizer use, which, in the specific case of Mar Menor, has resulted in episodes of anoxia, flora and fauna die-offs, and eutrophication.

Mar Menor is one of Europe's largest coastal saltwater lagoons, providing aesthetic, touristic, fishing, and recreational opportunities for the city, in addition to its high environmental value. This value has been internationally recognized by its inclusion in the Ramsar List of Wetlands of International Importance and the List of Specially Protected Areas of Mediterranean Importance (ZEPIM), designating it as a Site of Community Importance (LIC) and Special Protection Area for Birds (ZEPA). However, these protective measures have not succeeded in preventing its deterioration.

Therefore, this Master's thesis focuses on evaluating the effectiveness of different control measures on nutrient inputs to the lagoon, aiming to select and prioritize the most effective ones to improve the ecological status of the lagoon. The study employs the distributed conceptual hydrological model TETIS, which includes sub-models for sediment and nitrogen and a crop growth module.

For the implementation of the TETIS model, the following factors are considered:

-Corrected Digital Elevation Model (blue lines map, interference/modifications in channels due to anthropic elements) at 5x5 and 25x25 scales, derived maps (CDA, DD, slopes).

-Land use map using a combination of CORINE 2018 and specific considerations.

Once implemented, it became possible to calculate the mean annual balances of water, sediment, and nitrogen. After calculating the balances in the current situation, the calibrated model was used to simulate the effect of the control measures, obtaining the mean annual balances for each intervention. To ensure comparability, the same climatic conditions (same simulation period) and initial conditions were used.

The following interventions have been considered:

-Creation of Renaturalization Areas (ARN), aimed at restoring vegetation cover to intercept sediment inputs from runoff.

-Drainage channels that collect runoff from agricultural land to sediment retention reservoirs.

-Buffer zones for crop restriction and exclusion.

-Precision agriculture.

-Ley 3/2020.

Palabras clave :. Mar Menor Nitrogeno Hidrologia Eutrofizacion

Paraules clau:. Mar Menor Nitrogen Hidrologia Eutrofització

Key words:. Mar Menor Nitrogen Hydrology Eutrophication

*A mi madre, por su entrega infinita, contención incansable y crianza amorosa.
A mi padre, por enseñarme el amor a las montañas, origen de los ríos que tanto amo.*

AGRADECIMEINTOS

Non nobis solum nati sumus

Agradecer es un acto voluntario, donde se reconoce la generosidad y bondad de otros, de sus acciones de ayuda y soporte, de pequeñas acciones que van más allá de lo obligado o mandatorio. Son los actos de apoyo mutuo, inherentes al ser humano, que nos hacen recordar que nuestra sociedad es un entramado interdependiente. Nuestras buenas acciones no son sólo para nosotros, sino para toda la sociedad, al igual que este TFM no es sólo un cumplimento académico, sino también una pequeña contribución y retribución al bienestar de todos.

Agradecer a Félix, por confiar en mí para el desarrollo de los dos proyectos que componen este TFM, por todas las conversaciones y nutritivos debates que iban más allá de la cotidianidad académica y plantear nuevos y enriquecedores puntos de vista. Gracias.

A Cristina, por su apoyo infatigable, que incluso durante los fines de semana, lograron sacar adelante este TFM. Por la paciencia en corregirme cada error y compartirme sus conocimientos. Gracias.

A mis queridos compañeros de oficina: Nicolás, David y Luisa. Porque siempre estaban dispuestos a echarme una mano, ayudarme con mis códigos o corregir mis simulaciones. Por regalarme su tiempo sentándose al lado mío hasta lograr solucionar mis dudas. Y también por la compañía en los almuerzos o los cafecitos, que hasta en los días aciagos, hacían más llevadera la carga. Y claro, por todas las risas que nos echamos en el tiempo que compartimos. Gracias.

A Jose y Luis, mis queridos compis de piso, que se transformaron en mi familia al llegar aquí. Por todo el apoyo emocional y cariño que permitieron llegar a donde estoy. Por integrarme a sus vidas y viceversa. Por todo eso, gracias.

A esta tierra, por la acogida de estos años, por su deliciosa comida y acogedora gente. Por permitirme reencontrarme con mis raíces y cerrar un círculo. Gracias.

Y sobretodo a Andrea, por ser mi compañera en todo ámbito. Por todo el cariño y amor entregado en cada momento, por la paciencia día a día, por todas las horas conversando de hidrología y ríos. Por todo lo que me has enseñado de la vida y academia. Gracias.

Contenido

Agradecimientos	8
Índice de Tablas.....	13
Índice de figuras.....	17
1. Introducción y Objetivos.....	24
2. Análisis en Zona Aportante Sur.....	30
2.1. Descripción de escenarios	31
2.1.1. Áreas de renaturalización (ARN).....	31
2.1.2. Sistema de drenajes y embalses COAG.....	34
2.1.3. Franja de actuación Buffer 1500.....	39
2.1.4. Agricultura de precisión.....	41
2.1.5. Aplicación de Ley 3/2020.....	43
2.2. Implementación del modelo TETIS en cuencas del sur	44
2.2.1. Información meteorológica.....	44
2.2.2. Ciclo hidrológico.....	45
2.2.3. Ciclo de sedimentos.....	56
2.2.4. Ciclo de nitrógeno	58
2.2.5. Modelo TETIS utilizado	64
2.3. Identificación de zonas afectadas	67
2.3.1. Cuencas afectadas por escenarios ARN	67
2.3.2. Cuencas afectadas por escenarios COAG.....	68
2.4. Parametrización de escenarios.....	69
2.4.1. Modificaciones escenarios ARN	69
2.4.2. Modificaciones escenarios COAG.....	71

2.4.3. Modificaciones escenario buffer	73
2.4.4. Modificaciones escenario agricultura de precisión	74
2.4.5. Modificaciones escenario Ley 3/2020	75
2.5. Resultados desagregados	77
2.5.1. Situación actual.....	77
2.5.2. ARN general.....	79
2.5.3. ARN prioritario	82
2.5.4. Escenarios COAG	84
2.5.5. Escenarios COAG. Con vaciado	87
2.5.6. Escenarios COAG. Sin vaciado.....	89
2.6. Resultados agregados.....	91
2.6.1. Situación actual.....	91
2.6.2. Franja Buffer	92
2.6.3. Agricultura de precisión.....	93
2.6.4. Aplicación Ley 3/2020.....	95
2.7. Comparación de resultados.....	97
2.7.1. Escalamiento	97
2.7.2. Balances	97
3. Análisis en la zona aportante total.....	101
3.1. Implementación modelo TETIS zona aportante total	102
3.1.1. Precipitación	102
3.1.2. Evapotranspiración.....	103
3.1.3. Temperatura	103
3.1.4. Modelo de elevación digital	104

3.1.5. Análisis de usos de suelo.....	108
3.1.6. Parámetros suelo y subsuelo.....	114
3.2. Estimación de parámetros sedimentos.....	118
3.2.1. Parámetros del suelo	118
3.3. Calibración del modelo.....	119
3.3.1. Precipitación	119
3.3.2. Caudales.....	120
3.3.3. Evapotranspiración potencial ETO	121
3.3.4. Períodos a considerar.....	122
3.3.5. Período calentamiento.....	124
3.3.6. Período calibración	125
3.3.7. Período validación	126
3.3.8. Comentarios	127
3.4. Simulación zona aportante total	128
4. Conclusiones	129
ANEXO 1. Referencias y bibliografía	133
ANEXO 2. Descripción del modelo tetis.....	139
Conceptualización resumida del modelo	139
El submodelo del ciclo de sedimentos	141
El submodelo del ciclo de nitrógeno	143
ANEXO 3.....	146
Sin Vaciado.....	146
Embalses 1 y 2	146
Embalse 3	147

ANÁLISIS DE LA EFICACIA DE DIVERSAS MEDIDAS DE CONTROL SOBRE EL VERTIDO DE AGUA, SEDIMENTOS Y NITRÓGENO A LA LAGUNA COSTERA DEL MAR MENOR MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO TETIS

Embalse 4	148
Embalse 7	149
Embalse Ejecutado.....	150
Embalse 8	151
Laguna Naturalizada.....	152
Con Vaciado	153
Embalses 1 y 2.....	153
Embalse 3	154
Embalse 4	155
Embalse 7	156
Embalse Ejecutado.....	157
Embalse 8	158
Laguna Naturalizada.....	159

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Características de los embalses COAG. Fuente: COAG.	35
Tabla 2-2 Características canales intercepción de los embalses COAG. Fuente: COAG.	36
Tabla 2-3 Tiempos de vaciado por balance entre lluvia y evaporación en los embalses COAG.	37
Tabla 2-4 Estaciones utilizadas para la calibración de la ecuación de Fuller.	38
Tabla 2-5 Rotación anual cultivo hortícolas.	39
Tabla 2-6 Resumen escenario Buffer.	40
Tabla 2-7 Grupos hortícolas.	40
Tabla 2-8 Resumen Escenario Agricultura Precisión.	42
Tabla 2-9 Resumen escenario Ley 3/2020.	43
Tabla 2-10. Usos del suelo, superficie y porcentaje de ocupación en la zona sur del Mar Menor.	48
Tabla 2-11. Factor de vegetación mensual según usos del suelo.	49
Tabla 2-12 Valores de intercepción máxima, profundidad de raíces y abstracciones iniciales.	51
Tabla 2-13. Permeabilidad cualitativa y valor adoptado.	54
Tabla 2-14. Parámetros hidro-geomorfológicos.	55
Tabla 2-15. Demandas y superficie de las unidades de demanda agraria de la zona sur del Mar Menor.	56
Tabla 2-16. Valores mensuales del factor de cubierta según usos del suelo.	60
Tabla 2-17. Parámetros de los usos del suelo en modo cultivos.	61
Tabla 2-18. Dosis de abonado mensuales en forma de amonio de los usos del suelo 6 y 9 [kgN/ha/mes].	62
Tabla 2-19. Dosis de abonado mensuales en forma de nitrato de los usos del suelo 6 y 9 [kgN/ha/mes].	62

Tabla 2-20. Factores correctores hidrológicos.....	64
Tabla 2-21. Factores correctores transporte sedimentos.....	64
Tabla 2-22. Parámetros del ciclo del N en cauce.	64
Tabla 2-23. Coeficientes de distribución de NH ₄ ⁺	65
Tabla 2-24. Parámetros del ciclo del N en el suelo-vegetación.....	66
Tabla 2-25. Principales cuencas afectadas por las ARN.....	67
Tabla 2-26. Cuencas afectadas por los embalses COAG.....	68
Tabla 2-27. Factor de vegetación mensual en las ARN.....	70
Tabla 2-28. Obtención del valor del Factor P en las ARN.....	70
Tabla 2-29. Factor de cubierta mensual ARN.....	71
Tabla 2-30. Parámetros de N para ARN.....	71
Tabla 2-31. Ubicación de los EV y embalses representados.	72
Tabla 2-32. Factor de vegetación mensual barreras vegetales - Buffer.....	73
Tabla 2-33. Factor de cubierta mensual barreras vegetales - Buffer.....	73
Tabla 2-34 Factor P - Buffer	74
Tabla 2-35 Valores adoptados Agricultura Precisión.....	74
Tabla 2-36 Factor P – Buffer.	75
Tabla 2-37. Resultados medios anuales de la zona de estudio en situación actual. Ciclo de sedimentos.	78
Tabla 2-38. Resultados medios anuales por cuencas de la situación actual. Ciclo del agua y sedimentos.	78
Tabla 2-39. Resultados medios anuales por cuencas de la situación actual. Ciclo del nitrógeno.....	79
Tabla 2-40. Resultados medios anuales de la zona de estudio para el escenario ARN General. Ciclo de sedimentos.	80

Tabla 2-41. Resultados medios anuales por cuencas en escenario ARN General. Ciclo del agua y sedimentos.	81
Tabla 2-42. Resultados medios anuales por cuencas en escenario ARN General. Ciclo del nitrógeno.	81
Tabla 2-43. Resultados medios anuales de la zona de estudio para el escenario ARN Prioritaria. Ciclo de sedimentos.	82
Tabla 2-44. Resultados medios anuales por cuencas en escenario ARN Prioritaria. Ciclo del agua y sedimentos.	83
Tabla 2-45. Resultados medios anuales por cuencas para el escenario ARN Prioritaria. Ciclo del nitrógeno.	83
Tabla 2-46. Efectividades e embalse y total de cuenca para los embalses propuestos por COAG con vaciado.	84
Tabla 2-47. Sensibilidad de la efectividad de embalse a los días de vaciado.	85
Tabla 2-48. COAG sin vaciado. Sensibilidad de la efectividad de embalse a la capacidad del canal de derivación.	85
Tabla 2-49. COAG con vaciado. Sensibilidad de la efectividad de embalse a la capacidad del canal de derivación.	86
Tabla 2-50. Resultados medios anuales de la zona de estudio para el escenario COAG con vaciado. Ciclo de sedimentos.	87
Tabla 2-51. COAG con vaciado. Principales flujos medios anuales por cuenca.	88
Tabla 2-52. Efectividades de embalse y total de cuenca para los embalses propuestos por COAG sin vaciado.	89
Tabla 2-53. Resultados medios anuales de la zona de estudio para el escenario COAG sin vaciado. Ciclo de sedimentos.	90
Tabla 2-54. COAG sin vaciado. Principales flujos medios anuales por cuenca.	90
Tabla 2-55. Resultados medios anuales de la zona de estudio en situación actual. Ciclo de sedimentos.	91

Tabla 2-56. Resultados medios anuales de la zona de estudio en escenario Buffer. Ciclo de sedimentos.....	93
Tabla 2-57. Resultados medios anuales de la zona de estudio en escenario Agricultura de Precisión. Ciclo de sedimentos.....	94
Tabla 2-58. Resultados medios anuales de la zona de estudio en escenario Agricultura de Precisión. Ciclo de sedimentos.....	96
Tabla 2-59 Balances agregados agua [mm/año].....	97
Tabla 2-60 Balances sedimentos.....	98
Tabla 2-61 Balances nitrógeno [kgN/ha·año ⁻¹].....	99
Tabla 3-1 Cuadrantes utilizados para confección de MED.	105
Tabla 3-2 Usos de suelo totales.....	109
Tabla 3-3 Factor de vegetación mensual según usos de suelo.....	111
Tabla 3-4 Valores de interceptación máxima, profundidad de raíces y abstracciones iniciales.	112
Tabla 3-5 Dotaciones de riego en [mm/mes].....	113
Tabla 3-6. Factores correctores hidrológicos.	119
Tabla 3-7 Estaciones pluviométricas sistema SAIH.	120
Tabla 3-8 Estaciones ET0 red SIAR.....	121
Tabla 3-9 Fechas períodos proceso calibración.....	122
Tabla 3-10 Resultados calentamiento.....	124
Tabla 3-11 Resultados calibración.	125
Tabla 3-12 Resultados validación.....	126
Tabla 3-13 Balances agua [mm/año].	128
Tabla 3-14 Balances sedimentos año.....	128

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Vulnerabilidad Mar Menor. Izquierda: 13-09-2019. Derecha 11-03-2020. Fuente: Sentinel-2 L2A.....	24
Figura 1-2 Ubicación Mar Menor.....	25
Figura 1-3 Zona Aportante Total (Amarillo) y Sur (Azul).....	27
Figura 1-4 Metodología Zona Aportante Sur.....	28
Figura 1-5 Metodología Zona Aportante Total.....	29
Figura 2-1 Delimitación de las cuencas en la zona sur del Mar Menor.	30
Figura 2-2 Cuencas endorreicas en la zona sur del Mar Menor.	30
Figura 2-3 Vista perfil ribazos. Línea roja representa perfil actual. Fuente: MITERD	32
Figura 2-4 Fases de cambio de uso de suelo ARN	32
Figura 2-5 Detalle de cambios propuestos por ARN. Fuente: MITERD.....	32
Figura 2-6 Sub-Escenarios ARN: Prioritario y General.....	33
Figura 2-7 Embalses escenario COAG y canales de derivación. Fuente: COAG.....	34
Figura 2-8 Áreas de afección por embalses de la COAG.....	35
Figura 2-9 Características geométricas tipo de los canales. Fuente: COAG.....	36
Figura 2-10 Zonas Buffer.....	39
Figura 2-11. Precipitación, temperatura y evapotranspiración media mensual.....	45
Figura 2-12 Modelo de elevación digital y red de drenaje en las cuencas del sur del Mar Menor.....	46
Figura 2-13. Mapa de celdas drenantes acumuladas (a) y mapa de pendientes (b).....	47
Figura 2-14. Mapa de usos del suelo.....	48
Figura 2-15. Distribución de cultivos en la zona sur del Mar Menor.	49
Figura 2-16. Valores diarios del factor de vegetación para los usos del suelo 7 y 8.....	50

Figura 2-17. Mapa de capacidad de infiltración (a) y almacenamiento estático máximo (b).	53
Figura 2-18. Mapa de capacidad de percolación.....	54
Figura 2-19. Superficie de afloramiento del acuífero Cuaternario.....	55
Figura 2-20. Zonas de riego establecidas para el modelo.....	56
Figura 2-21. Mapas de contenido en arena (a), limo (b) y arcilla (c) del suelo.....	57
Figura 2-22. Mapas del factor K (a) y factor C (b) de la USLE.	58
Figura 2-23. Mapa de contenido en nitrógeno orgánico del suelo.....	59
Figura 2-24. Mapa de profundidad efectiva (a), contenido de agua en el punto de marchitez (b), densidad aparente (c) y coeficiente de partición (d).	60
Figura 2-25. Valores diarios de las dosis de fertilizantes para el uso del suelo 8.....	63
Figura 2-26. Esquema de la afección en cuencas de las ARN.....	67
Figura 2-27. Cuencas afectadas por los escenarios COAG.....	68
Figura 2-28 Sub-Escenarios ARN: Prioritario y General.	69
Figura 2-29. Esquema de embalses COAG.....	71
Figura 2-30. Balance hidrológico de la zona de estudio en situación actual (mm/año).....	77
Figura 2-31. Balance nitrógeno medio anual de la zona de estudio en situación actual (kgN/ha/año).....	78
Figura 2-32. Balance hidrológico de la zona de estudio para el escenario ARN General (mm/año).....	80
Figura 2-33. Balance nitrógeno medio anual de la zona de estudio para el escenario ARN General [kgN/ha/año].	81
Figura 2-34. Balance hidrológico de la zona de estudio para el escenario ARN Prioritaria (mm/año).....	82
Figura 2-35 Balance nitrógeno medio anual de la zona de estudio para el escenario ARN Prioritaria (kgN/ha/año).	83

Figura 2-36. Balance hidrológico de la zona de estudio para el escenario COAG con vaciado (mm/año).....	87
Figura 2-37. Balance nitrógeno medio anual para el escenario COAG con vaciado (kgN/ha/año).....	88
Figura 2-38. Balance hidrológico de la zona de estudio para el escenario COAG sin vaciado [mm/año].....	89
Figura 2-39. Balance nitrógeno medio anual para el escenario COAG sin vaciado [kgN/ha/año].....	90
Figura 2-40. Balance hidrológico de la zona de estudio en situación actual [mm/año].	91
Figura 2-41. Balance nitrógeno medio anual de la zona de estudio en situación actual [kgN/ha/año].....	92
Figura 2-42. Balance hidrológico de la zona de estudio en escenario Buffer [mm/año].....	92
Figura 2-43. Balance nitrógeno medio anual de la zona de estudio en escenario Buffer [kgN/ha/año].....	93
Figura 2-44. Balance hidrológico de la zona de estudio en escenario Agricultura de Precisión [mm/año].....	94
Figura 2-45. Balance nitrógeno medio anual de la zona de estudio en escenario Agricultura de Precisión [kgN/ha/año].....	95
Figura 2-46. Balance hidrológico de la zona de estudio en escenario Agricultura de Precisión [mm/año].....	95
Figura 2-47. Balance nitrógeno medio anual de la zona de estudio en escenario Agricultura de Precisión [kgN/ha/año].....	96
Figura 2-48 Variaciones porcentuales de flujos de agua con respecto a situación actual....	98
Figura 2-49 Variaciones porcentuales de flujos de sedimentos con respecto a situación actual.....	99
Figura 2-50 Variaciones porcentuales de flujos de Nitrógeno con respecto a situación actual.	100
Figura 3-1 Zonas aportantes superficial y subterránea al Mar Menor.....	101

Figura 3-2 Zona Aportante Total al Mar Menor.	102
Figura 3-3 Mallado precipitación Harmonie-Aemet para modelo global.....	102
Figura 3-4 Mallado de evapotranspiración Harmonie-Aemet para modelo global.....	103
Figura 3-5 Mallado de evapotranspiración Harmonie-Aemet para modelo global.....	104
Figura 3-6 Modelo de elevación digital CNIG 25m.....	104
Figura 3-7 Elementos antrópicos incorporados para acondicionamiento de MED.	105
Figura 3-8 (a): Direcciones de drenaje. (b): Celdas drenantes acumuladas. (c): Mapa Pendientes. (d): Mapa velocidades.....	106
Figura 3-9 Cuencas identificadas.	107
Figura 3-10 Grupos de modelación.....	107
Figura 3-11 Usos de suelo generales.	108
Figura 3-12 Invernaderos en la zona de estudio.	109
Figura 3-13 Factores de cultivo Kc variables en el año.....	112
Figura 3-14 Profundidad de la roca en zona de estudio.....	115
Figura 3-15 Almacenamiento estático Hu.....	115
Figura 3-16 Mapa conductividad hidráulica Ks [mm/h].....	116
Figura 3-17 Mapa conductividad hidráulica horizontal Kss [mm/h].	116
Figura 3-18 Capacidad de percolación Kp [mm/h].	117
Figura 3-19 (a): Arena. (b): Limo. (c): Arcilla.....	118
Figura 3-20 Precipitaciones diarias en estaciones SAIH.	119
Figura 3-21 Caudales medios diarios estación El Estrecho.....	120
Figura 3-22 Evapotranspiración diaria en estaciones SIAR.....	121
Figura 3-23 Estaciones para calibración del modelo.....	122
Figura 3-24 En recuadro naranja periodo calentamiento, en recuadro rojo calibración y en recuadro verde periodo de validación.	123

Figura 3-25 Caudales observados y simulados calentamiento.....	124
Figura 3-26 Caudales observados y simulados de período de calibración.....	125
Figura 3-27 Caudales observados y simulados de período de validación.....	126
Figura 3-28 Aportes precipitación y riego vs caudales.....	127
Figura 0-1 Esquema conceptual del ciclo hidrológico para una celda en el modelo TETIS.	140
Figura 0-2 Esquema de conexiones horizontales del ciclo hidrológico en el modelo TETIS.	141
Figura 0-3 Esquema de los procesos de sedimentos en ladera del modelo TETIS.....	142
Figura 0-4 Esquema conceptual de los procesos de nitrógeno en ladera del modelo TETIS.	144
Figura 0-1 Embalse 1 y 2 – Entradas y desbordes canal.	146
Figura 0-2 Embalse 1 y 2 – Volumen en Embalse.....	146
Figura 0-3 Embalses 1 y 2 - Entradas y desbordes embalse.....	146
Figura 0-4 Embalse 3– Entradas y desbordes canal.....	147
Figura 0-5 Embalse 3 - Volumen en Embalse.....	147
Figura 0-6 Embalse 3 - Entradas y desbordes embalse.	147
Figura 0-7 Embalse 4 – Entradas y desbordes canal.....	148
Figura 0-8 Embalse 4- Volumen en Embalse.....	148
Figura 0-9 Embalse 4 Entradas y desbordes embalse.....	148
Figura 0-10 Embalse 7– Entradas y desbordes canal.	149
Figura 0-11 Embalse 7- Volumen en Embalse.....	149
Figura 0-12 Embalse 7 - Entradas y desbordes embalse.	149
Figura 0-13 Embalse Ejecutado – Entradas y desbordes canal.....	150
Figura 0-14 Embalse Ejecutado- Volumen en Embalse.	150

Figura 0-15 Embalse Ejecutado Entradas y desbordes embalse.	150
Figura 0-16 Embalse 8- Entradas y desbordes canal.	151
Figura 0-17 Embalse 8- Volumen en Embalse.	151
Figura 0-18 Embalse 8 Entradas y desbordes embalse.	151
Figura 0-19 Laguna Naturalizada- Entradas y desbordes canal.	152
Figura 0-20 Laguna Naturalizada- Volumen en Embalse.	152
Figura 0-21 Laguna Naturalizada Entradas y desbordes Laguna Naturalizada.	152
Figura 0-22 Embalse 1 y 2- Entradas y desbordes canal.	153
Figura 0-23 Embalse 1 y 2- Volumen en Embalse.	153
Figura 0-24 Embalse 1 y 2 Entradas y desbordes embalse.	153
Figura 0-25 Embalse 3- Entradas y desbordes canal.	154
Figura 0-26 Embalse 3- Volumen en Embalse.	154
Figura 0-27 Embalse 3 Entradas y desbordes embalse.	154
Figura 0-28 Embalse 4- Entradas y desbordes canal.	155
Figura 0-29 Embalse 4- Volumen en Embalse.	155
Figura 0-30 Embalse 4 Entradas y desbordes embalse.	155
Figura 0-31 Embalse 7- Entradas y desbordes canal.	156
Figura 0-32 Embalse 7- Volumen en Embalse.	156
Figura 0-33 Embalse 7 Entradas y desbordes embalse.	156
Figura 0-34 Embalse Ejecutado- Entradas y desbordes canal.	157
Figura 0-35 Embalse Ejecutado- Volumen en Embalse.	157
Figura 0-36 Embalse Ejecutado Entradas y desbordes embalse.	157
Figura 0-37 Embalse 8- Entradas y desbordes canal.	158
Figura 0-38 Embalse 8- Volumen en Embalse.	158

Figura 0-39 Embalse 8 Entradas y desbordes embalse.....	158
Figura 0-40 Laguna Naturalizada- Entradas y desbordes canal.....	159
Figura 0-41 Laguna Naturalizada- Volumen en Embalse.....	159
Figura 0-42 Laguna Naturalizada Entradas y desbordes embalse.....	159

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El presente TFM se ha tomado como caso de estudio la problemática existente en la laguna costera del Mar Menor (España), la cual ha experimentado un detrimento de la calidad de sus aguas debido a la contaminación difusa proveniente del aumento explosivo de la agricultura intensiva y minas a cielo abierto abandonadas.

La agricultura intensiva es reconocida como una fuente importante de contaminación difusa y sus principales impactos ambientales asociados son la contaminación por nitrógeno y sedimentos de los cuerpos de agua. La agricultura intensiva suele ir asociada a la pobre o nula aplicación de medidas de conservación de suelos y uso desregulado de fertilizantes, que, en el caso concreto del Mar Menor, se ha manifestado en episodios de anoxia, muerte de flora y fauna y eutrofización. Una vista satelital de la vulnerabilidad del suelo a episodios de tormenta se observa en la Figura 1-1, a la izquierda justo después del episodio del 12 de septiembre de 2019, donde se registró hasta 129 mm/día. A la derecha, 6 meses después. El comparativo evidencia la pérdida de la cobertura de suelo, derivado de procesos erosivos con el correspondiente arrastre de sedimentos y otros contaminantes

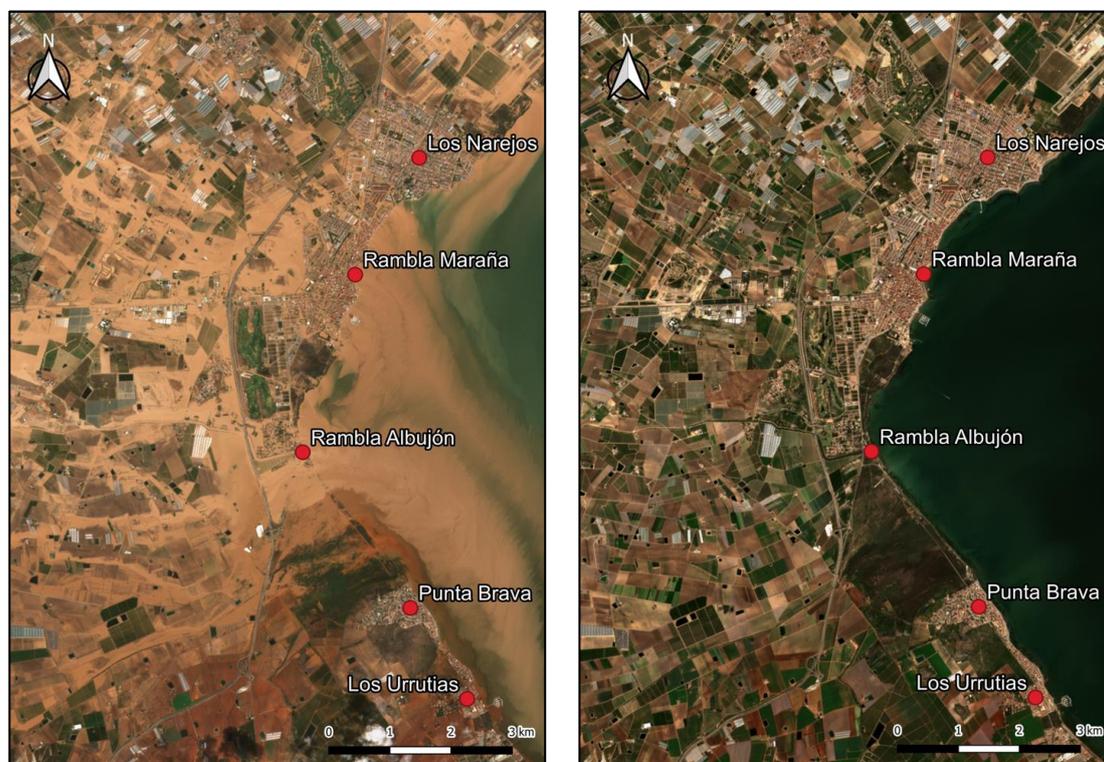


Figura 1-1 Vulnerabilidad Mar Menor. Izquierda: 13-09-2019. Derecha 11-03-2020. Fuente: Sentinel-2 L2A.

El Mar Menor es la laguna salada más grande de Europa (Figura 1-2), con 170 km² de superficie, una longitud de costa de 73 km y una profundidad máxima de 7 m, lo que proporciona oportunidades estéticas, turísticas, pesqueras y recreativas para la ciudad, además de tener un alto valor ambiental.

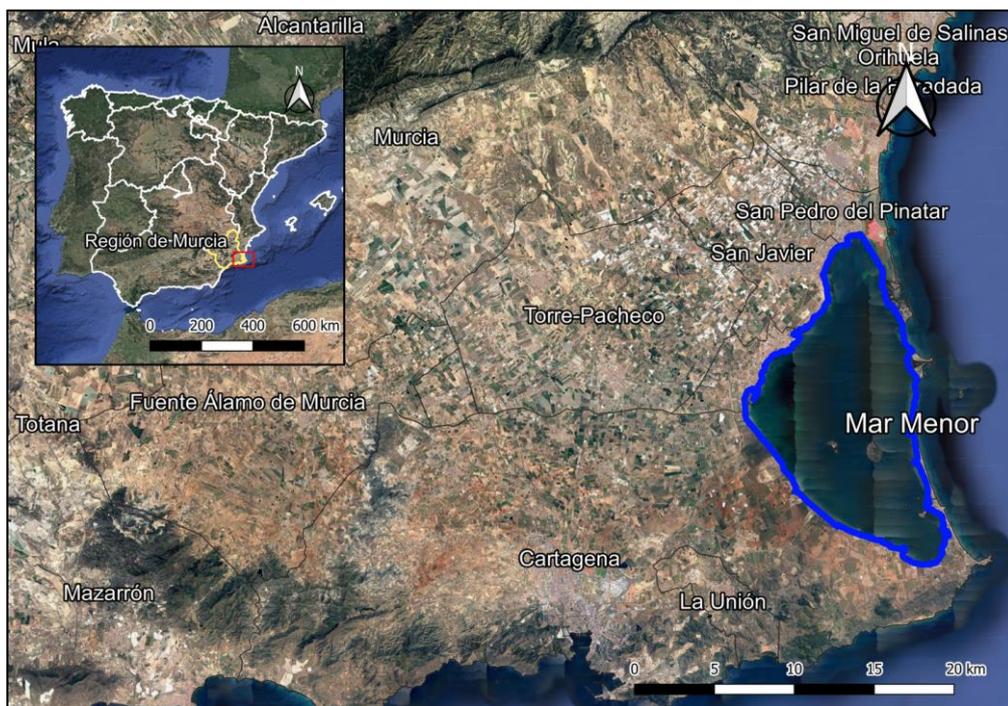


Figura 1-2 Ubicación Mar Menor.

Este valor ha sido reconocido internacionalmente al incluirlo en la Lista de Humedales de Importancia Internacional (RAMSAR) y en la Lista de Zonas Especialmente Protegidas de Importancia para el Mediterráneo (ZEPIM), declarándolo Lugar de Importancia Comunitaria (LIC) y Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA).

En octubre de 2022, debido a la grave crisis socio-ambiental y ecológica en torno al Mar Menor, se promulgó la Ley 19/2022. Esta ley otorga personalidad jurídica al ecosistema de la laguna del Mar Menor y su cuenca, convirtiéndolo en el primer ecosistema en Europa con tal reconocimiento.

La ley reconoce al Mar Menor como un sujeto de derechos, abarcando no solo la zona donde se encuentra la laguna costera, sino también los acuíferos conectados que pueden afectar su estabilidad ecológica. Los cuatro derechos reconocidos son: el derecho a existir y evolucionar naturalmente, a la protección, a la conservación y a la restauración.

Además, esta ley impone obligaciones a la Administración Pública, como llevar a cabo estudios periódicos sobre el estado del ecosistema del Mar Menor y elaborar un mapa de los riesgos presentes y potenciales. Asimismo, se exige la restricción inmediata de actividades que puedan llevar a la extinción de especies, la destrucción de ecosistemas o la alteración permanente de los ciclos naturales. También se prohíbe o limita la introducción de organismos y material orgánico e inorgánico que pueda afectar de manera irreversible el patrimonio biológico del Mar Menor.

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Máster (TFM) es simular el comportamiento de la laguna del Mar Menor a través de un modelo eco-hidrológico. De esta manera, poder evaluar el impacto de diversas prácticas de gestión en los aportes de nitrógeno y sedimentos. Además, busca funcionar como una herramienta de pronóstico a corto (días) y mediano plazo (subestacional). Este enfoque posibilitaría la identificación y desarrollo de una estrategia de gestión adecuada a escala de cuenca, la cual podría ser aplicada en otras cuencas que presenten características y problemas similares. Este aspecto resulta especialmente relevante, debido a que el proyecto se convierte en una herramienta de apoyo a la decisión para las partes interesadas y los responsables políticos involucrados.

De esta manera, el presente TFM se divide en dos partes: La primera, *Zona Aportante Sur*, se centra en la evaluación de la efectividad de diferentes medidas de control en los aportes de escorrentía, sedimentos y nutrientes a la laguna a escala local, de forma que permita seleccionar y priorizar aquellas más efectivas y que permitan mejorar el estado ecológico de la laguna. Esta parte utiliza como base un modelo TETIS calibrado y validado en aquella zona específica con anterioridad (Puertes et al. 2021).

La segunda, *Zona Aportante Total*, considera la implementación y calibración de un modelo TETIS que sea representativo de toda la cuenca aportante al Mar Menor, que sirva de plataforma para la evaluación de medidas futuras a escala global del Mar Menor así como pronósticos a corto (días) y mediano plazo (subestacional) que será insumo para el Observatorio del Mar Menor.

Para ello, se emplea el modelo hidrológico conceptual distribuido TETIS, que dispone de un sub-modelo de sedimentos, un sub-modelo de nitrógeno y un módulo de crecimiento de cultivos. Las áreas de estudio de ambas partes se indican en la Figura 1-3.

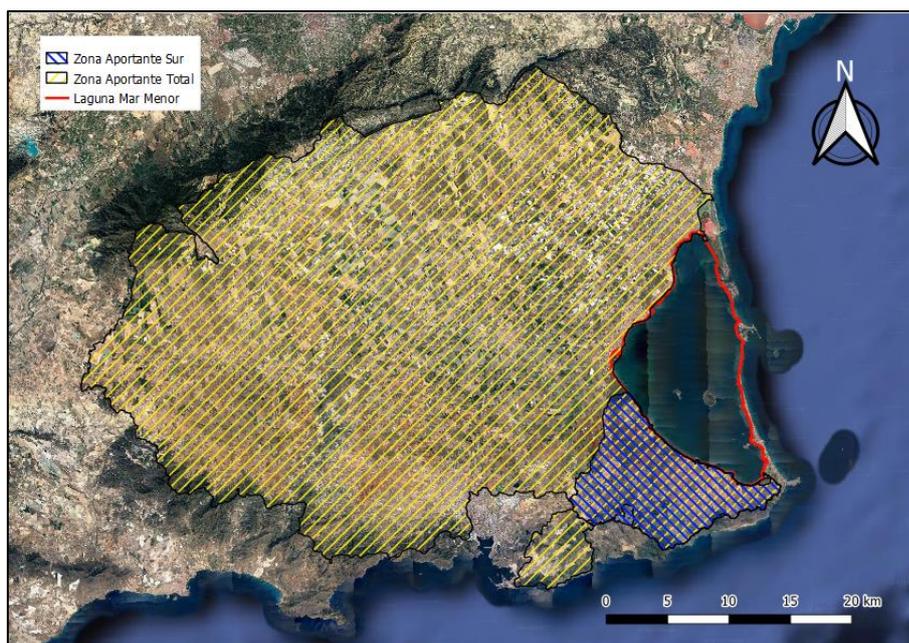


Figura 1-3 Zona Aportante Total (Amarillo) y Sur (Azul).

A continuación, se presenta la estructura del documento para la *Zona Aportante Sur* y *Zona Aportante Total* agrupados por los capítulos que los componen.

Zona Aportante Sur:

- Capítulo 2.1: Descripción de los 5 escenarios y los alcances de cada uno.
- Capítulo 2.2: Verificación de toda la información existente de la zona, como meteorología, ciclo hidrológico, ciclo de sedimentos y ciclo de nitrógeno utilizado en las modelaciones, así como los parámetros de la calibración del modelo.
- Capítulo 2.3. Identificación de las zonas afectadas por 2 escenarios que no cubren en toda la extensión la zona sur.
- Capítulo 2.4. Parametrización de los 5 escenarios y su representación en los ciclos hidrológicos, de sedimentos y nitrógeno.
- Capítulo 2.5: Resultados desagregados en los 2 escenarios que cubren parcialmente la zona sur (ARN y COAG).
- Capítulo 2.6: Resultados agregados de los escenarios que afectan a toda la superficie de la zona sur.
- Capítulo 2.7: Comparación de resultados mediante balances de agua, sedimentos y nitrógeno.

La metodología de trabajo para este apartado se indica en la Figura 1-4.

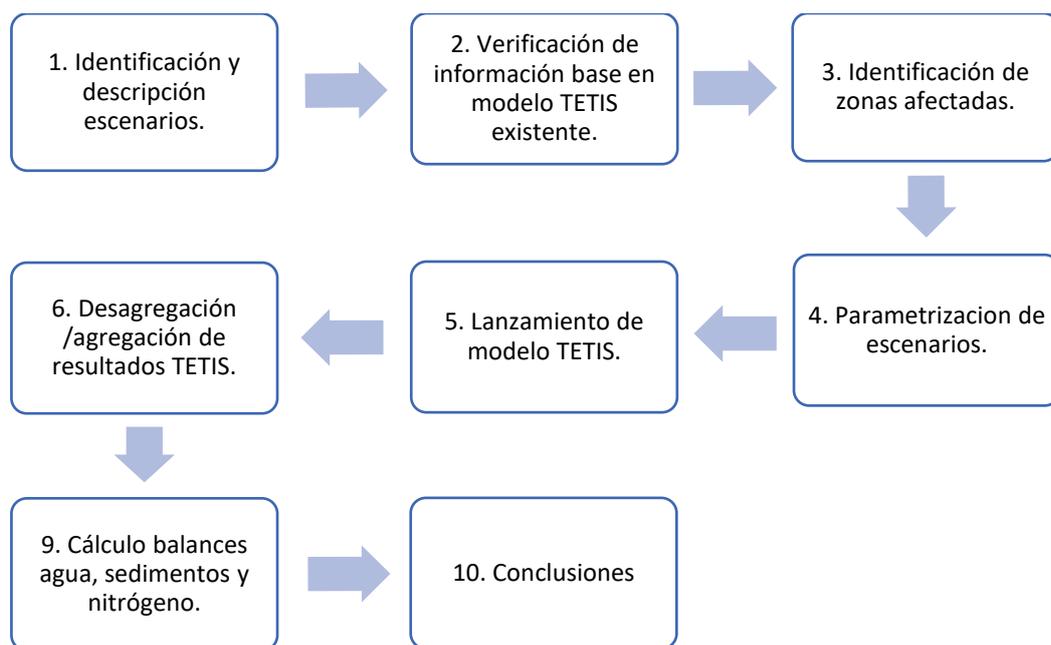


Figura 1-4 Metodología Zona Aportante Sur

Zona Aportante Total

- Capítulo 3.1: Estimación de parámetros hidrológicos para el montaje del modelo, tales como meteorología, modelo de elevación digital y sus derivados, análisis de usos de suelo, riego, cultivos, conductividad hidráulica, almacenamiento estático.
- Capítulo 3.2: Estimación de parámetros del ciclo de sedimentos, como factores USLE, textura de suelo.
- Capítulo 3.3: Metodología para calibración del modelo, elección de cuenca, estaciones meteorológicas, estaciones de aforo.
- Capítulo 3.4: Simulación global de agua y sedimentos con factores correctores calibrados de agua.

La metodología de trabajo para este apartado se indica en la Figura 1-5

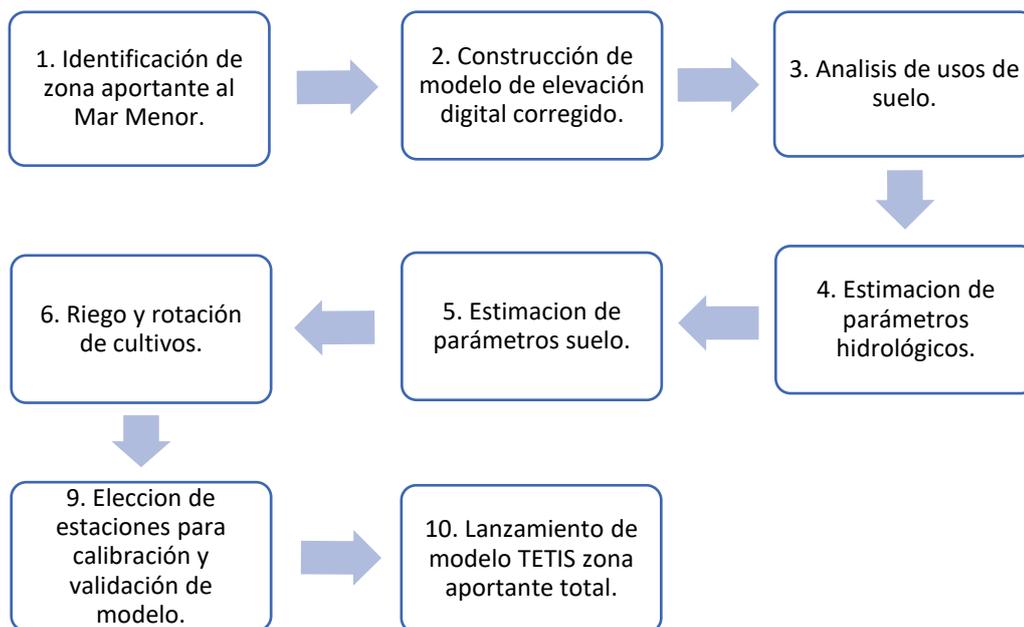


Figura 1-5 Metodología Zona Aportante Total.

2. ANÁLISIS EN ZONA APORTANTE SUR

La Zona Aportante Sur considera un área de 100.08 Km². En total se han delimitado 89 cuencas, de las cuales, 66 son microcuencas costeras, como puede observarse en la Figura 2-1. Además, se han localizado 6 cuencas endorreicas (Figura 2-2), que no afectan a las cuencas finalmente estudiadas.

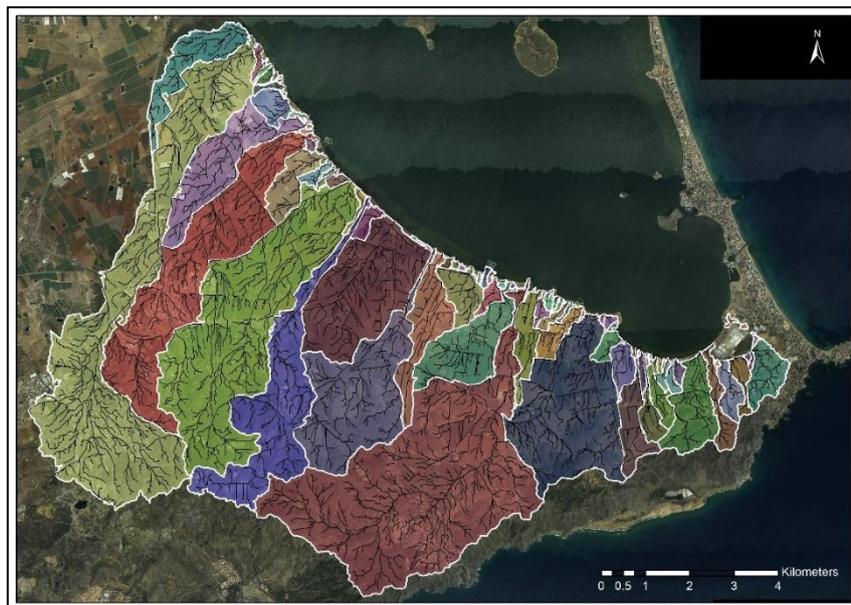


Figura 2-1 Delimitación de las cuencas en la zona sur del Mar Menor.

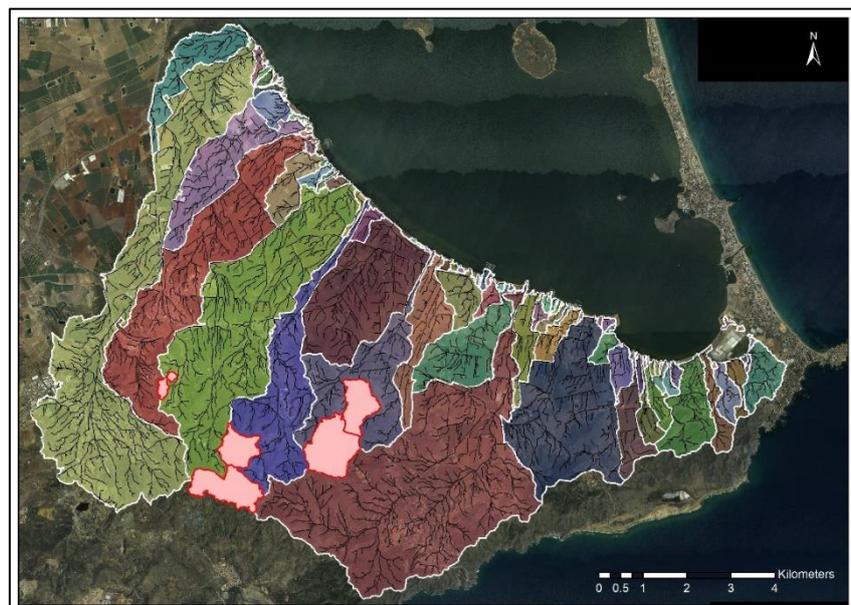


Figura 2-2 Cuencas endorreicas en la zona sur del Mar Menor.

2.1. DESCRIPCIÓN DE ESCENARIOS

En la Zona Aportante Sur se analizarán 5 escenarios o actuaciones, cada cual representa una medida que pretende mejorar la calidad de la masa de agua del Mar Menor mediante la disminución de los aportes de sedimentos y nutrientes. Estos son:

1. Áreas de Renaturalización (ARN).
2. Sistema de drenajes y embalse (COAG).
3. Franjas de actuación (Buffer).
4. Agricultura de precisión.
5. Implementación de la Ley 3/2020.

Los cuales se desarrollarán en detalle en los siguientes apartados.

2.1.1. ÁREAS DE RENATURALIZACIÓN (ARN)

Las Áreas de Renaturalización (ARN), son actuaciones de restauración de ecosistemas en zonas perimetrales al Mar Menor, propuestas por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD) y forman parte de los proyectos de la línea “2.1. Actuaciones de restauración de ecosistemas en la franja perimetral del Mar Menor y creación del Cinturón Verde” del Marco de Actuaciones Prioritarias para Recuperar el Mar Menor (MAPMM).

El objetivo del Cinturón Verde, según el MAPMM, es ‘Eliminar las afecciones directas y buscar un efecto tampón o amortiguador de impactos, así como una naturalización del entorno inmediato’. De esta forma, las ARN no son un proyecto aislado, ni en objetivos ni en ámbito espacial, sino que se entrelazan con el resto de los proyectos del MAPMM, coordinados administrativamente, y buscando un efecto sinérgico y acumulativo en la consecución del objetivo final de recuperar el Mar Menor.

Las ARN consisten en:

- Modificación del terreno mediante ribazos (aterrazados mediante muros de piedra) con el fin de suavizar las pendientes y así disminuir la erosión y favorecer la intercepción sedimentos.
- Reforestación con vegetación propia de los hábitats de interés comunitario presentes en la zona, así como otras especies asociadas a la agricultura tradicional en el Campo de Cartagena (algarrobos, palmeras, granados, higueras, etc.).

En la Figura 2-3 y Figura 2-4 se muestra a nivel general los cambios definidos por las ARN, que consideran aterrizados y reforestación con vegetación autóctona. En la Figura 2-5, a la izquierda se observa el estado actual (cultivos en sentido de la pendiente y escorrentía directa a través de zanjas de drenaje al Mar Menor). A la derecha se observa la propuesta ARN, con el terreno aterrizado, red de caminos, reforestaciones y nuevos cauces naturalizados.

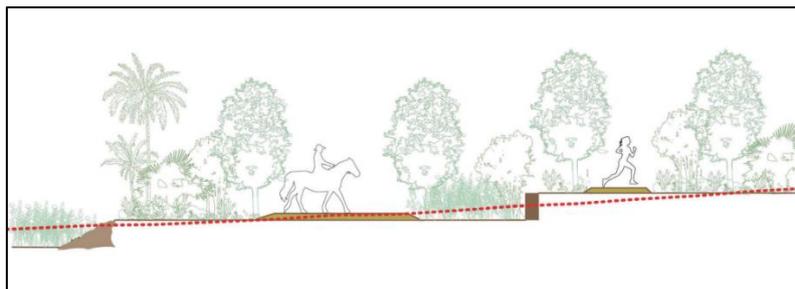


Figura 2-3 Vista perfil ribazos. Línea roja representa perfil actual. Fuente: MITERD



Figura 2-4 Fases de cambio de uso de suelo ARN



Figura 2-5 Detalle de cambios propuestos por ARN. Fuente: MITERD.

Por la complejidad del proyecto y la amplia superficie (mayor de 600 hectáreas), el MITERD plantea la posibilidad de desarrollarlo en tres fases según la prioridad identificada: Fase 1

(prioridad alta), Fase 2 (prioridad media-alta), Fase 3 (prioridad media). En este informe se consideran dos sub-escenarios ARN (indicados en la Figura 2-6):

- **PRIORITARIO:** con una superficie de 168ha.
- **GENERAL:** con el área extendida hasta 695ha.

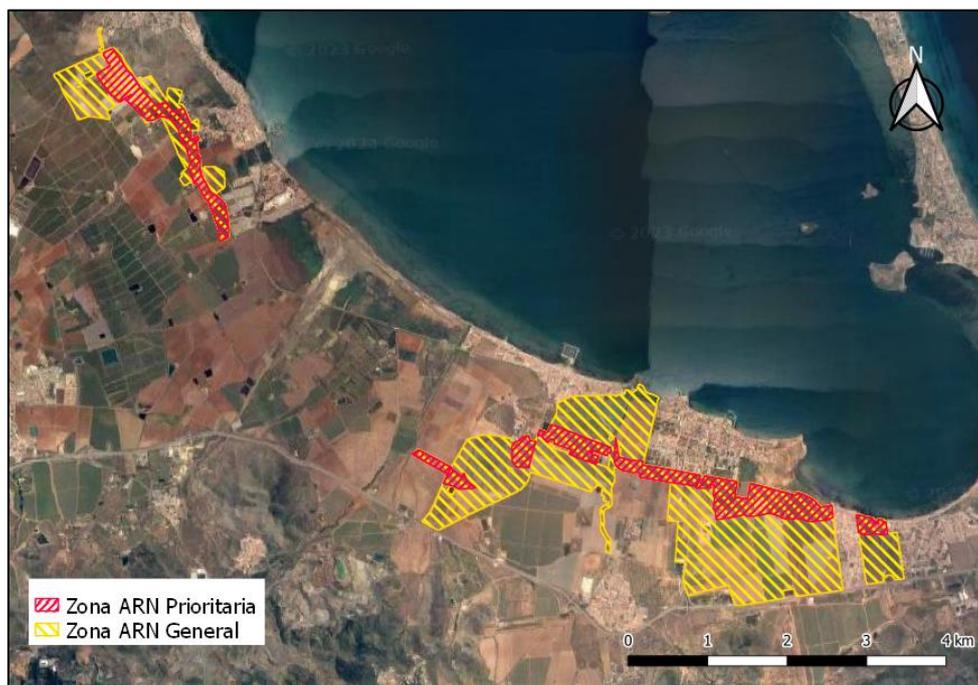


Figura 2-6 Sub-Escenarios ARN: Prioritario y General.

Las ARN tienen por objetivo disminuir la escorrentía, sedimentos y contaminantes (principalmente nitratos derivados de la agricultura) en el Mar Menor.

Se considera que las modificaciones introducidas por las ARN afectan únicamente a la superficie del terreno correspondiente a las laderas según la terminología de TETIS. Esto excluye cualquier impacto en los cauces, que, en el contexto del proyecto actual (TETIS), se refieren a aquellos cursos de agua que presentan escorrentía permanente, los cuales no se encuentran presentes. El tamaño de las laderas se parametriza en TETIS con el área de inicio de los cauces de cárcavas, que se ha estimado en 0.0107 km^2 (aproximadamente 1 ha).

2.1.2. SISTEMA DE DRENAJES Y EMBALSES COAG

Los escenarios propuestos por la Coordinadora de Organizaciones de Agricultores y Ganaderos (COAG) suponen la construcción de canales de drenaje que recogen la escorrentía de los terrenos agrícolas, para luego conducirla hasta embalses de retención del agua, nitrógeno y sedimentos transportados.

2.1.2.1. Características físicas

La COAG define 8 embalses y 7 canales de intercepción que recolectan escorrentías, como se observa en la Figura 2-7. Las superficies de afección aguas arriba de cada embalse se indican en la Figura 2-8, donde se puede observar que, al localizarse en las cercanías del Mar Menor, recogen las aguas de escorrentía de un porcentaje elevado de las cuencas afectadas.



Figura 2-7 Embalses escenario COAG y canales de derivación. Fuente: COAG.

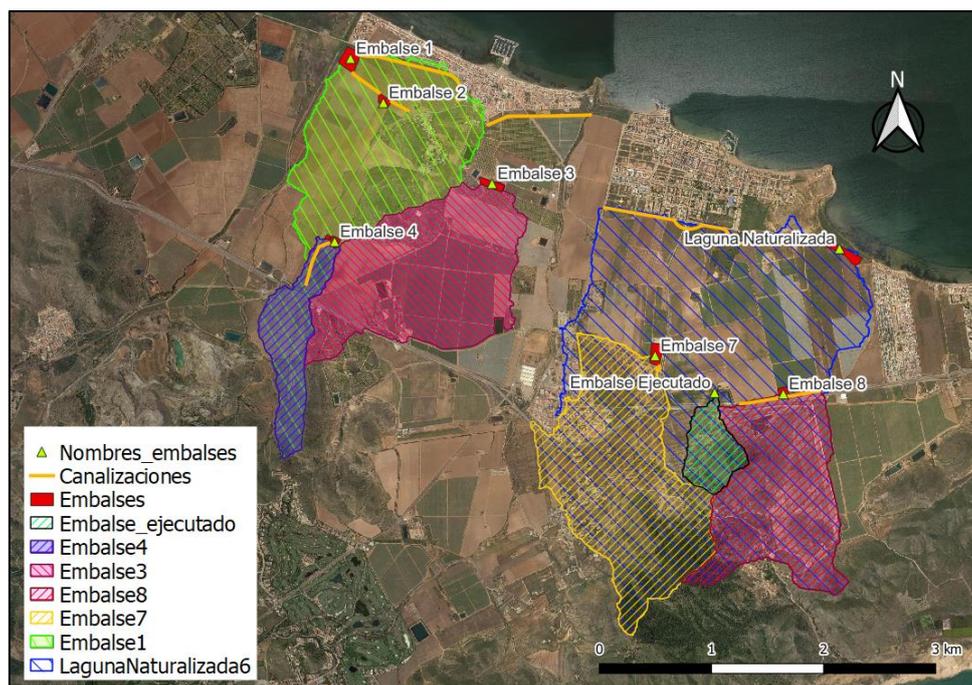


Figura 2-8 Áreas de afección por embalses de la COAG.

Las características físicas de cada uno de los embalses se indican en la Tabla 2-1. Se considera que estos embalses tienen taludes interiores con pendiente 2H:1V.

Tabla 2-1 Características de los embalses COAG. Fuente: COAG.

Embalse	Volumen útil [m ³]	Superficie base mayor [m ²]	Profundidad* [m]
1	107,000	29,800	4
2	40,000	9,928	5
3**	61,787	11,688	8
4	1,800	900	3
6 (Laguna Naturalizada)	6,200	15,375	0.4
7	103,700	16,535	8.5
Ejecutado	18,000	2,700***	4***
8	28,000	7,225	5.5

* Esta altura no incluye 0.5 m de resguardo

*** Estimado

** Capacidad útil de referencia = 90,400 m³

Por otra parte, los embalses 1, 2, 4, 6, 7 y 8 tienen canales de derivación e intercepción de aguas, cuyas características y capacidades estimadas se indican en la Tabla 2-2. Las características geométricas de estos canales se indican en la Figura 2-9 . Se asume una rugosidad de Manning de 0.014 para el hormigón.

Tabla 2-2 Características canales intercepción de los embalses COAG. Fuente: COAG.

Embalse	Longitud [m]	Pendiente [m/m]	Velocidad [m/s]	Froude	Capacidad máxima [m ³ /s]
Embalse 1	1,145	0.0004	0.88	0.28	1.4
Embalse 2	607	0.0024	2.06	0.66	3.3
Embalse 4	470	0.0330	7.57	2.45	12
Embalse3	Sin canal				
Embalse 7	40	0.0168	5.39	1.75	8.5
Embalse Ejecutado	Sin canal				
Embalse 8 Tramo Oeste	390	0.0071	3.51	1.14	5.6
Embalse 8 Tramo Este	390	0.0026	2.13	0.69	3.4
Laguna Naturalizada	2,116	0.0043	2.75	0.88	4.5

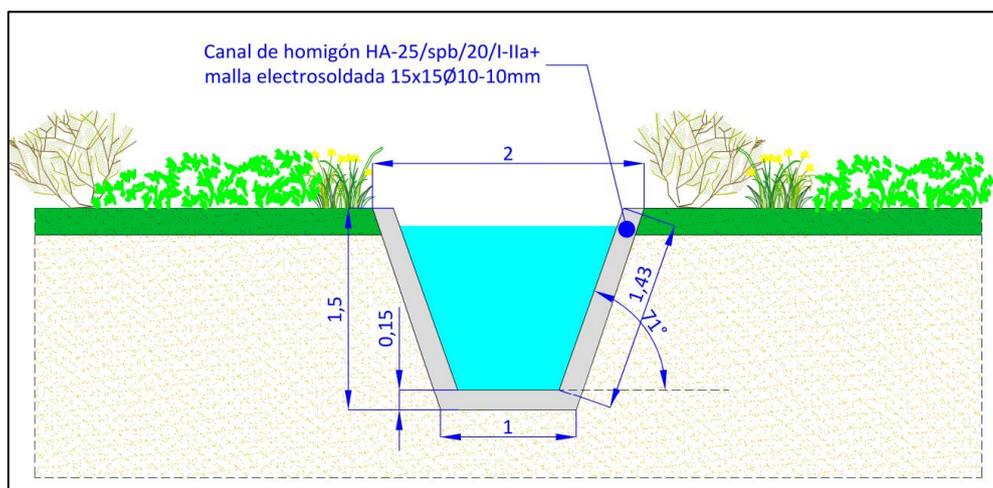


Figura 2-9 Características geométricas tipo de los canales. Fuente: COAG.

2.1.2.2. Velocidad de vaciado

Debido a que los embalses presentan capacidad finita, es necesario considerar opciones del manejo de la escorrentía almacenada en cada embalse, para lo cual, se consideran 2 subescenarios de vaciado:

- **VACIADO ACTIVO:** cada embalse considera un sistema de drenado con capacidad de evacuar su volumen completo de agua y el N disuelto en 60 días y que no llegará a la laguna del Mar Menor (por ejemplo, porque se utiliza para riego y/o se envía a depuración antes de su vertido).

- **SIN VACIADO:** ningún embalse tendrá sistema de drenado y el agua sólo sale del embalse por evaporación. Este sub-escenario sin vaciado representa la situación extrema de mínima efectividad de estos embalses.

En los dos casos se asume que los sedimentos depositados en el fondo de los embalses se recogen y llevan a vertedero de forma periódica, por lo que se mantiene el volumen útil de los mismos.

Para determinar la velocidad de vaciado por evaporación, se han utilizado la precipitación y ETP medias de la zona, que son de 282 y 1,248 mm/año, respectivamente. El resultado es una velocidad de descenso media de 966 mm/año. Teniendo en cuenta las alturas de cada embalse (los embalses 1 y 2 se tratarán conjuntamente y se ha adoptado la altura del de mayor volumen), resultan en los tiempos de vaciado que figuran en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3 Tiempos de vaciado por balance entre lluvia y evaporación en los embalses COAG.

Embalse	Profundidad considerada [m]	Tiempo de vaciado [días]
1 y 2	4	1,511
3	8	3,021
4	3	1,133
6 (Laguna Naturalizada)	0.4	151
7	8.5	3,210
Ejecutado	4	1,511
8	5.5	2,077

2.1.2.3. Relación caudales pico y caudales medios diarios

Debido a que la consideración de caudales medios diarios podría subestimar los desbordes en los canales de los embalses, se considera trabajar con un hidrograma sintético triangular para representar las crecidas asociadas a los episodios de precipitación. El caudal pico de este hidrograma será calculado según la expresión de Fuller indicada en el documento del CEDEX “Mapa de caudales máximos” (CEDEX, 2011). El tiempo base del hidrograma se ajustará para coincidir con el volumen medio diario. La expresión de Fuller es:

$$Q_{pico} = \left(1 + \frac{a}{A^b}\right) \cdot Q_{medio}$$

donde A representa el área de la cuenca y las constantes “a” y “b” son parámetros a calibrar regionalmente. Para su calibración se consideraron 4 estaciones foronómicas en la zona de

la Rambla del Albuji3n e indicadas en la Tabla 2-4. Se consideraron los valores medios diarios y m3ximos diarios registrados en el per3odo de marzo 2021 a diciembre 2022.

Tabla 2-4 Estaciones utilizadas para la calibraci3n de la ecuaci3n de Fuller.

C3digo SAIH-CHS	Nombre
06A18Q01	Desembocadura Rambla Albuji3n
06A06Q01	Rambla La Murta (Los Cegarras)
06A02Q01	Rambla Albuji3n (Pozo Estrecho)
06A01Q01	Rambla Albuji3n (Puebla)

De esta manera, la ecuaci3n de Fuller ajustada a las cuencas vertientes a la laguna del Mar Menor queda como se indica a continuaci3n:

$$Q_{pico} = \left(1 + \frac{18.538}{A^{0.274}}\right) \cdot Q_{medio}$$

Con la expresi3n indicada, se han calculado los valores de caudal pico aportantes a los canales de intercepci3n de los embalses COAG para toda la serie de caudales.

2.1.3. Franja de actuación Buffer 1500

Este escenario contempla actuaciones en los cultivos comprendidos dentro de franjas buffer, consideradas desde la línea de costa del Mar Menor. La primera va desde los 0m a los 500m y la segunda desde los 500m a los 1500m, como se indica en la Figura 2-10



Figura 2-10 Zonas Buffer.

Estas franjas imponen condiciones de fertilización, cultivos y prácticas de conservación a 3 usos del suelo:

- **Terrenos regados permanentemente:** Correspondiente a cultivos *hortícolas*.
- **Terrenos de labor seco:** Correspondientes a *cebada*.
- **Frutales:** Correspondiente a *cítricos*.

Además, el uso de suelo de “terrenos regados permanentemente” considera una rotación anual de 3 cultivos, indicados en la Tabla 2-5

Tabla 2-5 Rotación anual cultivo hortícolas.

Cultivo	Fecha Plantación	Fecha Cosecha
Brócoli	1 enero	30 abril
Melón	1 junio	31 agosto
Lechuga	1 octubre	31 diciembre

Para la franja entre 0m y 500m se considera la remoción de todo tipo de cultivo, (hortícolas y cebada). A largo plazo, se espera que al remover los cultivos de la zona de menos de 500m, la zona se cubra con vegetación escasa (herbácea y matorral bajo).

Luego, entre los 500m y 1500m se permite la agricultura de precisión con las siguientes restricciones:

- Instalación de barreras vegetales en cultivos de hortícolas, cítricos y cebada cubriendo al menos un 20% de la superficie. Estas barreras vegetales consideran herbáceas, arbustos y árboles de la zona de bajo consumo de agua (algarrobos, olivos, etc)
- Disposición de cultivos siguiendo las líneas de nivel.
- Un máximo de rotación de 2 cultivos al año, de ellos sólo 1 del Grupo 1 (Tabla 2-7).
- Fertilización máxima de 170 kgN ha⁻¹ año⁻¹.

Un resumen de este escenario se indica en la Tabla 2-6.

Tabla 2-6 Resumen escenario Buffer.

Franja	Cultivo	Restricción fertilización	Prácticas de cultivo
0 a 500	-Sin cultivos.	Sin cultivos.	Sin cultivos.
500 a 1500	-Melón y lechuga. -Cebada. -Cítricos.	Máximo 170 kgN ha ⁻¹ año ⁻¹ .	-Cultivo siguiendo contornos de pendiente -20% barreras vegetales
Más de 1500	-Brócoli, melón y lechuga. -Cebada. -Citrícos.	Sin límite	-Sin prácticas específicas

Tabla 2-7 Grupos hortícolas.

Grupo 1	Grupo 2
Ajo, apio, hortalizas del género brassica, hortalizas de hoja, hierbas aromáticas (perejil, hojas apio, cilantro, eneldo, albahaca), maíz dulce, cebolla, puerro.	Guisantes, habas, judías, melón, pepino, pimiento, tomate, zanahoria, remolacha, alcachofa, sandía, patata

2.1.4. AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Este escenario contempla actuaciones en los cultivos comprendidos en toda la zona aportante sur, imponiendo condiciones de fertilización, cultivos y prácticas de conservación a 3 usos del suelo:

- **Terrenos regados permanentemente:** Correspondiente a cultivos *hortícolas*.
- **Terrenos de labor seco:** Correspondientes a *cebada*.
- **Frutales:** Correspondiente a *cítricos*.

Al igual que el escenario Buffer, los “terrenos regados permanentemente” consideran una rotación anual de 3 cultivos, indicados en la Tabla 2-5.

Las restricciones de la agricultura de precisión son:

- Instalación de barreras vegetales en cultivos de hortícolas, cítricos y cebada cubriendo al menos un 5% de la superficie. Las barreras vegetales de hortícolas y cebada consideran herbáceas, arbustos y árboles de la zona de bajo consumo de agua (algarrobos, olivos, etc). Las barreras vegetales de cítricos consideran herbáceas y arbustos.
- Disposición de cultivos siguiendo las líneas de nivel.
- Un máximo de rotación de 2 cultivos al año, de ellos sólo 1 del Grupo 1 (Tabla 2-7).
- Se podrá hacer dos ciclos seguidos de hortícolas de hojas (grupo 1) de ciclo inferior a 45 días.

La reducción de las dosis de fertilizantes se basó en un balance de masa de nitrógeno en el suelo y las plantas, lo cual afectó a los cultivos de cítricos y hortícolas. Este balance de masa se aplicó según lo establecido en el reglamento oficial de 2017 (CARM 2017) y las dosis de fertilizantes se calcularon de la siguiente manera:

$$Fert = Dmax - Nini - Nmin - Norg - Nirr$$

Donde *Fert* es la cantidad total de fertilizante inorgánico (kgN ha⁻¹), *Dmax* es la dosis máxima recomendada de fertilizante para un cultivo específico (kgN ha⁻¹), *Nini* es el contenido de nitrógeno mineral en el suelo antes de la siembra (kgN ha⁻¹), *Nmin* es el nitrógeno que resulta del proceso de mineralización de la materia orgánica entre las fechas de siembra y cosecha (kgN ha⁻¹), *Norg* es el fertilizante orgánico (kgN ha⁻¹) y *Nirr* es la cantidad de nitrógeno en el agua de riego (kgN ha⁻¹). En este caso, *Norg* tenía un valor de

cero porque no se usó fertilizante orgánico. *Nirr* se consideró incluido en el término FERT porque es difícil conocer el contenido de nitrógeno en el agua de riego. Por lo tanto, la cantidad de fertilizante calculada aquí incluyó el contenido de nitrógeno en el agua de riego, lo cual los agricultores deberían deducir mediante un análisis de agua simple a nivel de campo. *Dmax* se calculó según CARM (2017), mientras que, debido a la falta de datos, *Nmin* se calculó como el valor promedio de la mineralización de la materia orgánica entre las fechas de siembra y cosecha para cada cultivo utilizando los resultados de la simulación del escenario base. *Nini* se calculó de la misma manera, pero se corrigió mediante un coeficiente de agotamiento, que tiene en cuenta que el volumen de nitrógeno en el suelo es extremadamente variable, como se indica en CARM (2017). Tuvo un valor del 14% en cultivos hortícolas y del 10% en árboles cítricos. Además, CARM (2017) establece un período de exclusión de cultivos de 3 meses y, por lo tanto, las fechas de siembra y cosecha de melón y lechuga se ajustaron cambiando a variedades más cortas.

Los valores de fertilización (Puertes et al. 2021) y prácticas de cultivo se indican en la Tabla 2-8

Tabla 2-8 Resumen Escenario Agricultura Precisión.

Cultivo	Restricción fertilización	Prácticas de cultivo
Cítricos.	Máximo 238 kgN ha ⁻¹ año ⁻¹ .	-Cultivo siguiendo contornos de pendiente -5% barreras vegetales
Brócoli	Máximo 190 kgN ha ⁻¹ año ⁻¹	-Cultivo siguiendo contornos de pendiente -5% barreras vegetales
Melón	Máximo 98 kgN ha ⁻¹ año ⁻¹	-Cultivo siguiendo contornos de pendiente -5% barreras vegetales
Lechuga	Máximo 105 kgN ha ⁻¹ año ⁻¹	-Cultivo siguiendo contornos de pendiente -5% barreras vegetales

Para mantener la producción de brócoli y lechuga simultáneamente, se divide el uso de suelo hortícola en 2, donde cada uno tiene una rotación de 2 cultivos al año: brócoli+melón y melón+lechuga. Estos mantienen las fechas de siembra y cosecha indicados en la Tabla 2-5.

2.1.5. APLICACIÓN DE LEY 3/2020

Este escenario corresponde a la combinación de los escenarios Buffer y Agricultura de Precisión, y refleja la completa aplicación de la Ley 3/2020 publicada en el BOE-9793 del 17 de agosto de 2020. Su aplicación se resume en la Tabla 2-6.

Tabla 2-9 Resumen escenario Ley 3/2020.

Franja	Cultivo	Restricción fertilización	Prácticas de cultivo
0 a 500	-Sin cultivos.	Sin cultivos.	Sin cultivos.
500 a 1500	-Melón y lechuga. -Cebada.	Máximo 170 kgN ha ⁻¹ año ⁻¹ .	-Cultivo siguiendo contornos de pendiente -20% barreras vegetales
Más de 1500	Cítricos.	Máximo 238 kgN ha ⁻¹ año ⁻¹ .	-Cultivo siguiendo contornos de pendiente -5% barreras vegetales
	Brócoli	Máximo 190 kgN ha ⁻¹ año ⁻¹	-Cultivo siguiendo contornos de pendiente -5% barreras vegetales
	Melón	Máximo 98 kgN ha ⁻¹ año ⁻¹	-Cultivo siguiendo contornos de pendiente -5% barreras vegetales
	Lechuga	Máximo 105 kgN ha ⁻¹ año ⁻¹	-Cultivo siguiendo contornos de pendiente -5% barreras vegetales

2.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO TETIS EN CUENCAS DEL SUR

Para la implementación en el modelo TETIS de las distintas actuaciones presentadas anteriormente, se utiliza como base el informe previo (IIAMA 2018), utilizando directamente la información indicada en los apartados “2.2.1 Información meteorológica”, “2.2.2.-Ciclo hidrológico”, “2.2.3.- Ciclo de sedimentos”, “2.2.4.-Ciclo de nitrógeno” y “2.2.5.- Calibración del modelo”.

2.2.1. INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

A continuación, se recoge la información de entrada necesaria para el funcionamiento del modelo: las series de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial; se describen las fuentes de información de cada uno de los datos y el método de cálculo empleado en el caso de ser necesario. Los datos diarios de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial de la zona de estudio son los del periodo 1971-2016.

2.2.1.1. Precipitación

La principal fuente de información ha sido la base de datos Spain02 desarrollada por el Grupo de Meteorología de Santander a partir de los datos registrados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). La versión empleada ha sido la “*VERSION v4*”, que proporciona una malla de resolución 0,11° para el periodo temporal 1971-2010 (Herrera et al., 2016).

A pesar de abarcar hasta el año 2010, se detectaron incoherencias en los años 2008 a 2010, por lo que la serie fue completada en el periodo 2008-2016 con la serie de precipitación de la estación meteorológica de Cartagena (7012C) proporcionada por la delegación AEMET de la Región de Murcia. Puesto que los datos de Spain02 no son puntuales, sino datos medios areales, fue necesario realizar una corrección de la precipitación de la estación de Cartagena mediante un coeficiente de reducción areal (Témez, 1991). Los datos medios mensuales pueden observarse en la Figura 2-11. La media anual en la zona sur del Mar Menor es de 282 mm/año.

2.2.1.2. Temperatura

De igual forma que en el caso de las series de precipitación, se ha empleado la base de datos Spain02 para el periodo 1971-2007 y se ha completado hasta el año 2016 con la estación

meteorológica de Cartagena (AEMET). Los datos medios mensuales se observan en la Figura 2-11.

2.2.1.3. Evapotranspiración potencial

Dada la ausencia de medidas ha sido necesario el cálculo de la evapotranspiración potencial a partir de los datos de temperatura. Para ello se ha empleado la ecuación de Hargreaves y Samani (1985):

$$ET_0 = 0.0135 (t_{med} + 17.78) R_s$$

donde ET_0 es la evapotranspiración potencial [mm/día], t_{med} la temperatura media [°C] y R_s es la radiación solar incidente [mm/día], calculada a partir de la radiación solar extraterrestre, que se encuentra tabulada en función de la latitud y el mes del año. En la Figura 2-11, se muestran los valores de la evapotranspiración media mensual resultante de aplicar la formulación anterior. La media anual en la zona sur del Mar Menor es de 495 mm/año.

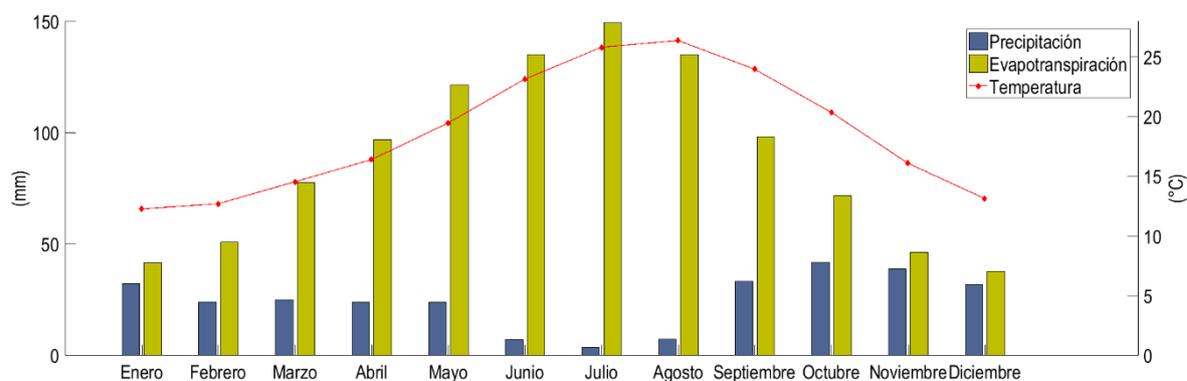


Figura 2-11. Precipitación, temperatura y evapotranspiración media mensual.

2.2.2. CICLO HIDROLÓGICO

La información recogida en este apartado se divide en información general sobre la hidrología superficial y subterránea, e información necesaria para la implementación del modelo. Puesto que la zona sur del Mar Menor presenta cultivos de regadío y cítricos, también ha sido necesario recopilar la información sobre las dotaciones de riego de la zona.

2.2.2.1. Modelo de elevación digital

Como modelo de elevación digital (MED) se ha empleado el del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) con resolución de 5m (CNIG, 2016b). Dadas las características de la zona y a pesar del incremento en el tiempo de computación, emplear este paso de malla ha resultado la única opción para reproducir de forma adecuada la red de drenaje. Este MED ha sido corregido empleando un mapa en formato vectorial de la red de drenaje, que ha sido digitalizada a partir del Lidar del CNIG de 2016 (0.5 puntos/m²) (CNIG, 2016a) y diversas visitas de campo. En la Figura 2-12 se encuentra representado el modelo de elevación digital corregido y la red de drenaje digitalizada.

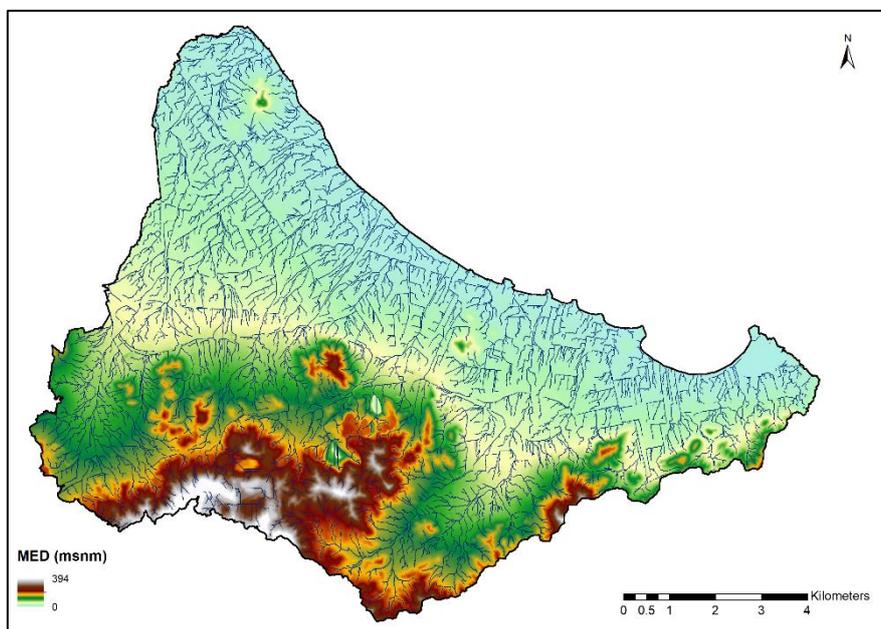


Figura 2-12 Modelo de elevación digital y red de drenaje en las cuencas del sur del Mar Menor.

2.2.2.2. Parámetros derivados del MED

Los mapas necesarios para el funcionamiento del modelo y cuyo cálculo depende del MED son: el mapa de direcciones de drenaje, el de celdas drenantes acumuladas (Figura 2-13a), el mapa de pendientes (Figura 2-13b) y el de velocidad de flujo en ladera. Los tres primeros se obtienen fácilmente mediante un Sistema de Información Geográfica, pero en este caso, dada la complejidad de la red de drenaje y a pesar de haber corregido el MED, ha sido necesario modificar manualmente el mapa de direcciones de drenaje en algunos puntos. El mapa de velocidad de flujo en ladera se ha obtenido mediante la ecuación:

$$v_l = 1.4142\sqrt{S_0}$$

donde v_l es la velocidad del flujo en ladera [m/s] y S_0 es la pendiente del terreno [m/m].

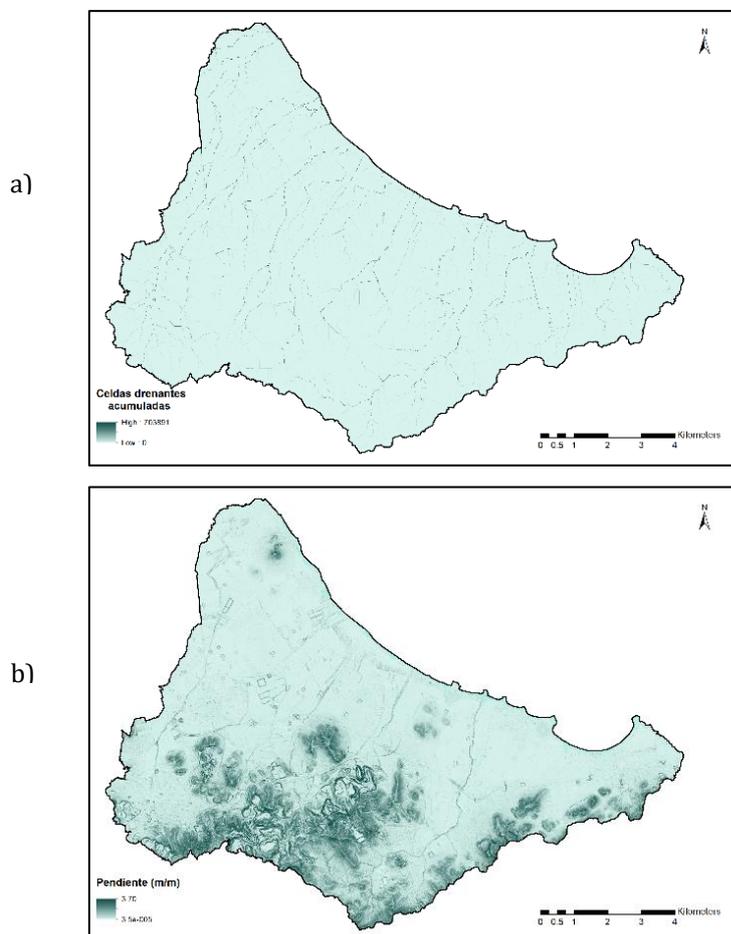


Figura 2-13. Mapa de celdas drenantes acumuladas (a) y mapa de pendientes (b).

2.2.2.3. Usos del suelo

Los usos del suelo empleados son los correspondiente al CORINE Land Cover de 2006 (EEA, 2006) al igual que en el estudio de referencia del IIAMA (2018). Tal y como se observa en la Figura 2-14, predomina el cultivo de hortalizas de regadío y los árboles frutales, lo que supone casi un 50% de la superficie de la zona de estudio (Tabla 2-10).

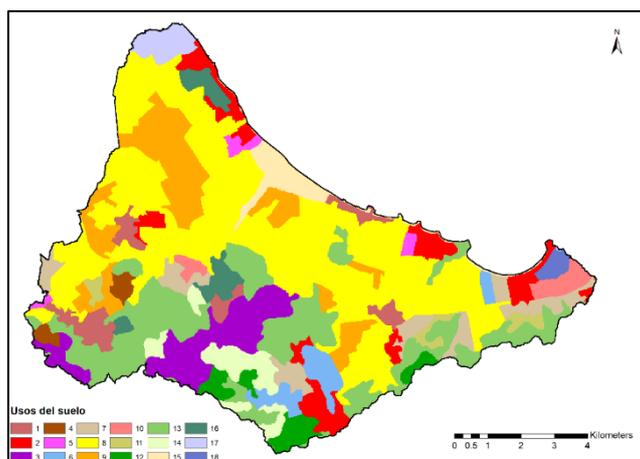


Figura 2-14. Mapa de usos del suelo.

Tabla 2-10. Usos del suelo, superficie y porcentaje de ocupación en la zona sur del Mar Menor.

Código	Uso del suelo	Superficie [km ²]	Porcentaje [%]
1	Tejido urbano continuo	3.35	3.33
2	Tejido urbano discontinuo	5.23	5.20
3	Zonas de extracción minera	6.05	6.01
4	Escombreras y vertederos	0.84	0.83
5	Zonas en construcción	0.78	0.78
6	Instalaciones deportivas y recreativas	2.46	2.44
7	Tierras de labor en secano	4.53	4.50
8	Terrenos regados permanentemente	36.91	36.67
9	Árboles frutales	9.54	9.48
10	Mosaico de cultivos	1.51	1.50
11	Terrenos principalmente agrícolas, pero con importantes espacios de vegetación natural	1.18	1.17
12	Bosque de coníferas	2.37	2.35
13	Vegetación esclerófila	16.14	16.04
14	Matorral boscoso de transición	3.18	3.16
15	Playas, dunas y arenales	2.18	2.17
16	Espacios de vegetación escasa	2.22	2.21
17	Marismas	1.57	1.56
18	Salinas	0.61	0.61

Además, ha sido necesario conocer los cultivos predominantes en la zona de estudio. Tal y como se observa en la Figura 2-15, prevalecen los cultivos de brócoli, melón, lechuga y alcachofa, y en cuanto a cultivo arbóreo, predominan los cítricos. A pesar de ser la alcachofa

un cultivo importante, se ha descartado su inclusión en el modelo por ser un cultivo bianual, lo que complica significativamente su adecuada modelización.

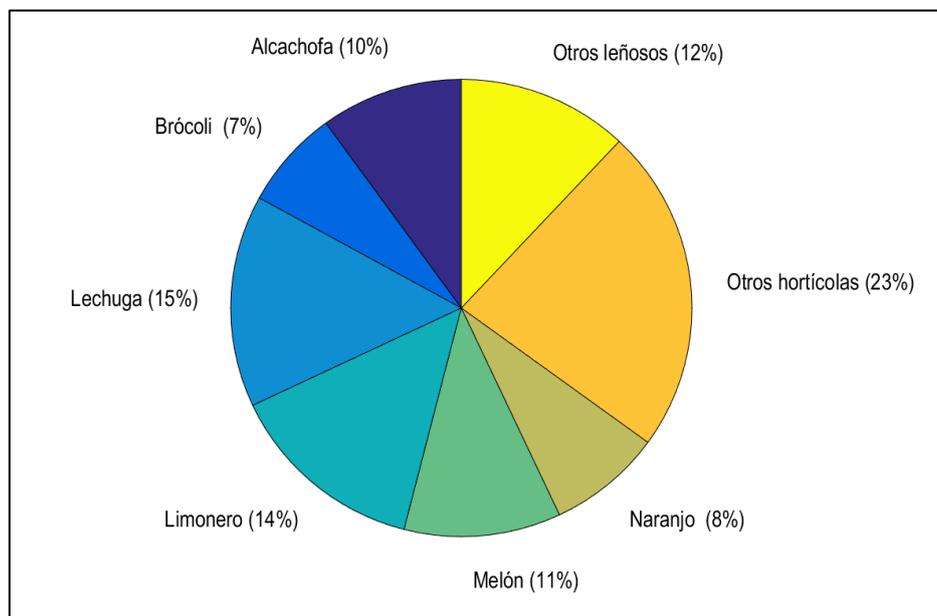


Figura 2-15. Distribución de cultivos en la zona sur del Mar Menor.

2.2.2.4. Parámetros derivados de los usos del suelo

Los parámetros derivados de los usos del suelo son: el factor de vegetación, la interceptación máxima, la profundidad de raíces y las abstracciones iniciales. Los dos últimos, no se emplean directamente en el modelo, pero son necesarios para calcular el parámetro de almacenamiento estático máximo. Las abstracciones iniciales, presentan una componente dependiente del uso del suelo y otra de la pendiente.

En el cálculo del factor de vegetación, se ha empleado la metodología propuesta por la *Food and Agriculture Organization* en su Documento No.56 (FAO, 2006). En la Tabla 2-11 se observan los valores medios mensuales empleados para cada uno de los usos del suelo, salvo para los usos del suelo tierras de labor en secano (uso 7) y hortícolas de regadío (uso 8), para las cuales el valor del factor de vegetación se introduce de forma diaria.

Tabla 2-11. Factor de vegetación mensual según usos del suelo.

Uso	Ene.	Feb.	Mar.	Abril	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

ANÁLISIS DE LA EFICACIA DE DIVERSAS MEDIDAS DE CONTROL SOBRE EL VERTIDO DE AGUA, SEDIMENTOS Y NITRÓGENO A LA LAGUNA COSTERA DEL MAR MENOR MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO TETIS

Uso	Ene.	Feb.	Mar.	Abril	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
6	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
10	0.2	0.2	0.37	1.04	1.15	1	0.32	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
11	0.6	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.8	0.8	0.8	0.75	0.7	0.6
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
14	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
16	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2
17	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3
18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

En el caso de los hortícolas de regadío y las tierras de labor en secano, se empleará el submodelo de cultivos del modelo TETIS, por lo que el factor de vegetación en vez de tomar un valor medio mensual, toma un valor diario debido a que se requiere más precisión en el cálculo de la evapotranspiración. En la Figura 2-16 se observa la variación anual del factor de vegetación en el caso de los hortícolas de regadío (brócoli, melón y lechuga) y el cultivo de secano (cebada).

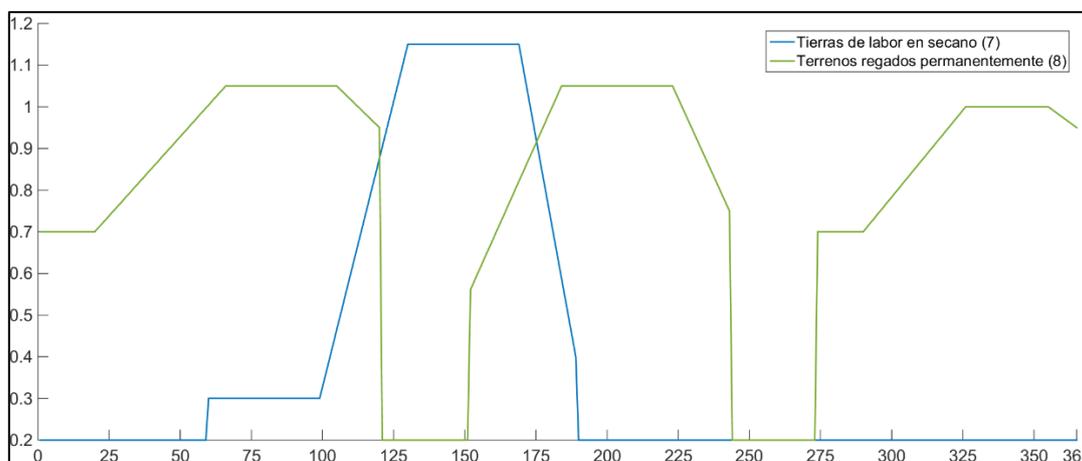


Figura 2-16. Valores diarios del factor de vegetación para los usos del suelo 7 y 8.

Los valores de interceptación máxima, profundidad de raíces y la componente dependiente del suelo de las abstracciones iniciales son los que se indican en la Tabla 2-12.

Tabla 2-12 Valores de interceptación máxima, profundidad de raíces y abstracciones iniciales.

Código	Uso del suelo	I _{max} [mm]	P. Raíces [m]	Abs. Ini. [mm]
1	Tejido urbano continuo	0	0	0
2	Tejido urbano discontinuo	3	0.06	5
3	Zonas de extracción minera	0	0.01	0
4	Escombreras y vertederos	0	0.06	0
5	Zonas en construcción	0.5	0.06	0
6	Instalaciones deportivas y recreativas	3	0.1	5
7	Tierras de labor en seco	1	0.8	6
8	Terrenos regados permanentemente	1	0.5	6
9	Árboles frutales	1	1.5	6
10	Mosaico de cultivos	1	0.7	6
11	Terrenos principalmente agrícolas pero con importantes espacios de vegetación natural	5	0.75	6
12	Bosque de coníferas	9	1.5	4
13	Vegetación esclerófila	4	0.7	6
14	Matorral boscoso de transición	5	0.7	5
15	Playas, dunas y arenales	0	2	0
16	Espacios de vegetación escasa	3	0.02	3
17	Marismas	4	0.7	6
18	Salinas	0	0	0

En el caso de las abstracciones iniciales, al valor anteriormente tabulado, hay que sumarle la componente dependiente de la pendiente, que se calcula mediante la fórmula empírica:

$$Abs_{ini} = abs[10 - (1.3S_0)]$$

donde S_0 es la pendiente en %.

2.2.2.5. Parámetros del suelo

Los mapas de parámetros necesarios para caracterizar el suelo son: la profundidad del primer obstáculo para el desarrollo de raíces, el contenido de agua disponible en el suelo y la capacidad de infiltración del suelo. Los dos primeros, al igual que la profundidad de raíces y las abstracciones iniciales, no se emplean directamente en el modelo, pero son necesarios para calcular el almacenamiento estático máximo.

La profundidad del primer obstáculo para el desarrollo de raíces se ha obtenido directamente de la European Soil DataBase (ESDB) del European Soil Data Centre (ESDAC), concretamente del *dataset: European soil database derived data* (Hiederer, 2013).

El contenido de agua disponible en el suelo, se ha calculado como la diferencia entre el contenido de agua a capacidad de campo y el contenido de agua en el punto de marchitez. Para ello, ha sido necesario calcular la textura del suelo mediante los mapas de contenido en arena, limo y arcilla de la ESDB, *dataset: Topsoil physical properties for Europe* (Ballabio et al., 2016). Conocida la textura del suelo, se ha aplicado la formulación propuesta por Clapp y Hornberger (1978):

$$\psi = \psi_{ae} \left(\frac{n}{H} \right)^b$$

donde ψ es el potencial mátrico (Mpa), ψ_{ae} es el potencial mátrico de entrada del aire (Mpa), n es la porosidad, b es un índice relacionado con la distribución de la porosidad y H es el contenido de agua en el suelo (m/m). Los valores empleados para el potencial mátrico a capacidad de campo y al punto de marchitez han sido 0,015 MPa y 3 MPa respectivamente. Los valores del potencial mátrico del aire de entrada, la porosidad y el índice b , han sido los propuestos por Clapp y Horberger (1978) según la textura del suelo.

La capacidad de infiltración del suelo (Figura 2-17a) ha sido calculada a partir de los mapas de contenido en arena, limo y arcilla de la ESDB aplicando las funciones de pedotransferencia de Saxton et al. (1986). Una vez calculada, el valor en las zonas urbanas se ha modificado para representar el efecto de impermeabilización que generan estas zonas en el suelo. De esta forma, en el uso del suelo tejido urbano continuo (uso 1), el valor considerado ha sido un 20% del obtenido, mientras que en las zonas de tejido urbano discontinuo (uso 2), el valor empleado ha sido un 80% del obtenido.

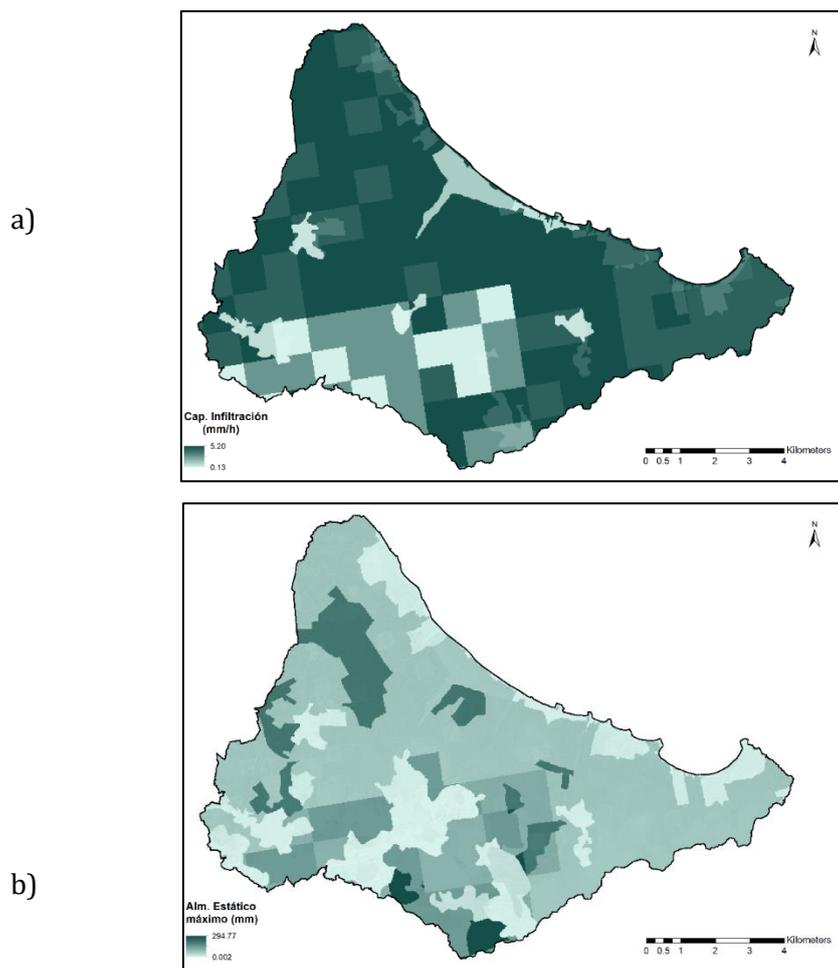


Figura 2-17. Mapa de capacidad de infiltración (a) y almacenamiento estático máximo (b).

Finalmente, se ha calculado el almacenamiento estático máximo (Figura 2-17b) como:

$$H_u = Alm_{sup} + AWC \min(P_{raíces}; ROO)$$

donde H_u es el almacenamiento estático máximo (mm), Alm_{sup} son las abstracciones iniciales, AWC es el contenido de agua disponible en el suelo (mm/m), $P_{raíces}$ es la profundidad de las raíces (m) y ROO es la profundidad del primer obstáculo para el desarrollo de raíces.

2.2.2.6. Parámetros geológicos para percolación

La información geológica necesaria para el modelo es la capacidad de percolación del acuífero. Para ello se ha empleado el mapa de permeabilidad cualitativa de España a escala 1:200,000 proporcionado por el IGME (2013). Este mapa ha sido reclasificado para

asignarle un valor a cada permeabilidad cualitativa. En la Tabla 2-13 se muestran los valores empleados en la zona sur del Mar Menor (Puricelli, 2003).

Tabla 2-13. Permeabilidad cualitativa y valor adoptado.

Roca	Permeabilidad cualitativa	Permeabilidad [mm/h]
Carbonatada	Media	4.167
Detrítica	Media baja	0.042
Detrítica	Media	4.167
Volcánica	Baja	0.042
Metadetritica	Media baja	0.417
Detrítica (Cuaternario)	Media	4.167
Detrítica (Cuaternario)	Baja	0.417

Finalmente, el mapa de percolación de la zona sur del Mar Menor se muestra en la Figura 2-18.

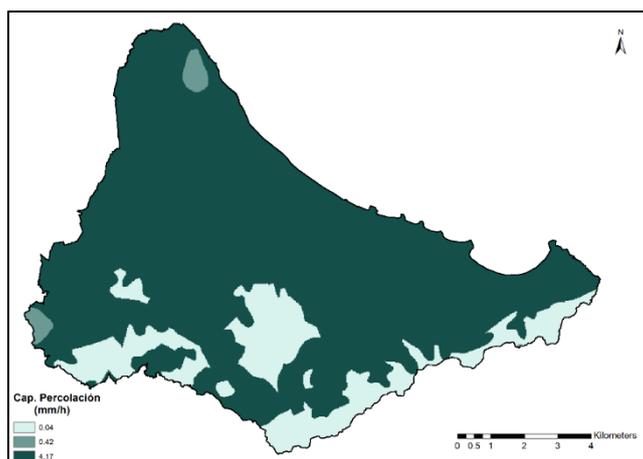


Figura 2-18. Mapa de capacidad de percolación.

2.2.2.7. Superficie de afloramiento de Cuaternario

Tal y como se ha comentado, únicamente el acuífero más superficial está conectado a la laguna, por lo tanto, ha sido necesario ubicar espacialmente los afloramientos de Cuaternario con el objetivo de diferenciar posteriormente la recarga de Cuaternario y la recarga del resto de acuíferos. Para ello se ha empleado el mapa geológico de España a escala 1:50,000 proporcionado por el IGME (2003). En la Figura 2-19 puede verse la zona de afloramientos de Cuaternario en la zona sur del Mar Menor.

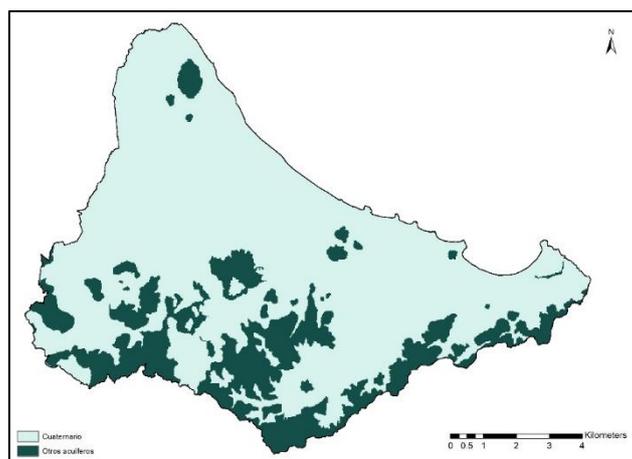


Figura 2-19. Superficie de afloramiento del acuífero Cuaternario.

2.2.2.8. Parámetros hidro-geomorfológicos

Los nueve parámetros de la onda cinemática geomorfológica empleados por el modelo se han obtenido de estudios realizados en cuencas similares (Vélez, 2001). En la Tabla 2-14 se muestran los valores adoptados.

Tabla 2-14. Parámetros hidro-geomorfológicos.

Parámetro	Valor
k	1.2968
φ	0.7571
c ₁	3.1301
ϵ_1	0.5088
ϵ_2	0.3253
cd	6.5156
θ	0.6548
cn	0.0470
ξ	0.1667

Además, se ha adoptado como área de ladera para el inicio de los cauces de cárcavas el valor de 0.0107 km².

2.2.2.9. Riego

La información referente a las zonas de riego y las dotaciones se ha obtenido del Anexo V del Anejo 3 del Plan Hidrológico de la Demarcación del Segura 2015/21: Usos y demandas, Fichas de caracterización de las unidades de demanda agraria (CHS, 2015). En la zona sur del Mar Menor concurren las unidades de demanda agraria: UDA57, resto Campo de Cartagena, regadío mixto de acuíferos, depuradas y desalinizadas, y UDA58, regadíos

redotados del TTS de la ZRT Campo de Cartagena. En la Tabla 2-15 se muestran los datos empleados para el cálculo de las dotaciones.

Tabla 2-15. Demandas y superficie de las unidades de demanda agraria de la zona sur del Mar Menor.

Unidad de demanda agraria	Superficie [Ha]	Demanda [Hm ³ /año]
UDA 57	16,582	87.25
UDA 58	19,259	131.8

De esta información, se han establecido cuatro zonas de riego en el modelo (Figura 2-20): zona de riego de la UDA 57 en cítricos (uso del suelo 9) y en cultivos de regadío (uso del suelo 8), y zona de riego de la UDA 58 en cítricos y en cultivos de regadío. Así mismo, los valores anuales se han distribuido de forma proporcional a la superficie, el factor de vegetación y la evapotranspiración potencial. Además, en ambas unidades de demanda agraria, el riego es por goteo y diario.

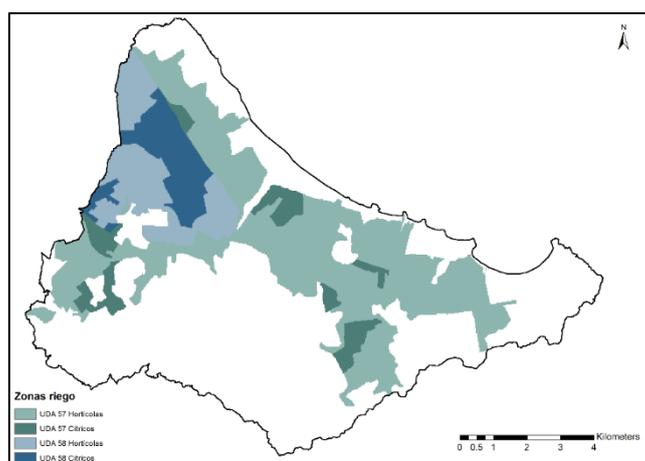


Figura 2-20. Zonas de riego establecidas para el modelo.

2.2.3. CICLO DE SEDIMENTOS

En este capítulo únicamente se describe la información necesaria para la implementación del modelo, ya que no se ha encontrado ningún estudio que aporte información acerca de mediciones de sedimentos en la zona sur del Mar Menor. Además, tampoco existen registros de series temporales de transporte de sedimentos en suspensión.

2.2.3.1. Parámetros del suelo

En primer lugar, es necesario caracterizar la granulometría de la zona sur del Mar Menor. Para ello el modelo emplea los mapas de contenido en arena, limo y arcilla (Figura 2-21). En este caso, se han empleado los mapas de la ESDB mencionados anteriormente (2.2.2.5 Parámetros del suelo).

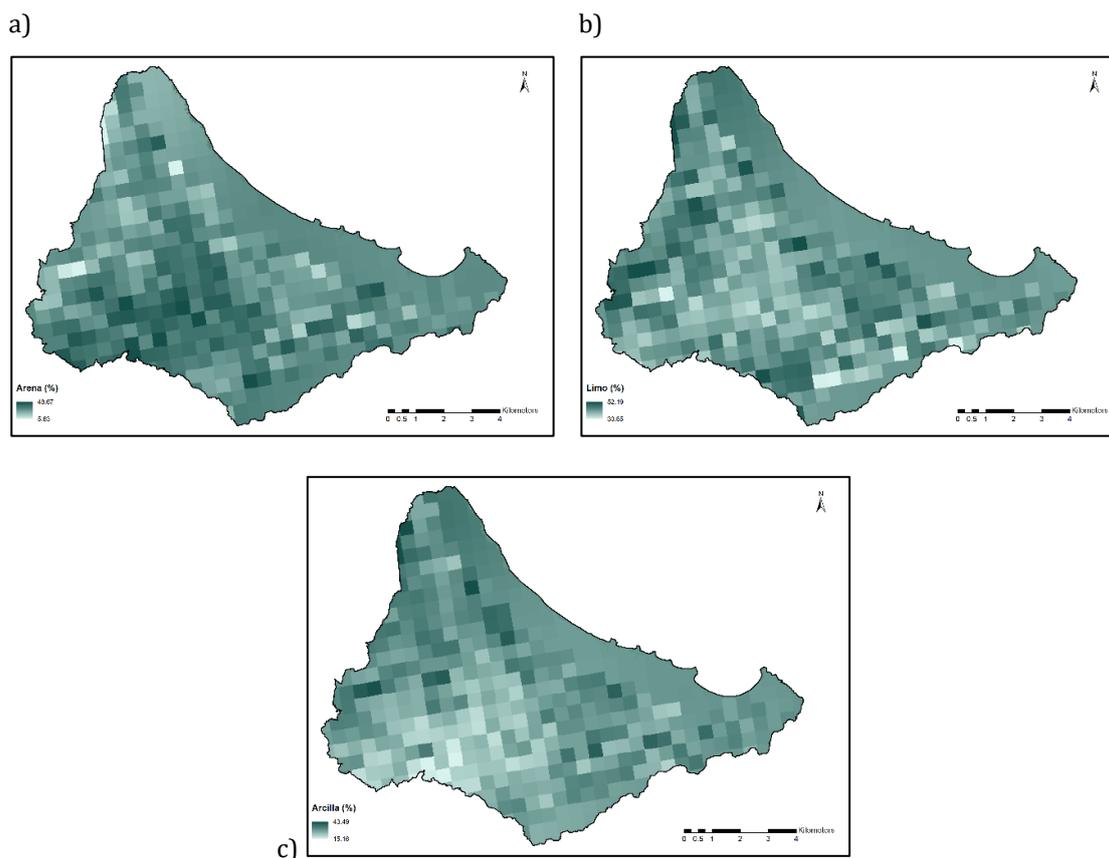


Figura 2-21. Mapas de contenido en arena (a), limo (b) y arcilla (c) del suelo.

2.2.3.2. Parámetros de la ecuación de la USLE

Además de los mapas que caracterizan granulométricamente la zona, el modelo TETIS emplea los parámetros K, C y P de la formulación de la Universal Soil Loss Equation (USLE) (Renard et al., 1994).

El factor de prácticas de conservación del suelo, factor P, se ha fijado en 1 para toda la zona sur del Mar Menor en situación actual, ya que en 2018 no se empleaban prácticas de conservación del suelo. El factor de cultivo, factor C (Figura 2-22b) deriva de los usos del suelo. Los valores asignados han sido adaptados a los usos del suelo de la zona según los

estudios llevados a cabo por Alatorre et al. (2010). Por último, el factor de erosionabilidad del suelo, factor K (Figura 2-22a), se ha calculado mediante la ecuación propuesta por Wischmeier y Smith (1978):

$$100K = [(2.1 \cdot 10^{-4} M^{1.14} (12 - MO) + 3.25 (s - 2) + 2.5 (p - 3))/100] 1.317$$

donde K es el factor de erosionabilidad del suelo ($t m^2 h ha^{-1} hJ^{-1} cm^{-1}$) M es el parámetro de textura de los 15 cm superficiales, MO es el contenido en materia orgánica (%), s es el parámetro de estructura y p es el parámetro de permeabilidad.

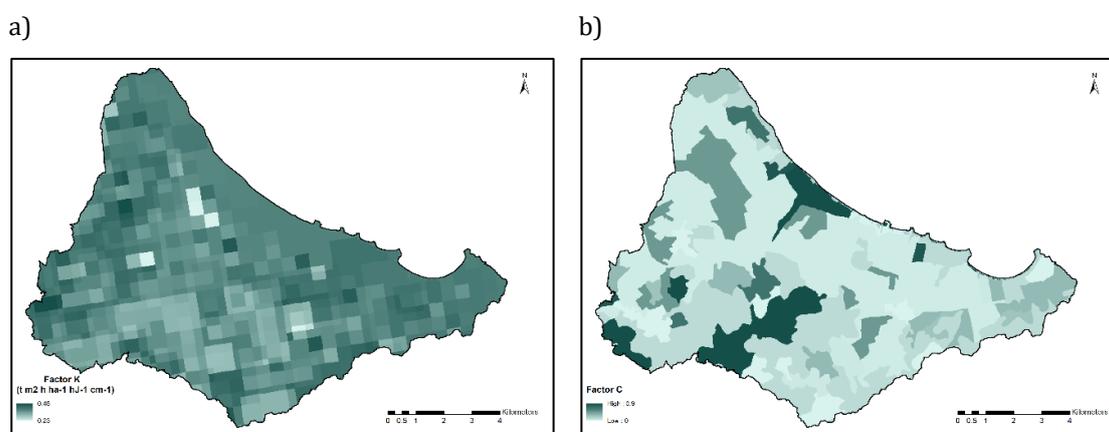


Figura 2-22. Mapas del factor K (a) y factor C (b) de la USLE.

2.2.4. CICLO DE NITRÓGENO

2.2.4.1. Contenido en nitrógeno orgánico del suelo

En el modelo TETIS el contenido de nitrógeno orgánico se considera un parámetro, ya que éste no cambia de forma significativa en los suelos. Éste se ha calculado a partir del mapa de la ESDB de contenido en materia orgánica del *dataset: European soil database derived data* (Hiederer, 2013). Conocido el porcentaje de materia orgánica, es posible calcular el contenido en carbono orgánico como:

$$C_{org} = \left(\frac{MO}{100}\right)/2$$

donde MO es el contenido en materia orgánica del suelo (%) y C_{org} es el contenido de carbono orgánico del suelo (kg_C/kg_{suelo}). Partiendo del contenido en carbono orgánico, es posible calcular el contenido en nitrógeno orgánico aplicando la relación C/N de los suelos. En el caso de suelos arables se ha considerado una relación C/N de 10 (usos 7-11), en el resto una

relación de 20 (Weil y Brady, 2017). Posteriormente se transforma a kg/m^3 con el mapa de densidad aparente del *dataset* de la ESDB: *Topsoil physical properties for Europe* (Ballabio et al., 2016). En la Figura 2-23 se muestra el mapa finalmente obtenido.

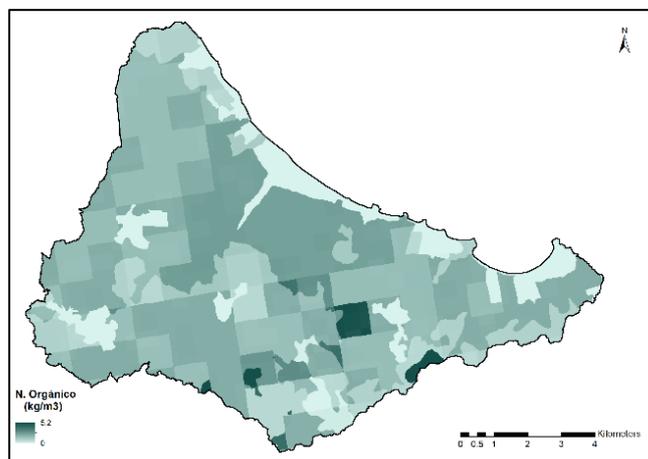


Figura 2-23. Mapa de contenido en nitrógeno orgánico del suelo.

2.2.4.2. Parámetros del suelo

Los mapas de parámetros necesarios para caracterizar el suelo en el caso del modelo del ciclo del nitrógeno son: la profundidad efectiva del suelo, el contenido de agua disponible en el punto de marchitez, la densidad aparente y el coeficiente de partición o distribución del suelo. La profundidad de suelo efectiva (Figura 2-24a) se calcula como:

$$P_{efect} = \min(P_{raíces}; ROO)$$

donde P_{efect} es la profundidad efectiva del suelo (m), $P_{raíces}$ es la profundidad de las raíces (m) y ROO es la profundidad del primer obstáculo para el desarrollo de raíces (m). Estos dos parámetros ya han sido descritos anteriormente (2.2.2.4 Parámetros derivados de los usos del suelo y 2.2.2.5 Parámetros del suelo, respectivamente). El contenido de agua disponible en el suelo al punto de marchitez (Figura 2-24b), también ha sido descrito previamente junto con la profundidad del primer obstáculo para el desarrollo de raíces, ya que es necesario para el cálculo del almacenamiento estático máximo. El valor de densidad aparente del suelo (Figura 2-24c), tal y como se ha descrito en el apartado anterior, se ha obtenido directamente de la ESDB, mientras que el valor del coeficiente de partición (Figura 2-24d) se ha calculado a partir del mapa de contenido en arcilla, ya que es un parámetro que depende del tipo de arcilla y de su contenido en el suelo. Para ello, se ha aplicado la relación de: 40% arcilla, $7 \text{ dm}^3/\text{kg}$.

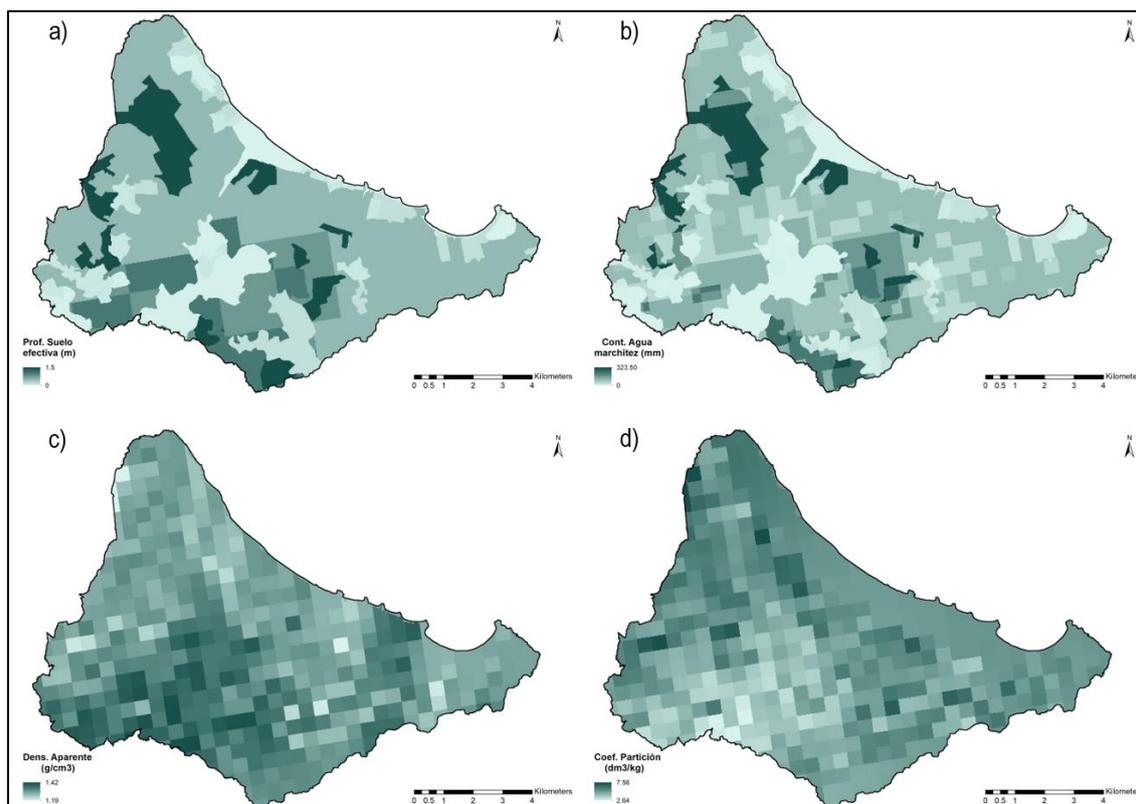


Figura 2-24. Mapa de profundidad efectiva (a), contenido de agua en el punto de marchitez (b), densidad aparente (c) y coeficiente de partición (d).

2.2.4.3. Factor de cubierta vegetal

En el caso del ciclo de nitrógeno, es necesario separar la fracción de agua que es evaporada de la que es transpirada por la vegetación. Para ello se emplea un factor de cubierta mensual. En la Tabla 2-16 se observan los valores adoptados para cada uno de los usos del suelo, salvo en el caso de los usos del suelo tierras de labor en secano (uso 7) y terrenos regados permanentemente (uso 8), ya que como se ha comentado anteriormente, en el caso de estos usos del suelo se ha empleado el submodelo de cultivos y el valor del factor de cubierta es calculado internamente por el modelo a partir de los parámetros que caracterizan cada uno de los cultivos.

Tabla 2-16. Valores mensuales del factor de cubierta según usos del suelo.

Uso	Ene.	Feb.	Mar.	Abril	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
4	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7

Uso	Ene.	Feb.	Mar.	Abril	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
6	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
10	0.1	0.1	0.6	0.7	0.8	0.95	0.95	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
11	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
12	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
13	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
14	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
17	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2.2.4.4. Parámetros de los usos del suelo en modo cultivos

En el caso de los usos del suelo en modo cultivos, además de los datos anteriores, es necesario recopilar la información referente a los cultivos. En este caso, los usos del suelo que funcionan en modo cultivos son: tierras de labor en secano, cuyo cultivo es la cebada (uso 7) y terrenos regados permanentemente (uso 8), en el que se ha considerado una rotación de tres cultivos: brócoli, melón, y lechuga. En la Tabla 2-17 se han recogido los parámetros necesarios para caracterizar cada uno de los cultivos: día de plantación, día de cosecha, peso seco en plantación (W_{plant}), peso seco esperado en cosecha (W_{cose}), factor de cubierta en plantación (fc_{plant}), factor de cubierta esperado en cosecha (fc_{cose}), temperatura base, coeficientes A y B y preferencia de NO_3 .

Los parámetros de temperatura base, A y B se han obtenido inicialmente de Rahn et al. (2010) y se han calibrado para adaptarlos a las características de los cultivos de la zona. Los parámetros de peso seco en cosecha se han obtenido de López et al. (2005) y López (2010) en el caso de la cebada, de Rincon et al. (1999) y Subbarao y Hubbard (1999) para el brócoli, de Gallardo et al. (2011) para el caso del melón y de Suárez-Rey et al. (2016) y Yorio et al. (2001) en el caso de la lechuga.

Tabla 2-17. Parámetros de los usos del suelo en modo cultivos.

Cultivo	Día Plant.	Día Cose.	W_{plant} [t/ha]	W_{cose} [t/ha]	fc_{plant}	fc_{cose}	Temp Base [°C]	A	B	Pref. NO_3
Cebada	60	189	0.001	2.2	0.05	0.95	4	1.35	3	1
Brócoli	1	120	0.02	8.68	0.02	0.95	1	2.4	0.6	1
Melón	152	243	0.2	1.031	0.05	0.9	7	2.48	5	1

Cultivo	Día Plant.	Día Cose.	W_{plant} [t/ha]	W_{cose} [t/ha]	fc_{plant}	fc_{cose}	Temp Base [°C]	A	B	Pref. NO ₃
Lechuga	274	365	0.05	3.281	0.05	0.9	7	2.6	1.1	1

2.2.4.5. Información input para el ciclo del N

A continuación, se describe la información de entrada relativa al ciclo de nitrógeno: dosis de abonado y deposición atmosférica.

Dosis de abonado

De los 18 usos del suelo, tres son abonados: instalaciones deportivas y recreativas (uso 6), que se trata de un campo de golf, terrenos regados permanentemente (uso 8) y árboles frutales (uso 9). El uso del suelo 7, tierras de labor en seco, en el modelo no se ha considerado a pesar de abonarse, ya que la plantación de cebada depende de lo húmedo que sea el año, pudiendo llegar a no sembrarse. Para evitar en el modelo que este abono se pierda por percolación y obtener resultados erróneos, no se ha introducido ningún input de nitrógeno por abono.

En el caso de los usos del suelo 6 y 9, los valores son mensuales (Tabla 2-18 en forma amoniacal y Tabla 2-19 en forma nítrica). Los primeros se han obtenido de la consulta con expertos en la materia, mientras que los segundos se han obtenido del Programa orientativo mensual de fertilización del Sistema de Información Agrario de Murcia (Soria, 2008) y de Lidón et al. (2013).

Tabla 2-18. Dosis de abonado mensuales en forma de amonio de los usos del suelo 6 y 9 [kgN/ha/mes].

Uso	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept	Oct.	Nov.	Dic.
6	0.25	0.25	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	0.25	0.25
9	0	0	13.4	27.4	27.3	22.1	7.8	8.9	27.3	3.4	0	0

Tabla 2-19. Dosis de abonado mensuales en forma de nitrato de los usos del suelo 6 y 9 [kgN/ha/mes].

Uso	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept	Oct.	Nov.	Dic.
6	0.06	0.06	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	0.06	0.06
9	0	0	10.9	22.4	22.3	18.1	6.4	7.3	22.3	2.8	0	0

En el caso del uso del suelo 8, al funcionar en modo cultivos, el valor es diario y no mensual. En la Figura 2-25 se observa la variación de la dosis de abonado a lo largo del año. Los valores totales se han obtenido de la *Guía: práctica de la fertilización racional de los cultivos en España* (Ramos y Pomares, 2010) y se han adaptado a la etapa de crecimiento de los

cultivos. Los valores totales adoptados para cada uno de los cultivos han sido: 250 kgN/ha, 130 kgN/ha y 130 kgN/ha para brócoli, melón y lechuga respectivamente. Con una distribución: 50% en forma de amonio, 50% en forma de nitrato en el caso del brócoli y el melón; y 55% en forma de amonio, 45% en forma de nitrato en el caso de la lechuga.

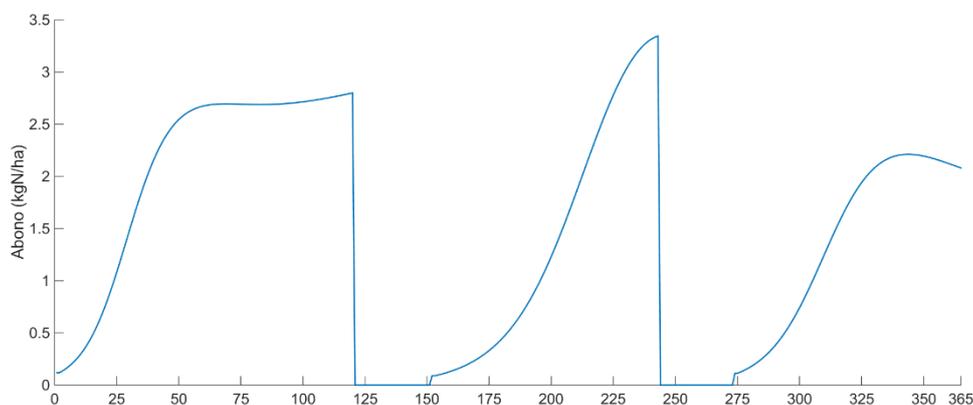


Figura 2-25. Valores diarios de las dosis de fertilizantes para el uso del suelo 8.

En ninguno de los casos se ha tenido en cuenta la concentración de nitrógeno del agua de riego, ya que se desconoce y a efectos del modelo es indiferente que la entrada se realice por separado o de forma conjunta.

Deposición atmosférica

Dada la ausencia de mediciones de deposición atmosférica en la zona, se ha recurrido a estudios realizados por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). Según García-Gómez et al. (2014), el valor de nitrógeno total para la zona sur del Mar Menor está comprendido entre 7.5 y 10 kgN/ha/año. Además, se diferencia entre deposición húmeda de NO_2+NO_3 y deposición húmeda de NH_3 , con una relación 3:1. A efectos del modelo, NO_2+NO_3 se ha considerado deposición en forma de nitrato, mientras que NH_3 , deposición en forma de amonio. A partir de estos valores, y considerando que la deposición seca sigue la misma relación 3:1, se han establecido unos valores constantes de deposición atmosférica de: 3 kgN/ha/año en forma de amonio y 6 kgN/ha/año en forma de nitrato, sin distinguir entre deposición húmeda y deposición seca.

2.2.5. Modelo TETIS utilizado

Para este estudio se ha adoptado la calibración realizada anteriormente (Puertes et al 2021) para todas las cuencas del sur del Mar Menor. La discretización espacial son 5 metros y la escala temporal adoptada es diaria.

Como se explica en el anexo 2 de descripción del modelo TETIS, los parámetros a calibrar son en buena parte factores correctores (FC) de los mapas de parámetros. Los parámetros globales y los FCs calibrados para agua, sedimentos y nitrógeno, son los siguientes:

Tabla 2-20. Factores correctores hidrológicos.

Código TETIS	Parámetro	Valor
FC-1	Almacenamiento estático	1
FC-2	Evapotranspiración	1.2
FC-3	Infiltración gravitacional	0.123
FC-4	Escorrentía directa	1
FC-5	Percolación	1
FC-6	Flujo subsuperficial	300
FC-7*	Flujo subterráneo profundo	infinito
FC-8*	Flujo subterráneo conectado	0
FC-9	Velocidad de flujo en cauces	1

*Valores ficticios para desconectar el flujo subterráneo.

Tabla 2-21. Factores correctores transporte sedimentos.

Código TETIS	Parámetro	Valor
FCSed-1	Capacidad de transporte en laderas	0.097
FCSed-2	Capacidad de transporte en cárcavas	1
FCSed-3	Capacidad de transporte en cauce	1

Tabla 2-22. Parámetros del ciclo del N en cauce.

Parámetro	Unidades	Valor
Tasa de nitrificación	día ⁻¹	0
Tasa de desnitrificación	día ⁻¹	0

Tabla 2-23. Coeficientes de distribución de NH₄⁺.

Parámetro	Unidades	Valor
Factor corrector coeficiente de distribución NH₄⁺	[-]	0.6
Máxima diferencia de temperatura	°C	10
Constante de corrección de temperatura	[-]	1.047
Temperatura Óptima	°C	20

Tabla 2-24. Parámetros del ciclo del N en el suelo-vegetación.

Uso del Suelo	Tasa Mineralización	Tasa Inmovilización	Tasa Volatilización	Tasa Nitrificación	Tasa Desnitrificación	Coefficiente de Difusión	Demanda potencial de N	Preferencia de No3
	día ⁻¹	día ⁻¹	día ⁻¹	día ⁻¹	día ⁻¹	m día ⁻¹	kgN ha ⁻¹ año ⁻¹	[-]
Tejido urbano continuo	0	0	0	0	0	0	0	0
Tejido urbano discontinuo	0.00008	0.02	0	0.05	0.001	0.1	7	0.5
Zonas de extracción minera	0.00003	0.02	0	0.1	0.001	0.1	3	0.5
Escombreras y vertederos	0.000028	0.02	0	0.1	0.001	0.1	2.5	0.5
Zonas en construcción	0.00008	0.02	0	0.1	0.001	0.1	10	0.5
Instalaciones deportivas y recreativas	0.0001	0.02	0	0.5	0.001	0.1	225	0.5
Tierras de labor en seco	0.0001	0.02	0	0.5	0.001	0.2	75	1
Terrenos regados permanentemente	0.0001	0.02	0	0.8	0.001	0.2	460	1
Árboles frutales	0.0001	0.02	0	0.6	0.001	0.1	250	1
Mosaico de cultivos	0.0001	0.02	0	0.3	0.001	0.1	40	1
Terrenos principalmente agrícolas pero con importantes espacios de vegetación natural	0.0001	0.02	0	0.5	0.001	0.2	33	1
Bosque de coníferas	0.000082	0.01	0	0.25	0.001	0.2	47	0.5
Vegetación esclerófila	0.000081	0.02	0	0.05	0.001	0.1	19	0.5
Matorral boscoso de transición	0.000082	0.02	0	0.05	0.001	0.1	24	0.5
Playas, dunas y arenales	0	0	0	0	0	0	0	0
Espacios de vegetación escasa	0.00007	0.02	0	0.05	0.001	0.15	8	0.5
Marismas	0.000028	0.02	0	0.05	0.001	0.1	10	0.5

2.3. IDENTIFICACIÓN DE ZONAS AFECTADAS

La identificación de zonas afectadas se realiza para los escenarios de ARN y COAG, debido a que representan medidas localizadas que no afectan de forma global a la zona aportante sur.

2.3.1. CUENCAS AFECTADAS POR ESCENARIOS ARN

Debido a la diferencia de extensión de los escenarios ARN General (6.95 km²) y ARN Prioritaria (1.68 km²), se observa una diferencia en la cantidad y porcentaje de afecciones. Dado que muchas de estas afectaciones corresponden a microcuencas costeras, los análisis se enfocarán en aquellas que posean un área mayor a 1 km² y una superficie afectada de ARN de al menos un 5%. Estas áreas se encuentran detalladas en la Tabla 2-25 y esquematizadas en la Figura 2-26.

Tabla 2-25. Principales cuencas afectadas por las ARN.

Cuenca	Área total cuenca [km2]	ARN General		ARN Prioritaria	
		Área afección [km2]	% de afección	Área afección [km2]	% de afección
Cuenca 14	3.08	0.45	15%	0.26	8%
Cuenca 19	1.05	0.19	18%	0.11	10%
Cuenca 33	1.86	0.47	25%	0.08	4%
Cuenca 43	2.52	1.02	40%	0.16	6%
Cuenca 58	6.82	1.74	26%	0.25	4%
Cuenca 64	1.08	0.22	20%	0.00	0%

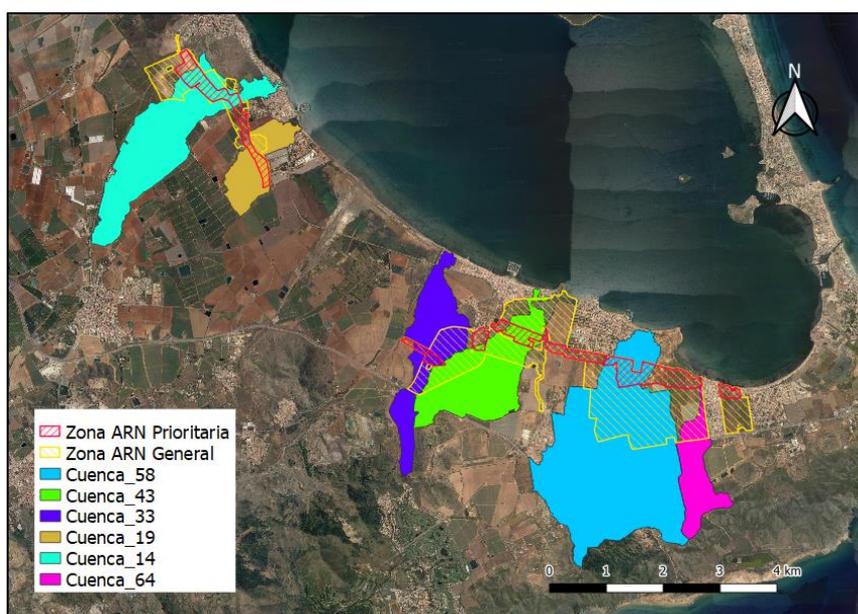


Figura 2-26. Esquema de la afección en cuencas de las ARN.

2.3.2. CUENCAS AFECTADAS POR ESCENARIOS COAG

Para considerar las cuencas afectadas por los escenarios COAG se utiliza el mismo criterio de las ARN, es decir, sólo aquellas cuencas que posean un área mayor a 1 km² y una superficie afectada al menos de un 5%. Estas cuencas se encuentran esquematizadas en la Figura 2-27 y listadas en la Tabla 2-26:

Tabla 2-26. Cuencas afectadas por los embalses COAG.

Cuenca	Área total cuenca [km2]	Área afección [km2]	% de afección
Cuenca 33	1.86	1.75	94.1%
Cuenca 43	2.52	2.47	98.2%
Cuenca 58	6.82	6.46	94.8%

La cuenca 37, que está afectada por los embalses 1 y 2, queda excluida de la zona de estudio por tener menos de 1 km².

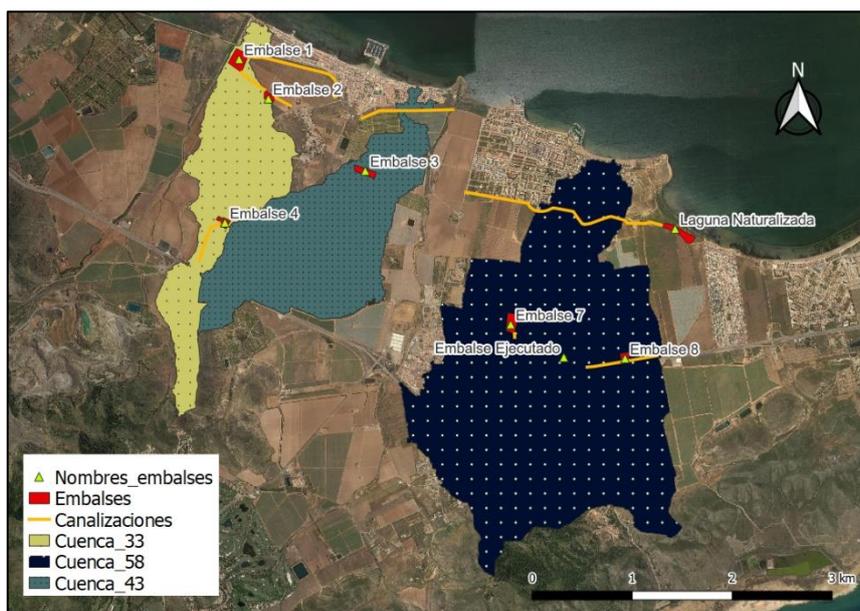


Figura 2-27. Cuencas afectadas por los escenarios COAG.

2.4. PARAMETRIZACIÓN DE ESCENARIOS

2.4.1. MODIFICACIONES ESCENARIOS ARN

Como ya se ha explicado anteriormente, se definen dos áreas de cobertura y modelación de ARN, sobre las cuales se aplicarán las modificaciones de mapas de parámetros: una de mayor extensión llamada “ARN General” y otra de menor extensión llamada “ARN Prioritaria”. Estas áreas, en las que se van a modificar los parámetros afectados, se presentan en la Figura 2-6

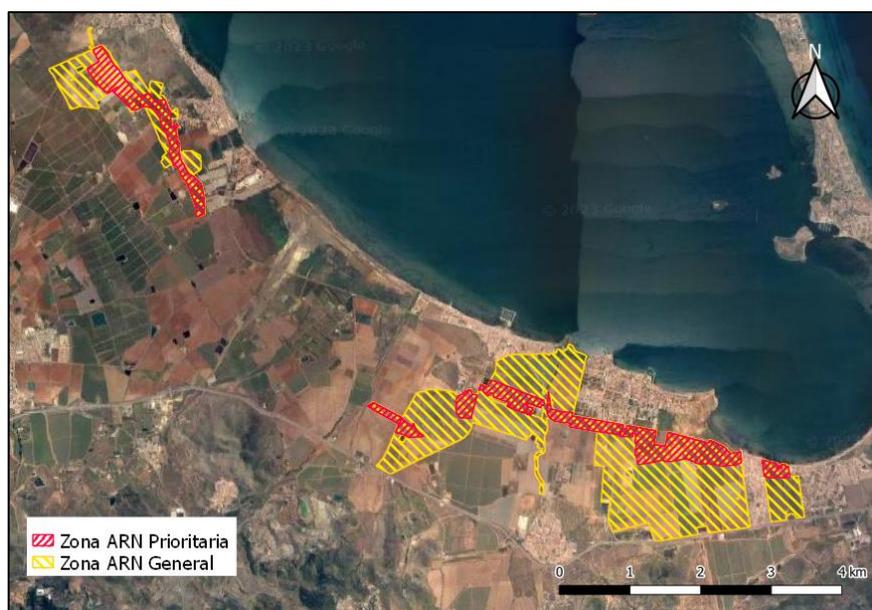


Figura 2-28 Sub-Escenarios ARN: Prioritario y General.

Se considera que las modificaciones que introducen las ARN afectan sólo a la superficie del terreno (laderas en la terminología de TETIS) y no a los cauces. El tamaño de las laderas se parametriza en TETIS con el área de inicio de los cauces de cárcavas, que se ha estimado en 0.0107 km^2 (aproximadamente 1 ha).

2.4.1.1. Ciclo hidrológico

Se añade un nuevo uso de suelo llamado “ARN” sobre el cual se asociarán el resto de los parámetros, asignado al nº13 en TETIS.

En la parametrización de los aterrizados de los escenarios ARN se establecen los valores mínimos para el mapa de pendientes y mapa de velocidades:

- Mapa de velocidades: 0.02 m/s
- Mapa de pendientes: 0.0002 m/m

El cambio de vegetación y pendiente afecta directamente al almacenamiento estático, y se requerirá una nueva parametrización de sus componentes.

- Profundidad de raíces: La vegetación de las ARN consideran especies vegetales propias del lugar, como algarrobos, artales, cornicabrales u olivos. Estos últimos, por tener la mayor profundidad de raíces, se utilizan como referencia para definir el valor de 200cm
- Almacenamiento en charcos: En función de la nueva pendiente se adopta el valor de 6mm
- Coeficiente de vegetación: La distribución mensual del coeficiente de vegetación para las ARN se indica en la Tabla 2-27.

Tabla 2-27 .Factor de vegetación mensual en las ARN.

Uso del Suelo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
ARN	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

- Intercepción: La intercepción por vegetación se adopta un valor de 5mm

2.4.1.2. Ciclo de sedimentos

Según lo desarrollado en el apartado 2.2.3.2 sobre los parámetros de la ecuación de la USLE, la modificación del uso de suelo afecta al factor de cobertura, adoptándose Factor C = 0.04.

Para la modelización del Factor P se ha empleado la metodología propuesta por Blanco y Lal (2008); aplicada por López-Vicente y Navas (2009) y Panagos et al. (2015):

$$P = P_c P_{sw} P_{vm}$$

donde P es el factor P final, P_c es el subfactor P de prácticas de conservación del suelo, P_{sw} es el subfactor P de muros de piedra (stone walls) y P_{vm} es el subfactor P de estructuras vegetales (vegetation margins).

Tabla 2-28. Obtención del valor del Factor P en las ARN.

Uso del Suelo	Pc	Psw	Pvm	P
ARN	1	0.35	0.3	0.105

Para el subfactor P_c se adopta un valor de 1 al no existir cultivos. Para el subfactor de P_{sw} se considera un valor de 0.35 al existir muros de piedra en la zona sur del Mar Menor (Pangaos et al 2015) y P_{vm} , se considera un valor de 0.3 que corresponde a barreras vegetales densas en los bordes de las ARN (Pangaos et al 2015). El resultado es un factor P de 0.105.

2.4.1.3. Ciclo de nitrógeno

Como se indicó anteriormente, en el ciclo de nitrógeno, es necesario separar la fracción de agua que es evaporada de la que es transpirada por la vegetación. Para las ARN se considera la siguiente distribución de Factores de Cubierta.

Tabla 2-29. Factor de cubierta mensual ARN.

Uso del Suelo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
ARN	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

Con respecto a los factores de calibración de N definidos en la Tabla 2-30, se adoptan los indicados en la Tabla 2-30 para la representación de las ARN.

Tabla 2-30. Parámetros de N para ARN.

Uso del Suelo	Tasa Miner.	Tasa Inm.	Tasa Volat.	Tasa Nitrif.	Tasa Desnit.	Coef Difusión	Dem poten. N	Pref No3
	día ⁻¹	m día ⁻¹	kgN/(ha año)	[-]				
ARN	8.1E-05	0.02	0	0.05	0.001	0.1	19	0.5

2.4.2. MODIFICACIONES ESCENARIOS COAG

Para los canales de intercepción de escorrentía no se ha modificado ni el MED ni sus derivados, de forma que se mantiene la topología de la zona de estudio. En su lugar, se han considerado múltiples embalses virtuales (EV) que interceptan la sumatoria de escorrentías aportantes a los embalses reales. En la Figura 2-29 se muestran los EV y los Embalses proyectados por COAG.

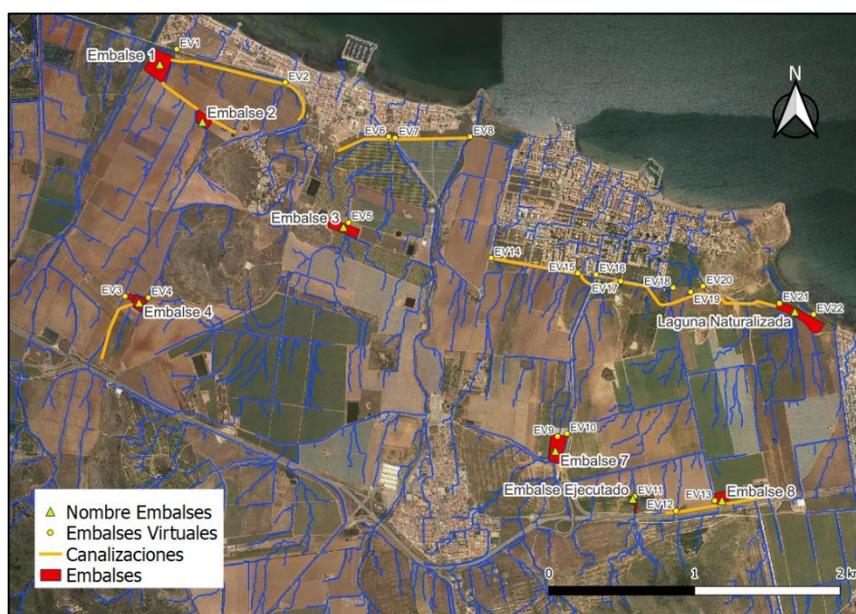


Figura 2-29. Esquema de embalses COAG.

Las escorrentías interceptadas por los embalses reales será la sumatoria de los Embalses Virtuales (EV) definidos en cada caso. Las coordenadas de cada EV se indican en la tabla siguiente:

Tabla 2-31. Ubicación de los EV y embalses representados.

Embalse	Embalse Virtual	E	N
Embalse 1	EV1	694297.451	4169527.7
	EV2	695042.484	4169297.53
Embalse 4	EV3	693942.414	4167817.76
	EV4	694102.502	4167808.36
Embalse 3	EV5	695477.379	4168327.48
Carrasquilla	EV6	695752.559	4168922.61
	EV7	695797.53	4168912.54
	EV8	696312.342	4168922.45
Embalse 7	EV9	696912.731	4166847.59
	EV10	696977.354	4166867.23
Embalse ejecutado	EV11	697442.812	4166432.29
Embalse 8	EV12	697727.375	4166332.32
	EV13	697992.383	4166402.83
Laguna Natural	EV14	696457.292	4168082.89
	EV15	697052.811	4167977.73
	EV16	697177.464	4167967.66
	EV17	697347.613	4167922.58
	EV18	697707.516	4167877.59
	EV19	697827.488	4167847.52
	EV20	697912.524	4167887.82
	EV21	698437.532	4167768.48
	EV22	698672.536	4167692.36

Cabe mencionar que para este escenario se mantienen todos los parámetros globales y mapas de parámetros según el escenario base (actual).

2.4.3. MODIFICACIONES ESCENARIO BUFFER

2.4.3.1. Ciclo hidrológico

Se generan 4 nuevos usos de suelos:

- Ex suelo cultivo (para la zona entre 0m y 500m donde se eliminan cultivos).
- Barreras vegetales (para la zona 500m a 1500m).
- Hortícola melón-lechuga (para la zona 500m a 1500m).
- Cítricos fertilización restringida (para la zona 500m a 1500m).

Para las barreras vegetales, algunos parámetros tomarán como referencia lo calculado anteriormente con las ARN, debido a su similitud en vegetación. Los valores medios adoptados se indican a continuación:

- Almacenamiento estático “Hu”: 263.23mm
- Punto marchitez permanente “Hlim”: 402.96mm
- Profundidad efectiva “P_efectiva”: 2m
- Intercepción: 5mm
- Coeficiente de vegetación: La distribución mensual del coeficiente de vegetación para las barreras vegetales se indica en la Tabla 2-32

Tabla 2-32 .Factor de vegetación mensual barreras vegetales - Buffer.

Uso del Suelo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Barrera vegetal	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

- Factor de cubierta: La distribución mensual del coeficiente de vegetación para las barreras vegetales se indica en la Tabla 2-33

Tabla 2-33 . Factor de cubierta mensual barreras vegetales - Buffer.

Uso del Suelo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Barrera vegetal	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9

Con respecto a los cambios de uso de suelo, se elimina el riego para “ex suelo cultivo” (al eliminar hortícolas y cebada). En aquellas rotaciones donde algún cultivo se elimine (brócoli) se eliminará el riego asociado a ese cultivo.

2.4.3.2. Ciclo de sedimentos

Considerando la aplicación de la técnica de cultivo siguiendo las líneas de nivel, es necesaria una modificación del *Factor P* (USLE), siguiendo los criterios de Panagos et al. (2015) como se indica en la Tabla 2-34. El *Factor C* para los nuevos usos del suelo “ex suelo cultivo” y “barreras vegetales” adoptan un valor de 0.12 y 0.04 respectivamente.

Tabla 2-34 Factor P - Buffer

Uso del Suelo	Pc	Psw	Pvm	P
Barrera vegetal	1	1	0.3	0.3
Cítricos y hortícolas	0.5	1	0.09	0.45

2.4.3.3. Ciclo de nitrógeno

La fertilización en el caso de los cítricos se redujo a 170 kgN ha⁻¹ año⁻¹. En el caso de los hortícolas, se eliminó el cultivo del brócoli de la rotación por ser el que más fertilizante necesita para su desarrollo y se ajustó el máximo anual para la combinación de lechuga y melón a 170 kgN ha⁻¹ año⁻¹. (85 kgN ha⁻¹ año⁻¹ cada uno).

2.4.4. MODIFICACIONES ESCENARIO AGRICULTURA DE PRECISIÓN

2.4.4.1. Ciclo hidrológico

Se generan 4 nuevos usos de suelos:

- Barreras vegetales (hortícolas/cebada).
- Barreras vegetales (cítricos).
- Hortícola melón-lechuga.
- Hortícola brócoli-melón.

Para las *barreras vegetales*, algunos parámetros tomarán como referencia lo calculado anteriormente con las ARN, debido a su similitud en vegetación. Los valores medios adoptados se indican Tabla 2-35:

Tabla 2-35 Valores adoptados Agricultura Precisión.

Elemento	Barrera vegetal hortícolas/cebada	Barrera vegetal cítricos
Hu	263.23	138.62
Hlim	402.96	109.99

Elemento	Barrera vegetal hortícolas/cebada	Barrera vegetal cítricos
P_efectiva	2	0.7

- Intercepción: 5mm

La distribución mensual del *coeficiente de vegetación* y del *factor de cubierta* para las barreras vegetales se mantiene igual al escenario Buffer, indicado en la Tabla 2-32 y Tabla 2-33 respectivamente. En aquellas rotaciones donde algún cultivo se elimine, se eliminará el riego asociado a ese cultivo

2.4.4.2. Ciclo de sedimentos

Considerando la aplicación de la técnica de cultivo siguiendo las líneas de nivel, es necesaria una modificación del *Factor P* (USLE), siguiendo los criterios de Panagos et al. (2015) como se indica en la Tabla 2-34. El *Factor C* de los nuevos usos del suelo “ex suelo cultivo” y “barreras vegetales” adoptan un valor de 0.12 y 0.04 respectivamente.

Tabla 2-36 Factor P - Buffer.

Uso del Suelo	Pc	Psw	Pvm	P
Barrera vegetal	1	1	0.3	0.3
Cítricos y hortícolas	0.5	1	0.09	0.45

2.4.4.3. Ciclo de nitrógeno

La agricultura de precisión se representó mediante el ajuste de las dosis de fertilizantes correspondientes a los cítricos y los hortícolas en función a un simple balance de masas suelo/planta, tal y como se describe en CARM (2017).

- Cítricos: 238 kgN ha⁻¹ año⁻¹.
- Hortícola brócoli: 190 kgN ha⁻¹ año⁻¹.
- Hortícola melón: 98 kgN ha⁻¹ año⁻¹.
- Hortícola lechuga: 105 kgN ha⁻¹ año⁻¹.

2.4.5. MODIFICACIONES ESCENARIO LEY 3/2020

Este escenario corresponde a la combinación de Buffer y Agricultura de Precisión. Los parámetros *hidrológicos*, de *sedimentos* y *nitrógeno* definidos en el escenario de buffer son

válidos entre 0m y 1500m. Para el resto de la zona aportante sur se consideran los parámetros definidos en el escenario Agricultura de precisión.

2.5. RESULTADOS DESAGREGADOS

En este capítulo se consideran los resultados de los escenarios de ARN y COAG que, al afectar a una fracción de toda la zona de estudio, se desagregan del total. Por lo tanto, los resultados generales de la zona de estudio modelados con TETIS son desagregados las cuencas que están afectadas significativamente por las ARN y/o embalses COAG.

Se analizan los resultados de esorrentía, sedimentos y nitrógeno aportantes al Mar Menor para las cuencas 14, 19, 33, 43, 58 y 64 y para los siguientes escenarios:

- Situación Actual (Escenario Base)
- Escenarios ARN (general y prioritario)
- Escenarios COAG (con y sin vaciado)

2.5.1. SITUACIÓN ACTUAL

En la Figura 2-30 se muestra en forma de diagrama el balance anual hidrológico medio de la zona de estudio en situación actual. Con unas entradas por riego y precipitación de 551 mm, prácticamente todo el volumen de agua es evapotranspirado (90% en términos relativos). Del excedente, 31 mm percolan hasta los acuíferos, presentado el acuífero Cuaternario una recarga media anual de 28 mm y 3 mm el resto de acuíferos (no conectados con el Mar Menor) a través de sus afloramientos en superficie. Finalmente, las entradas al Mar Menor suponen 25 mm en forma de esorrentía superficial.

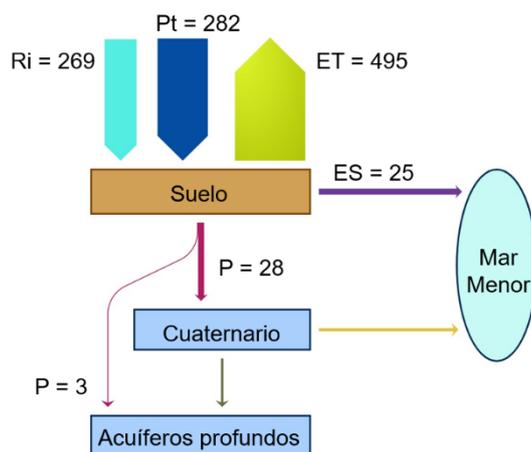


Figura 2-30. Balance hidrológico de la zona de estudio en situación actual (mm/año).

El balance de sedimentos medio anual en la zona de estudio es el que se muestra en la Tabla 2-37. De la tasa de erosión, el 46% llega al Mar Menor junto con la esorrentía superficial,

fundamentalmente en los episodios más importantes de crecidas. Un poco más de la mitad de los sedimentos erosionados (2,002 m³) son depositados aguas abajo sin llegar a la laguna.

Tabla 2-37. Resultados medios anuales de la zona de estudio en situación actual. Ciclo de sedimentos.

Erosión	6.00 t/ha
	3,713 m ³
Aporte de sedimentos al Mar Menor	2,76 t/ha
	1,711 m ³

En la Figura 2-31 se muestra el balance anual de nitrógeno medio en la zona de estudio en situación actual. El input principal de nitrógeno son los fertilizantes que se emplean en la zona agrícola. De los 323 kgN/ha, un 95% es asimilado por la vegetación. Aun así, durante los eventos de precipitaciones, 1.3 kgN/ha llegan a la laguna con el flujo de escorrentía superficial y 16kgN/ha percolan hasta los acuíferos.

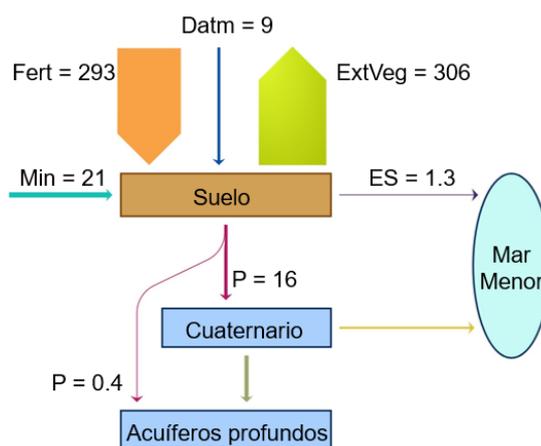


Figura 2-31. Balance nitrógeno medio anual de la zona de estudio en situación actual (kgN/ha/año).

Por último, las tablas Tabla 2-38 y

Tabla 2-39 recogen todos los flujos medios anuales de agua, sedimentos y N para cada una de las cuencas analizadas.

Tabla 2-38. Resultados medios anuales por cuencas de la situación actual. Ciclo del agua y sedimentos.

Cuenca	Área [km ²]	Precipitación [mm]	Riego [mm]	ET [mm]	Escorrentía superficial [mm]	Recarga Cuaternario [mm]	Recarga otros acuíf. [mm]	Sedimentos [T/ha]
14	3.08	280.85	302.98	546.12	14.82	19.12	3.53	1.71
19	1.05	281.32	407.35	622.48	25.60	40.08	0	1.85
33	1.86	281.32	326.47	556.96	23.99	24.73	1.69	1.43

Cuenca	Área [km ²]	Precipitación [mm]	Riego [mm]	ET [mm]	Escorrentía superficial [mm]	Recarga Cuaternario [mm]	Recarga otros acuíf. [mm]	Sedimentos [T/ha]
43	2.52	281.32	365.07	600.68	18.16	25.72	1.30	1.60
58	6.82	281.97	177.79	394.56	30.78	30.83	3.40	4.12
64	1.08	282.47	290.29	511.89	29.46	28.79	2.26	3.10

Tabla 2-39. Resultados medios anuales por cuencas de la situación actual. Ciclo del nitrógeno.

Cuenca	Área [km ²]	Abono [kgN/ha]	Deposición atm. [kgN/ha]	Asimilación vegetal [kgN/ha]	Mineralización [kgN/ha]	N escorrentía [kgN/ha]	N recarga Cuaternario [kgN/ha]	N recarga otros acuíf. [kgN/ha]
14	3.08	321.91	9.05	341.87	22.22	0.88	9.15	1.28
19	1.05	446.36	9.05	453.73	25.64	0.98	26.35	0
33	1.86	354.49	9.05	371.58	27.15	0.99	17.97	0.15
43	2.52	411.90	9.05	426.67	26.42	1.02	19.12	0.57
58	6.82	192.94	9.05	202.29	17.13	1.64	15.05	0.14
64	1.08	316.50	9.05	320.75	17.68	2.38	19.40	0.70

2.5.2. ARN GENERAL

En la Figura 2-32 se muestra en forma de diagrama el balance anual hidrológico medio de la zona de estudio para el escenario ARN General. Con unas entradas por riego y precipitación de 456 mm, prácticamente todo el volumen de agua es evapotranspirado (91% en términos relativos). Del excedente, 22 mm percolan hasta los acuíferos, presentando el acuífero Cuaternario una recarga media anual de 20 mm, y sólo de 2 mm para el resto de acuíferos a través de sus afloramientos en superficie. Finalmente, las entradas al Mar Menor suponen 19 mm en forma de escorrentía superficial.

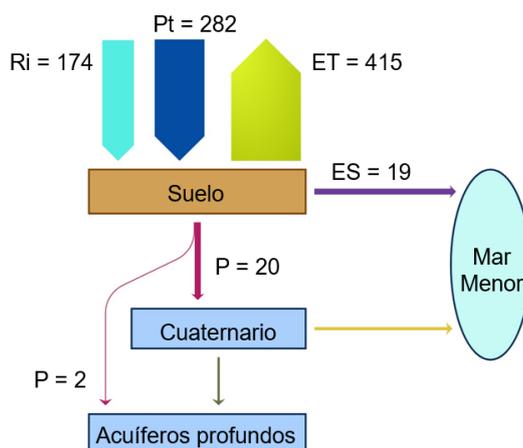


Figura 2-32. Balance hidrológico de la zona de estudio para el escenario ARN General (mm/año).

En lo que respecta al balance de sedimentos medio anual en la zona de estudio, éste se muestra en la Tabla 2-40. De la tasa de erosión anual, el 45% llega al Mar Menor en forma de escorrentía. Un poco más de la mitad de los sedimentos erosionados ($1,682\text{m}^3$) son depositados aguas abajo sin llegar a la laguna.

Tabla 2-40. Resultados medios anuales de la zona de estudio para el escenario ARN General. Ciclo de sedimentos.

Erosión	4.94 t/ha
	3,056 m ³
Aporte de sedimentos al Mar Menor	2.22 t/ha
	1,374 m ³

En la Figura 2-33 se muestra el balance anual de nitrógeno medio de la zona de estudio para el escenario ARN General. El input principal de nitrógeno son los fertilizantes que se emplean en la zona agrícola. De los 217 kgN/ha totales aportados anualmente desde diversas fuentes, un 94% es asimilado por la vegetación, aun así, durante los eventos de precipitaciones 1 kgN/ha llegan a la laguna con el flujo de escorrentía superficial y 10 kgN/ha percolan hasta los acuíferos.

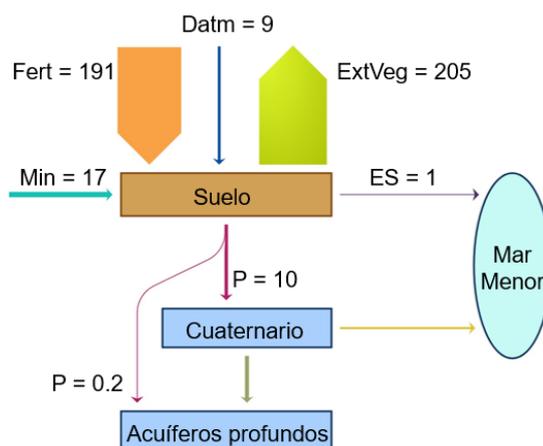


Figura 2-33. Balance nitrógeno medio anual de la zona de estudio para el escenario ARN General [kgN/ha/año].

Por último, las tablas siguientes recogen todos los flujos medios anuales de agua, sedimentos y N para cada una de las cuencas analizadas.

Tabla 2-41. Resultados medios anuales por cuencas en escenario ARN General. Ciclo del agua y sedimentos.

Cuenca	Área [km ²]	Área afección [km ²]	Precipitación [mm]	Riego [mm]	ET [mm]	Escorrentía superficial [mm]	Recarga Cuaternario [mm]	Recarga otros acuíf. [mm]	Sedimentos [T/ha]
14	3.08	0.45	280.85	242.24	495.04	10.89	15.13	1.72	1.27
19	1.05	0.19	281.32	328.33	554.55	21.35	33.16	0	0.97
33	1.86	0.47	281.32	257.64	500.31	18.89	18.58	0.61	0.89
43	2.52	1.02	281.32	215.82	473.39	9.37	13.62	0.04	0.78
58	6.82	1.74	281.97	74.88	306.18	24.68	22.30	3.40	3.66
64	1.08	0.22	282.47	218.30	454.06	23.76	20.21	2.26	2.71

Tabla 2-42. Resultados medios anuales por cuencas en escenario ARN General. Ciclo del nitrógeno.

Cuenca	Área [km ²]	Área afección [km ²]	Abono [kgN/ha]	Dep. atm [kgN/ha]	Asim veg [kgN/ha]	Mineral. [kgN/ha]	N escorrentía [kgN/ha]	N recarga Cuater [kgN/ha]	N recarga otros acuíf. [kgN/ha]
14	3.08	0.45	255.46	9.05	277.14	19.99	0.63	6.48	0.25
19	1.05	0.19	360.99	9.05	368.93	20.97	0.72	21.35	0.00
33	1.86	0.47	280.90	9.05	298.48	23.22	0.77	13.76	0.15
43	2.52	1.02	248.91	9.05	265.71	18.71	0.67	10.29	0.00
58	6.82	1.74	82.02	9.05	93.27	12.85	1.44	9.06	0.14
64	1.08	0.22	238.44	9.05	244.75	15.27	2.30	15.01	0.70

2.5.3. ARN PRIORITARIO

En la Figura 2-34 se muestra en forma de diagrama el balance hidrológico medio anual de la zona de estudio medio para el escenario ARN Prioritaria. Con unas entradas por riego y precipitación de 531 mm, prácticamente todo el volumen de agua es evapotranspirado (90% en términos relativos). Del excedente, 28 mm percolan hasta los acuíferos, presentado el acuífero Cuaternario una recarga media anual de 26 mm, y 2 mm el resto de acuíferos a través de sus afloramientos en superficie. Finalmente, las entradas al Mar Menor suponen 23 mm en forma de escorrentía superficial.

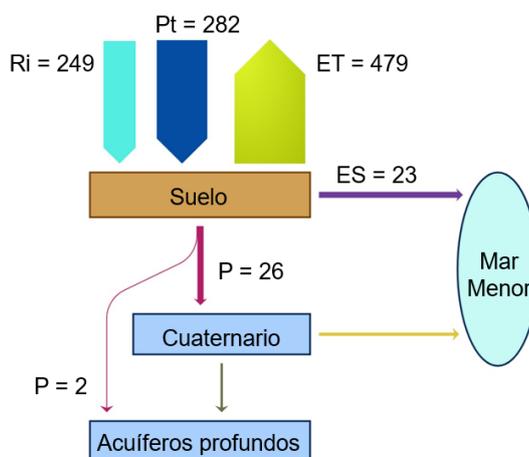


Figura 2-34. Balance hidrológico de la zona de estudio para el escenario ARN Prioritaria (mm/año).

El balance de sedimentos medio anual es el que se muestra en la Tabla 2-43. De la tasa de erosión, el 45% llega al Mar Menor en forma de escorrentía. Un poco más de la mitad de los sedimentos erosionados (1,917m³) son depositados aguas abajo sin llegar a la laguna.

Tabla 2-43. Resultados medios anuales de la zona de estudio para el escenario ARN Prioritaria. Ciclo de sedimentos.

Erosión	5.68 t/ha
	3,517 m ³
Aporte de sedimentos al Mar Menor	2.58 t/ha
	1,600 m ³

En la Figura 2-35 se muestra el balance anual de nitrógeno medio de la zona de estudio para el escenario ARN Prioritaria. El input principal de nitrógeno son los fertilizantes que se emplean en la zona agrícola. De los 301 kgN/ha totales aportados, un 95% es asimilado por la vegetación, aun así, durante los eventos de precipitaciones 1 kgN/ha llega a la laguna con el flujo de escorrentía superficial y 15 kgN/ha percolan hasta los acuíferos.

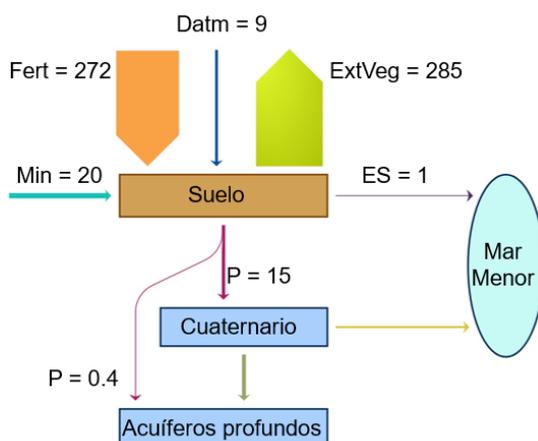


Figura 2-35 Balance nitrógeno medio anual de la zona de estudio para el escenario ARN Prioritaria (kgN/ha/año).

Por último, las tablas siguientes recogen todos los flujos medios anuales de agua, sedimentos y N para cada una de las cuencas analizadas.

Tabla 2-44. Resultados medios anuales por cuencas en escenario ARN Prioritaria. Ciclo del agua y sedimentos.

Cuenca	Área [km ²]	Área afección [km ²]	Precipitación [mm]	Riego [mm]	ET [mm]	Escorrentía superficial [mm]	Recarga Cuaternario [mm]	Recarga otros acuíf. [mm]	Sedimentos [T/ha]
14	3.08	0.26	280.85	268.18	516.85	12.61	16.74	2.55	1.48
19	1.05	0.11	281.32	362.27	583.62	23.21	36.21	0	1.13
33	1.86	0.08	281.32	308.36	541.26	23.05	23.24	1.69	1.32
43	2.52	0.16	281.32	336.07	575.53	16.68	23.39	1.25	1.37
58	6.82	0.25	281.97	168.97	387.56	29.97	29.80	3.40	4.01
64	1.08	0.00	282.47	289.80	511.69	29.33	28.63	2.26	3.10

Tabla 2-45. Resultados medios anuales por cuencas para el escenario ARN Prioritaria. Ciclo del nitrógeno.

Cuenca	Área [km ²]	Área afección [km ²]	Abono [kgN/ha]	Dep. atm [kgN/ha]	Asim veg [kgN/ha]	Mineral. [kgN/ha]	N escorrentía [kgN/ha]	N recarga Cuater [kgN/ha]	N recarga otros acuíf. [kgN/ha]
14	3.08	0.45	284.38	9.05	305.28	20.97	0.78	7.53	0.80
19	1.05	0.19	397.78	9.05	405.80	23.28	0.79	23.52	0.00
33	1.86	0.47	334.96	9.05	352.31	26.21	0.94	16.83	0.15
43	2.52	1.02	379.84	9.05	395.11	24.97	0.92	17.30	0.52
58	6.82	1.74	183.21	9.05	192.67	16.68	1.61	14.52	0.14
64	1.08	0.22	316.15	9.05	320.40	17.67	2.38	19.38	0.70

2.5.4. ESCENARIOS COAG

En este estudio se ha tenido en cuenta que tanto los embalses como los canales de intercepción tienen capacidades finitas. Por lo tanto, los resultados consideran la posibilidad de desbordamiento en ambos elementos. Al contabilizar estos desbordes, se obtiene una estimación más realista del escenario y de las escorrentías que finalmente llegan al Mar Menor. Además, se considera que los embalses aguas abajo tienen la oportunidad de capturar los desbordes de los embalses aguas arriba. La efectividad de cada embalse de capturar agua se define como:

$$Efectividad = \frac{1 - (Vol\ Desborde\ Embalse + Vol\ Desborde\ Canal)}{Vol\ Total\ Aportaciones}$$

Se va a asumir que la efectividad de captura de los sedimentos y nitrógeno arrastrados es la misma que para el agua. La efectividad a escala de cada cuenca de todos sus embalses y canales que la afectan será expresada mediante la Efectividad Conjunta definida como:

$$Efectividad\ Conjunta = \frac{\sum Vols\ Retenidos\ Embalses}{\sum Vols\ Aportaciones\ Embalses}$$

Los valores de estas dos efectividades de los escenarios COAG se indican en la tabla Tabla 2-46 para el caso de suponer 60 días de vaciado.

Tabla 2-46. Efectividades e embalse y total de cuenca para los embalses propuestos por COAG con vaciado.

Embalse	Efectividad embalse	Cuencas afectadas	Efectividad conjunta
Embalses 1 y 2	72.9 %	33 y 37	62.9%
Embalse 4	17.3%		
Embalse 3	75.8%	43	75.8%
Embalse 7	86.0%	58	49.3%
Embalse Ejecutado	91.6%		
Embalse 8	51.7%		
Laguna Natural	8.3%		

La efectividad conjunta de las cuencas 33 y 37 se va a aplicar a la cuenca 33, que es una de las cuencas de la zona de estudio.

Cabe mencionar que, debido a la naturaleza de esta solución, no existe efecto alguno sobre la recarga cuaternario, nitrógeno asimilado por vegetación o nitrógeno recarga cuaternario. Dada

la importancia de lo que ocurre en los canales de derivación y en cada embalse, su evolución temporal se recoge gráficamente en el Anexo 3

Se realiza un análisis de la sensibilidad de los resultados con respecto tiempo de vaciado de los embalses para 10, 180 y 365 días. Cabe mencionar que el escenario **con vaciado** considera que es posible el desagüe completo en 60 días. El escenario **sin vaciado** sólo considera la evaporación, por lo cual cada embalse tendrá su propio tiempo. Los resultados se indican en la tabla siguiente:

Tabla 2-47. Sensibilidad de la efectividad de embalse a los días de vaciado.

Días vaciado:	10	60	180	365	Sin vaciado	Días sin vaciado
Embalses 1-2	72.9%	72.9%	72.9%	72.9%	62.4%	1,511
Embalse 4	26.4%	17.3%	13.4%	11.2%	6.5%	1,133
Embalse 3	82.5%	75.8%	71.8%	66.1%	24.6%	3,021
Embalse 7	90.2%	80.6%	81.8%	71.9%	14.7%	3,210
Ejecutado	94.8%	91.6%	91.0%	89.5%	66.4%	1,511
Embalse 8	60.6%	51.7%	44.3%	37.0%	12.3%	2,077
Laguna natural	41.6%	8.3%	n/a	n/a	7.4%	151

Debido a que los rebalses en los canales de derivación afectan la eficiencia conjunta del sistema, se realiza un análisis de sensibilidad modificando su capacidad de diseño. Los resultados para los escenarios sin y con vaciado se indican en la Tabla 2-48 y Tabla 2-49 respectivamente. Los puntos desde cuando ya no hay sensibilidad, se indican con negrita y cursiva.

Tabla 2-48. COAG sin vaciado. Sensibilidad de la efectividad de embalse a la capacidad del canal de derivación.

Embalse	Capacidad canal	0,2*Q	0,8*Q	Q original	1,2*Q	1,5*Q	2*Q	5*Q	10*Q
1-2	Capacidad [m3/s]	0.9	3.8	4.7	5.7	7.1	9.5	23.7	47.4
	Efectividad embalse [%]	33.4	59.2	62.4	63.8	64.3	64.5	64.5	64.5
4	Capacidad [m3/s]	2.4	9.6	12	14.4	18	24	60	120
	Efectividad embalse [%]	6.5							
7	Capacidad [m3/s]	1.7	6.8	8.5	10.2	12.8	17	42.5	85
	Efectividad embalse [%]	14.7							
8	Capacidad [m3/s]	1.8	7.2	9	10.8	13.5	18	45	90
	Efectividad embalse [%]	12.3							

ANÁLISIS DE LA EFICACIA DE DIVERSAS MEDIDAS DE CONTROL SOBRE EL VERTIDO DE AGUA, SEDIMENTOS Y NITRÓGENO A LA LAGUNA COSTERA DEL MAR MENOR MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO TETIS

Embalse	Capacidad canal	0,2*Q	0,8*Q	Q original	1,2*Q	1,5*Q	2*Q	5*Q	10*Q
Laguna natural	Capacidad [m3/s]	0.9	3.6	4.5	5.4	6.8	9	22.5	45
	Efectividad embalse [%]	6.6	7.3	7.4	7.6	7.6	7.8	8.1	8.1

Tabla 2-49. COAG con vaciado. Sensibilidad de la efectividad de embalse a la capacidad del canal de derivación.

Embalse	Capacidad canal	0,2*Q	0,8*Q	Q original	1,2*Q	1,5*Q	2*Q	5*Q	10*Q
1-2	Capacidad [m3/s]	0.9	3.8	4.7	5.7	7.1	9.5	23.7	47.4
	Efectividad embalse [%]	33.4	66.2	72.9	78.3	84.3	89.7	93.7	93.7
4	Capacidad [m3/s]	2.4	9.6	12	14.4	18	24	60	120
	Efectividad embalse [%]	17.3							
7	Capacidad [m3/s]	1.7	6.8	8.5	10.2	12.75	17	42.5	85
	Efectividad embalse [%]	61.6	84.4	86.0	86.6	87.0	87.0	87.0	87.0
8	Capacidad [m3/s]	1.8	7.2	9	10.8	13.5	18	45	90
	Efectividad embalse [%]	50.1	51.7						
Laguna natural	Capacidad [m3/s]	0.9	3.6	4.5	5.4	6.75	9	22.5	45
	Efectividad embalse [%]	6.8	8.0	8.3	8.6	8.7	8.9	9.5	9.5

2.5.5. ESCENARIOS COAG. CON VACIADO

En la Figura 2-36 se muestra en forma de diagrama el balance hidrológico medio anual para la zona de estudio COAG con vaciado. Los flujos verticales de agua no se modifican respecto de la situación actual y sólo se reduce, por el efecto de los embalses, la escorrentía superficial que llega al Mar Menor, de los 25 mm en escenario actual a los 17 mm en este escenario.

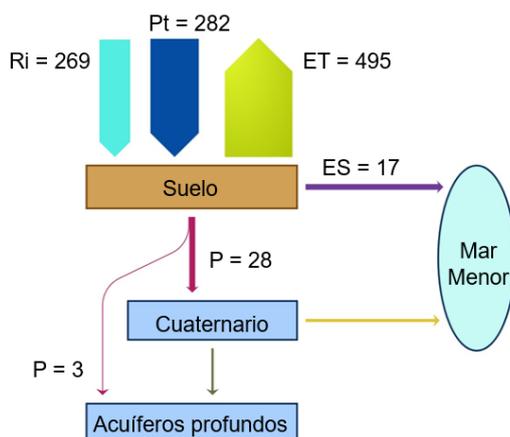


Figura 2-36. Balance hidrológico de la zona de estudio para el escenario COAG con vaciado (mm/año).

El balance de sedimentos medio anual es el que se muestra en la Tabla 2-50. De la tasa de erosión, sólo el 40% llega al Mar Menor en forma de escorrentía. Un poco más de la mitad de los sedimentos erosionados ($2,218\text{m}^3$) son depositados aguas abajo sin llegar a la laguna (suelo o embalses).

Tabla 2-50. Resultados medios anuales de la zona de estudio para el escenario COAG con vaciado. Ciclo de sedimentos.

Erosión	6.00 t/ha
	3,713 m ³
Aporte de sedimentos al Mar Menor	2.42 t/ha
	1,495 m ³

En la Figura 2-37 se muestra el balance anual de nitrógeno medio de la zona de estudio para el escenario COAG con vaciado. El aporte de N superficial al Mar Menor se reduce aún más que el escenario anterior por la mayor efectividad de los embalses al forzar el vaciado de 60 días.

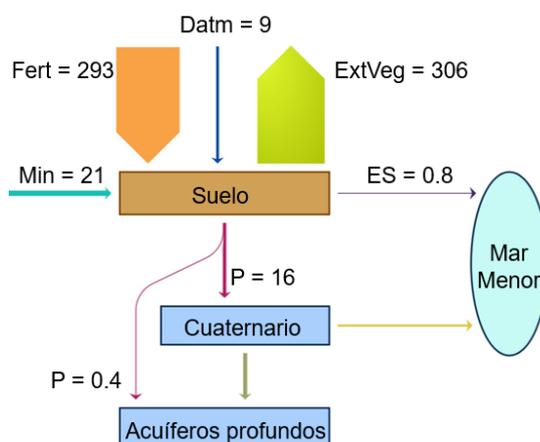


Figura 2-37. Balance nitrógeno medio anual para el escenario COAG con vaciado (kgN/ha/año).

Finalmente, los resultados de los principales flujos por cuencas de este escenario se recogen a continuación:

Tabla 2-51. COAG con vaciado. Principales flujos medios anuales por cuenca.

Cuenca	Área [km ²]	Área afección [km ²]	Efectividad conjunta [%]	Escurrentía superficial [mm]	Sedimentos [T/ha]	N escurrentía [kgN/ha]	N total * [kgN/ha]
33	1.86	1.75	62.9	10.22	0.33	0.38	18.35
43	2.52	2.47	75.9	13.02	0.79	0.39	19.51
58	6.82	6.46	49.3	18.65	7.91	0.84	15.89

* Suma directa del N por recarga de acuífero y escurrentía superficial.

2.5.6. ESCENARIOS COAG. SIN VACIADO

Los valores de la efectividad de los embalses, explicados en el punto anterior, se indican en la Tabla 2-52 para el escenario sin vaciado

Tabla 2-52. Efectividades de embalse y total de cuenca para los embalses propuestos por COAG sin vaciado.

Embalse	Efectividad embalse	Cuencas afectadas	Efectividad conjunta
Embalses 1 y 2	62.4%	33 y 37	52.4%
Embalse 4	6.5%		
Embalse 3	24.6%	43	24.6%
Embalse 7	14.7%	58	12.9%
Embalse Ejecutado	66.4%		
Embalse 8	12.3%		
Laguna Natural	7.4%		

En la Figura 2-38 se muestra en forma de diagrama el balance hidrológico medio anual para la zona de estudio COAG sin vaciado. Los flujos verticales de agua no se modifican respecto de la situación actual y sólo se reduce, por el efecto de los embalses, la escorrentía superficial que llega al Mar Menor, de los 25 mm en escenario actual a los 22 mm en este escenario.

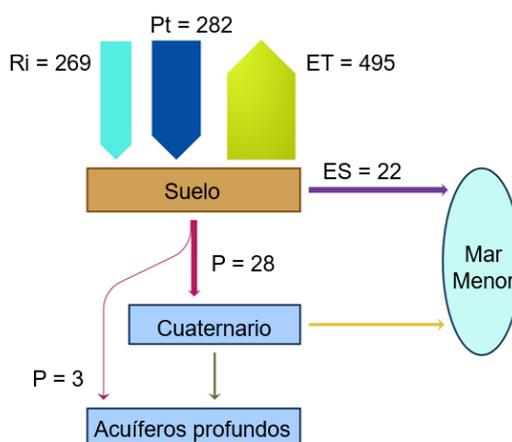


Figura 2-38. Balance hidrológico de la zona de estudio para el escenario COAG sin vaciado [mm/año].

El balance anual de sedimentos medio en la zona de estudio es el que se muestra en la Tabla 2-53. De la tasa de erosión (la misma que en situación actual), se reduce al 28% la que llega al Mar Menor en forma de escorrentía. Un poco más de la mitad de los sedimentos erosionados (2,689 m³) son depositados aguas abajo sin llegar a la laguna (suelo o embalses).

Tabla 2-53. Resultados medios anuales de la zona de estudio para el escenario COAG sin vaciado. Ciclo de sedimentos.

Erosión	6.00 t/ha
	3,713 m ³
Aporte de sedimentos al Mar Menor	1.65 t/ha
	1,024 m ³

En la Figura 2-39 se muestra el balance anual de nitrógeno medio de la zona de estudio para el escenario COAG sin vaciado. Análogamente al balance de agua, sólo se modifica la aportación de N por escorrentía superficial al Mar Menor, reduciéndose de 1.3 a 1.2 kgN/ha/año, manteniéndose iguales el resto de flujos a la situación actual.

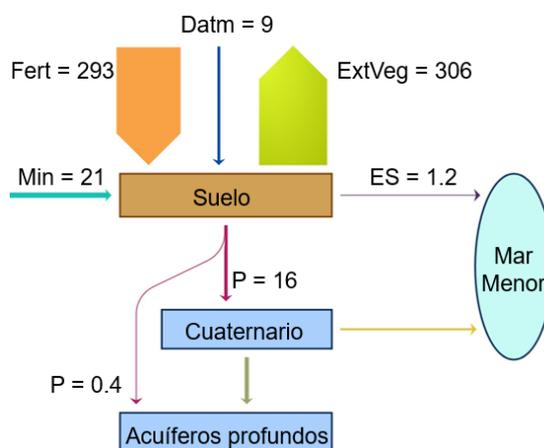


Figura 2-39. Balance nitrógeno medio anual para el escenario COAG sin vaciado [kgN/ha/año].

Por último, los resultados de los principales flujos por cuencas de este escenario se recogen en la Tabla 2-54 siguiente:

Tabla 2-54. COAG sin vaciado. Principales flujos medios anuales por cuenca.

Cuenca	Área [km ²]	Área afección [km ²]	Efectividad conjunta [%]	Escorrentía superficial [mm]	Aporte sedimentos [T/ha]	N aporte MM [kgN/ha]	N Total * [kgN/ha]
33	1.86	1.75	52.4	12.52	0.42	0.48	18.45
43	2.52	2.47	24.6	16.49	3.07	0.82	19.94
58	6.82	6.46	12.9	27.61	13.20	1.43	16.48

* Suma directa del N por recarga de acuífero y escorrentía superficial.

2.6. RESULTADOS AGREGADOS

2.6.1. SITUACIÓN ACTUAL

En la Figura 2-40 se muestra en forma de diagrama el balance anual hidrológico medio de la zona de estudio en situación actual. Con unas entradas por riego y precipitación de 460 mm, prácticamente todo el volumen de agua es evapotranspirado (85% en términos relativos). Del excedente, 34 mm percolan hasta los acuíferos, presentado el acuífero Cuaternario una recarga media anual de 29 mm y 5 mm el resto de acuíferos (no conectados con el Mar Menor) a través de sus afloramientos en superficie. Finalmente, las entradas al Mar Menor suponen 33 mm en forma de escorrentía superficial.

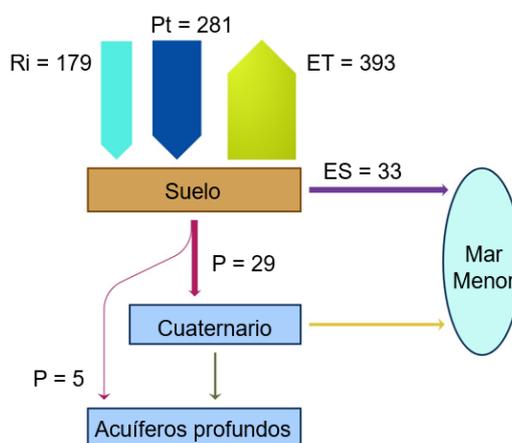


Figura 2-40. Balance hidrológico de la zona de estudio en situación actual [mm/año].

El balance de sedimentos medio anual en la zona de estudio es el que se muestra en la Tabla 2-37. De la tasa de erosión, el 17% llega al Mar Menor junto con la escorrentía superficial, fundamentalmente en los episodios más importantes de crecidas. La mayor parte de los sedimentos erosionados (116,465 m³) son depositados aguas abajo sin llegar a la laguna.

Tabla 2-55. Resultados medios anuales de la zona de estudio en situación actual. Ciclo de sedimentos.

Erosión	37.18 t/ha
	140,427 m ³
Aporte de sedimentos al Mar Menor	6.34 t/ha
	23,962 m ³

En la Figura 2-41 se muestra el balance anual de nitrógeno medio en la zona de estudio en situación actual. El input principal de nitrógeno son los fertilizantes que se emplean en la zona agrícola. De los 233 kgN/ha, un 94% es asimilado por la vegetación. Aun así, durante los

eventos de precipitaciones, 2 kgN/ha llegan a la laguna con el flujo de escorrentía superficial y 12kgN/ha percolan hasta los acuíferos.

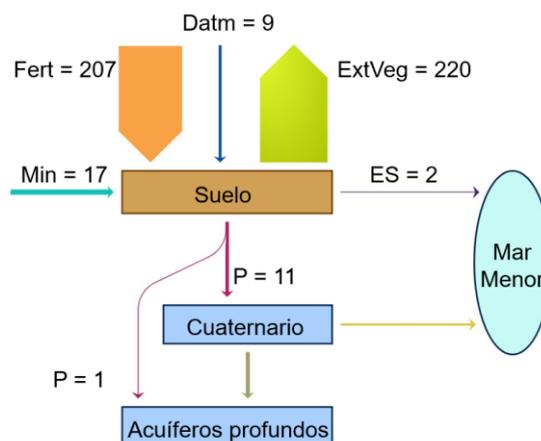


Figura 2-41. Balance nitrógeno medio anual de la zona de estudio en situación actual [kgN/ha/año].

2.6.2. FRANJA BUFFER

En la Figura 2-42 se muestra en forma de diagrama el balance anual hidrológico medio de la zona de estudio en escenario Buffer. Con unas entradas por riego y precipitación de 435 mm, prácticamente todo el volumen de agua es evapotranspirado (85% en términos relativos). Del excedente, 34 mm percolan hasta los acuíferos, presentado el acuífero Cuaternario una recarga media anual de 29 mm y 5 mm el resto de acuíferos (no conectados con el Mar Menor) a través de sus afloramientos en superficie. Finalmente, las entradas al Mar Menor suponen 33 mm en forma de escorrentía superficial.

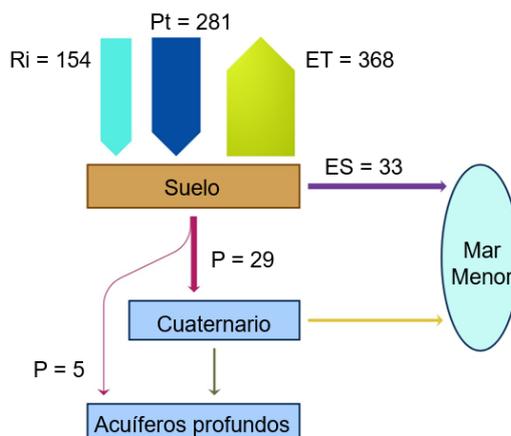


Figura 2-42. Balance hidrológico de la zona de estudio en escenario Buffer [mm/año].

El balance de sedimentos medio anual en la zona de estudio es el que se muestra en la Tabla 2-37. De la tasa de erosión, el 17% llega al Mar Menor junto con la escorrentía superficial,

fundamentalmente en los episodios más importantes de crecidas. La mayor parte de los sedimentos erosionados (115,383 m³) son depositados aguas abajo sin llegar a la laguna.

Tabla 2-56. Resultados medios anuales de la zona de estudio en escenario Buffer. Ciclo de sedimentos.

Erosión	37.71 t/ha
	138,655 m ³
Aporte de sedimentos al Mar Menor	6.16 t/ha
	23,272 m ³

En la Figura 2-43 se muestra el balance anual de nitrógeno medio en la zona de estudio en situación actual. El input principal de nitrógeno son los fertilizantes que se emplean en la zona agrícola. De los 193 kgN/ha, un 94% es asimilado por la vegetación. Aun así, durante los eventos de precipitaciones, 2 kgN/ha llegan a la laguna con el flujo de escorrentía superficial y 9.5kgN/ha percolan hasta los acuíferos.

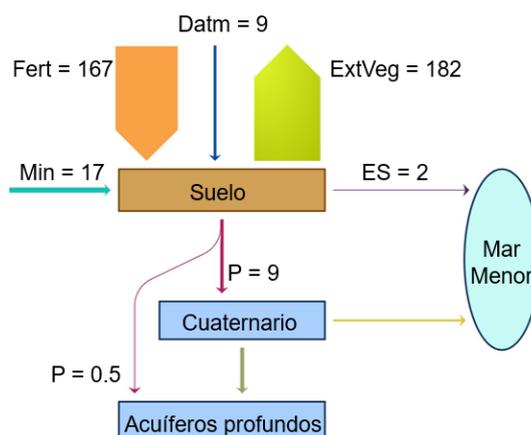


Figura 2-43. Balance nitrógeno medio anual de la zona de estudio en escenario Buffer [kgN/ha/año].

2.6.3. AGRICULTURA DE PRECISIÓN

En la Figura 2-44 se muestra en forma de diagrama el balance anual hidrológico medio de la zona de estudio en escenario Agricultura de Precisión. Con unas entradas por riego y precipitación de 414 mm, prácticamente todo el volumen de agua es evapotranspirado (85% en términos relativos). Del excedente, 34 mm percolan hasta los acuíferos, presentado el acuífero Cuaternario una recarga media anual de 29 mm y 5 mm el resto de acuíferos (no conectados con el Mar Menor) a través de sus afloramientos en superficie. Finalmente, las entradas al Mar Menor suponen 33 mm en forma de escorrentía superficial.

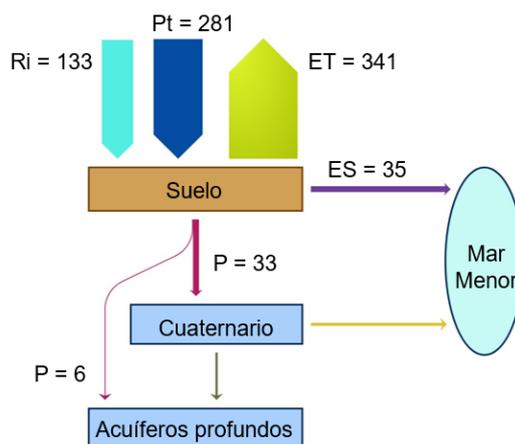


Figura 2-44. Balance hidrológico de la zona de estudio en escenario Agricultura de Precisión [mm/año].

El balance de sedimentos medio anual en la zona de estudio es el que se muestra en la Tabla 2-37. De la tasa de erosión, el 16% llega al Mar Menor junto con la escorrentía superficial, fundamentalmente en los episodios más importantes de crecidas. La mayor parte de los sedimentos erosionados (111,044 m³) son depositados aguas abajo sin llegar a la laguna.

Tabla 2-57. Resultados medios anuales de la zona de estudio en escenario Agricultura de Precisión. Ciclo de sedimentos.

Erosión	35.01 t/ha
	132,223 m ³
Aporte de sedimentos al Mar Menor	5.61 t/ha
	21,179 m ³

En la Figura 2-45 se muestra el balance anual de nitrógeno medio en la zona de estudio en situación actual. El input principal de nitrógeno son los fertilizantes que se emplean en la zona agrícola. De los 136 kgN/ha, un 95% es asimilado por la vegetación. Aun así, durante los eventos de precipitaciones, 1 kgN/ha llegan a la laguna con el flujo de escorrentía superficial y 6.3kgN/ha percolan hasta los acuíferos.

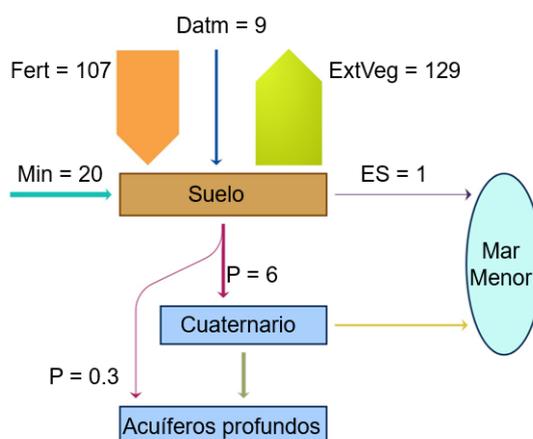


Figura 2-45. Balance nitrógeno medio anual de la zona de estudio en escenario Agricultura de Precisión [kgN/ha/año].

2.6.4. APLICACIÓN LEY 3/2020

En la Figura 2-46 se muestra en forma de diagrama el balance anual hidrológico medio de la zona de estudio en escenario Ley3/2020. Con unas entradas por riego y precipitación de 402 mm, prácticamente todo el volumen de agua es evapotranspirado (82% en términos relativos). Del excedente, 38 mm percolan hasta los acuíferos, presentado el acuífero Cuaternario una recarga media anual de 32 mm y 6 mm el resto de acuíferos (no conectados con el Mar Menor) a través de sus afloramientos en superficie. Finalmente, las entradas al Mar Menor suponen 34 mm en forma de escorrentía superficial.

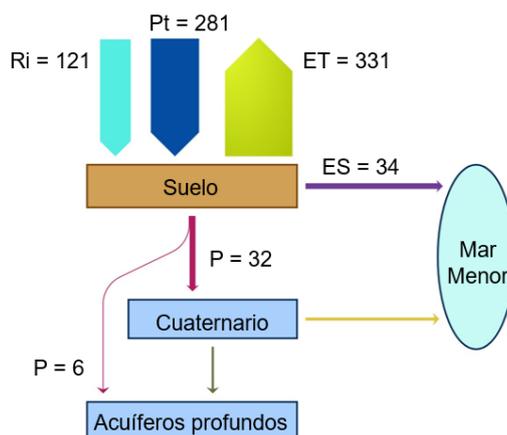


Figura 2-46. Balance hidrológico de la zona de estudio en escenario Agricultura de Precisión [mm/año].

El balance de sedimentos medio anual en la zona de estudio es el que se muestra en la Tabla 2-37. De la tasa de erosión, el 16% llega al Mar Menor junto con la escorrentía superficial,

fundamentalmente en los episodios más importantes de crecidas. La mayor parte de los sedimentos erosionados (111,062 m³) son depositados aguas abajo sin llegar a la laguna.

Tabla 2-58. Resultados medios anuales de la zona de estudio en escenario Agricultura de Precisión. Ciclo de sedimentos.

Erosión	35.01 t/ha
	132,229 m ³
Aporte de sedimentos al Mar Menor	5.60t/ha
	21,167 m ³

En la Figura 2-47 se muestra el balance anual de nitrógeno medio en la zona de estudio en situación actual. El input principal de nitrógeno son los fertilizantes que se emplean en la zona agrícola. De los 123 kgN/ha, un 95% es asimilado por la vegetación. Aun así, durante los eventos de precipitaciones, 1 kgN/ha llegan a la laguna con el flujo de escorrentía superficial y 6.3kgN/ha percolan hasta los acuíferos.

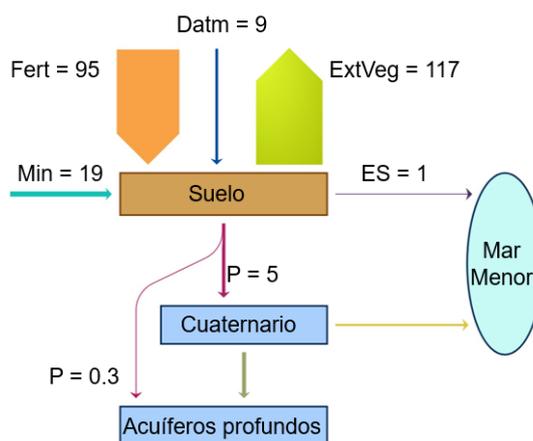


Figura 2-47. Balance nitrógeno medio anual de la zona de estudio en escenario Agricultura de Precisión [kgN/ha/año].

2.7. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

2.7.1. ESCALAMIENTO

Es importante mencionar que los resultados de ARN y COAG no son directamente comparables con Buffer, AP y Ley3/2020, esto debido a que los primeros 2 sólo actúan en una fracción de toda la zona aportante sur. Por lo tanto, es necesario realizar un escalamiento de los escenarios ARN y COAG como si estos afectaran a toda la zona aportante sur.

ARN: Se considera el porcentaje de área de afección por ARN promedio en cada cuenca, el cual se utiliza para escalar las variables hidrológicas, de sedimentos y nitrógeno. De esta forma, ese porcentaje medio de afección se escala como si estuviera aplicado a la totalidad de la Zona Aportante Sur (100.08km²)

COAG: Debido a que cada embalse COAG afecta casi la totalidad del área de las cuencas, resulta incorrecto el área de afección como escalamiento. Por lo tanto, se considera el porcentaje de efectividad conjunta de los embalses (embalse y canales) para escalar las variables hidrológicas, de sedimentos y nitrógeno. De esta manera, se asume que los embalses recogerían el total de las escorrentías de la Zona Aportante Sur, escalando el porcentaje de efectividad promedio.

2.7.2. BALANCES

Los balances de agua agregados, de los 6 escenarios analizados, se indican en la Tabla 2-59 y las variaciones porcentuales de cada uno con respecto a la situación actual se indican en la Figura 2-48. Los balances de sedimentos se indican en la Tabla 2-60 y las variaciones porcentuales de cada uno de los escenarios con respecto a la situación actual se indican en la Figura 2-49. Los balances de nitrógeno se indican en la Tabla 2-61 y sus respectivas variaciones porcentuales con respecto a la situación actual se indica en la Figura 2-50.

Tabla 2-59 Balances agregados agua [mm/año].

Escenario	Precipitación	Riego	ET	Escorrentía superficial	Recarga Cuaternario	Recarga otros acuíferos
Situación actual	280.85	178.86	392.64	32.85	29.3	4.91
ARN	280.85	123.18	336.03	24.31	20.99	1.6
COAG	280.85	178.86	392.64	18.53	29.3	4.91
Buffer 1500	280.85	153.93	368.11	32.53	29.2	5.12
Agricultura de precisión	280.85	132.52	340.7	34.55	33.1	5.67
Ley3_2020	280.85	120.99	331.1	33.78	31.9	5.5

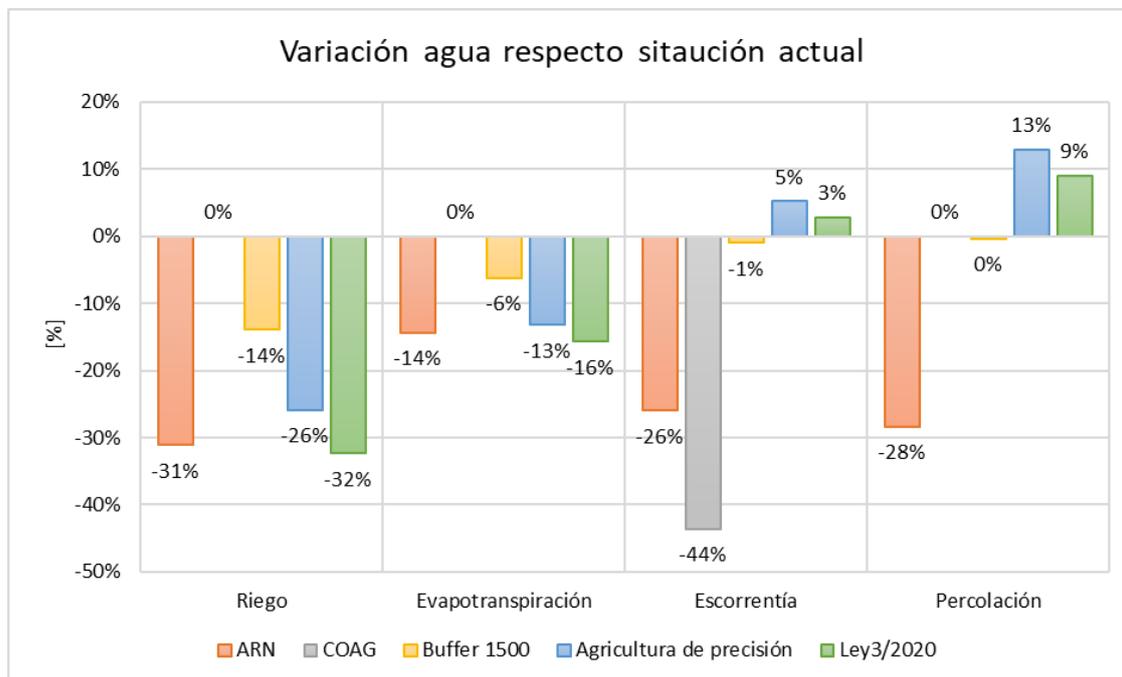


Figura 2-48 Variaciones porcentuales de flujos de agua con respecto a situación actual.

Tabla 2-60 Balances sedimentos.

Escenario	Erosión		Aporte de sedimentos al Mar Menor	
	(t/ha)	(m ³)	(t/ha)	(m ³)
Situación actual	37.18	140,427	6.34	23,962
ARN	26.20	98,939	4.26	16,114
COAG	37.18	140,427	5.18	19,561
Buffer 1500	36.71	138,655	6.16	23,272
Agricultura de precisión	35.011	132,223	5.608	21,179
Ley3_2020	35.012	132,229	5.605	21,167

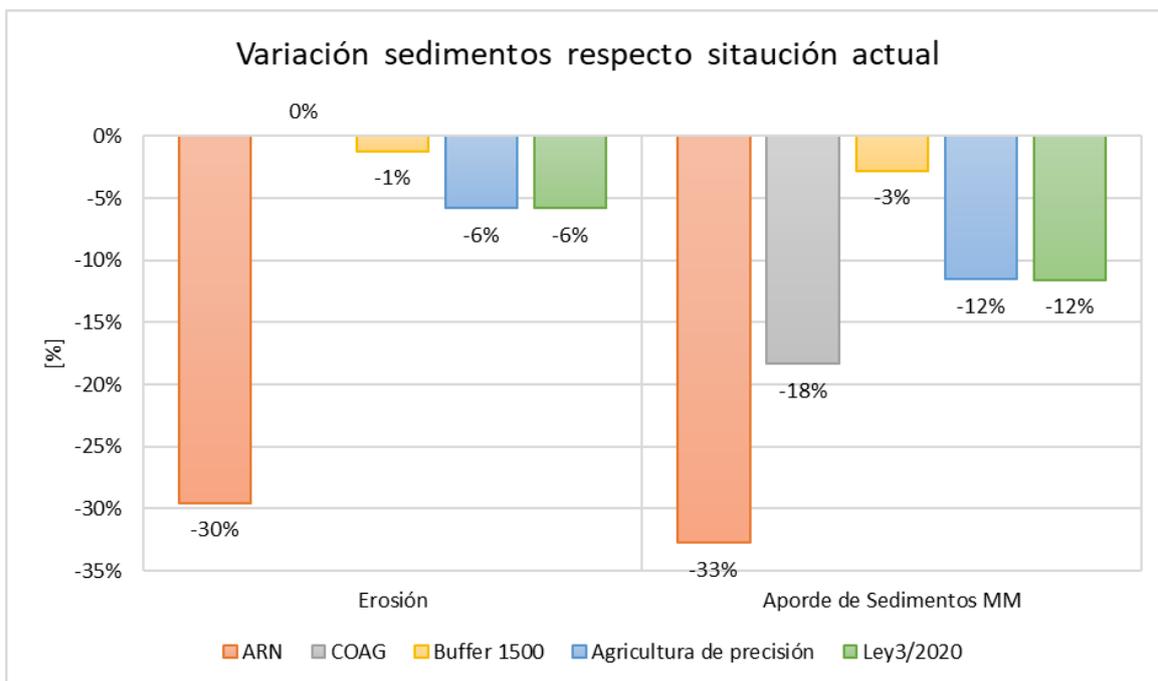


Figura 2-49 Variaciones porcentuales de flujos de sedimentos con respecto a situación actual.

Tabla 2-61 Balances nitrógeno [kgN/ha·año⁻¹].

Escenario	Abono	Deposición atmosférica	Mineralización neta	Asimilación por la vegetación	Escurrentía superficial	Recarga Cuaternario	Recarga otros acuíferos
Situación actual	206.84	9.05	17.31	219.96	1.74	11.27	0.55
ARN	142.80	9.05	14.10	155.54	1.34	7.76	0.03
COAG	206.84	9.05	17.31	219.96	0.73	11.27	0.55
Buffer 1500	166.56	9.05	17.13	182.37	1.62	8.72	0.47
Agricultura de precisión	107.20	9.05	19.93	128.87	1.10	6.41	0.34
Ley3_2020	95.45	9.05	19.04	117.41	1.09	5.35	0.31

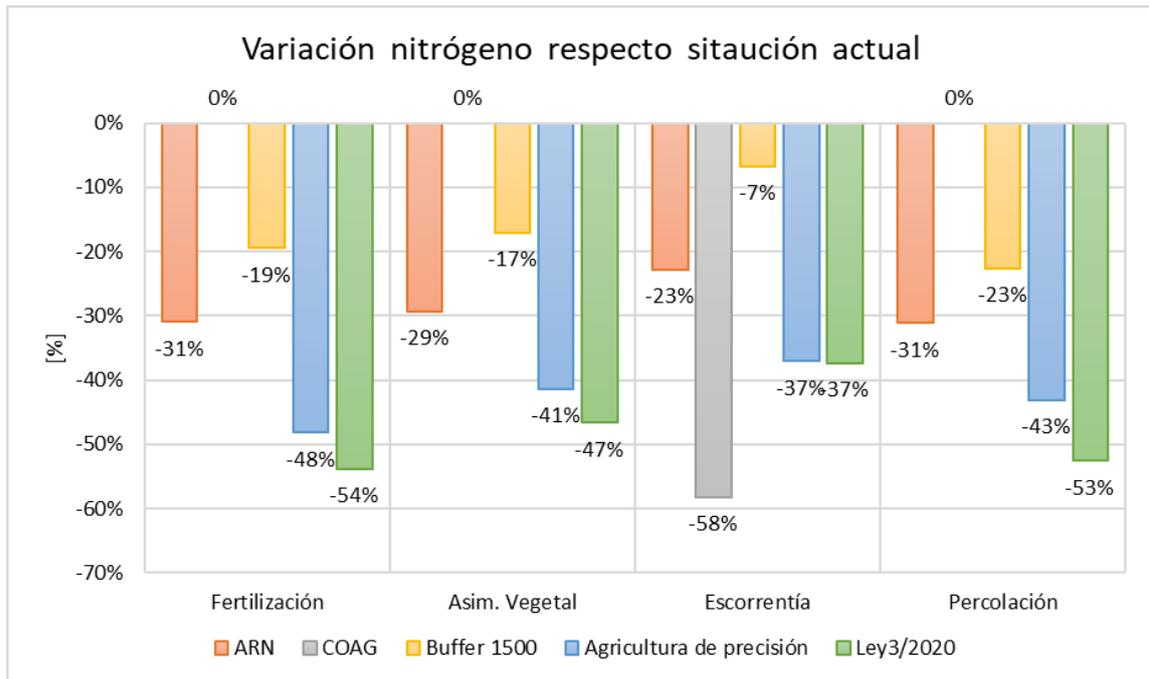


Figura 2-50 Variaciones porcentuales de flujos de Nitrógeno con respecto a situación actual.

3. ANÁLISIS EN LA ZONA APORTANTE TOTAL

La zona aportante total contempla el estudio de todas aquellas cuencas que descargan directamente a laguna del Mar Menor, o con recarga al acuífero del Campo de Cartagena, como se indica en la Figura 3-1. Esto obliga a incluir cuencas que, si bien descargan directamente al Mar Mediterráneo, (ramblas de Portús, Benipila y Charco) recargan el Acuífero de Cartagena.

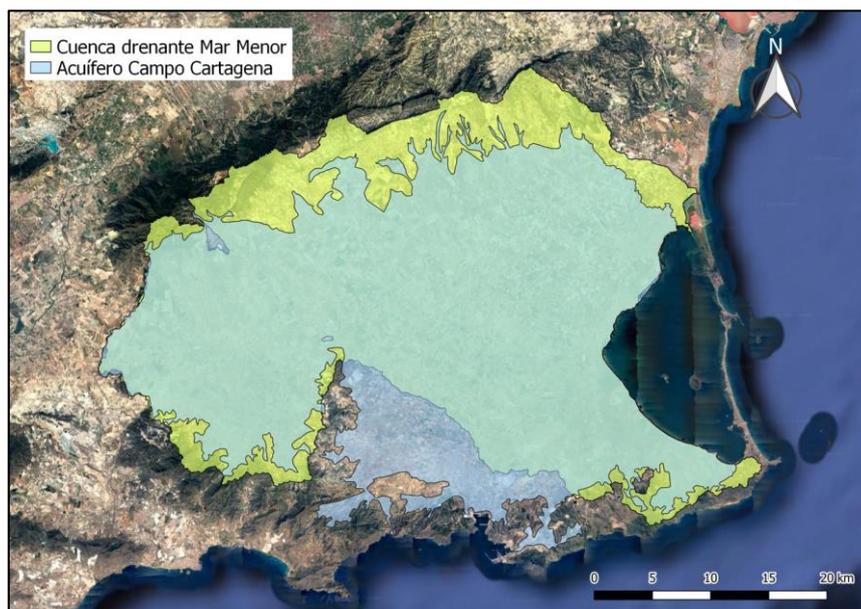


Figura 3-1 Zonas aportantes superficial y subterránea al Mar Menor.

Sobre esta zona se realizan los estudios hidrológicos y posterior calibración del modelo TETIS con discretización espacial de 25 metros y paso de tiempo diario. El cambio en la resolución espacial, en comparación con el análisis del apartado 2 (5 metros), responde a la considerable extensión de la nueva área, la cual abarca 1416 km². La zona aportante total se indica en la Figura 3-2.

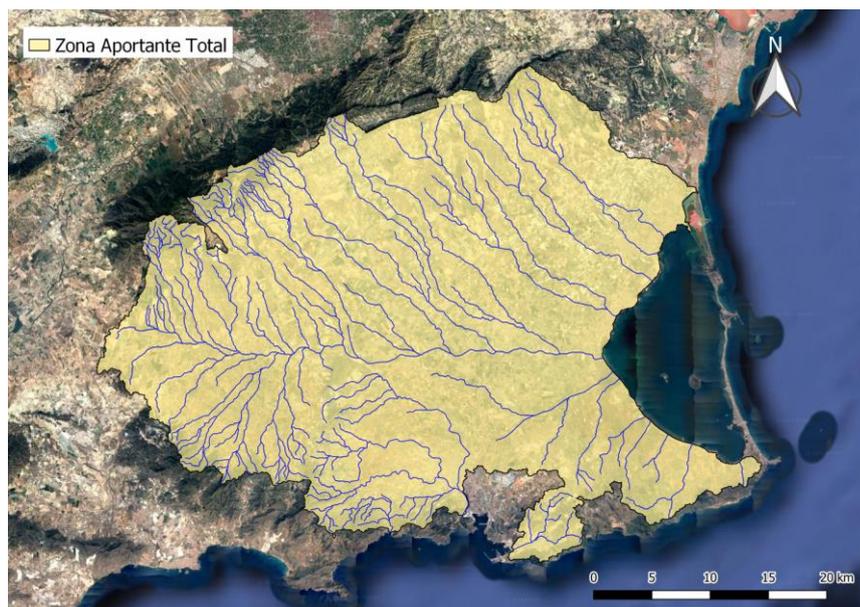


Figura 3-2 Zona Aportante Total al Mar Menor.

3.1. IMPLEMENTACIÓN MODELO TETIS ZONA APORTANTE TOTAL

3.1.1. PRECIPITACIÓN

Para la precipitación se utilizó la entregada por el Observatorio del Mar Menor, correspondiente a información del modelo HARMONIE-AEMET, que corresponde a un mallado de resolución espacial 2.5km y escala temporal diaria. La información va desde el 1-10-2020 al 31-08-2022. Una representación del mallado de precipitación se indica en la Figura 3-3

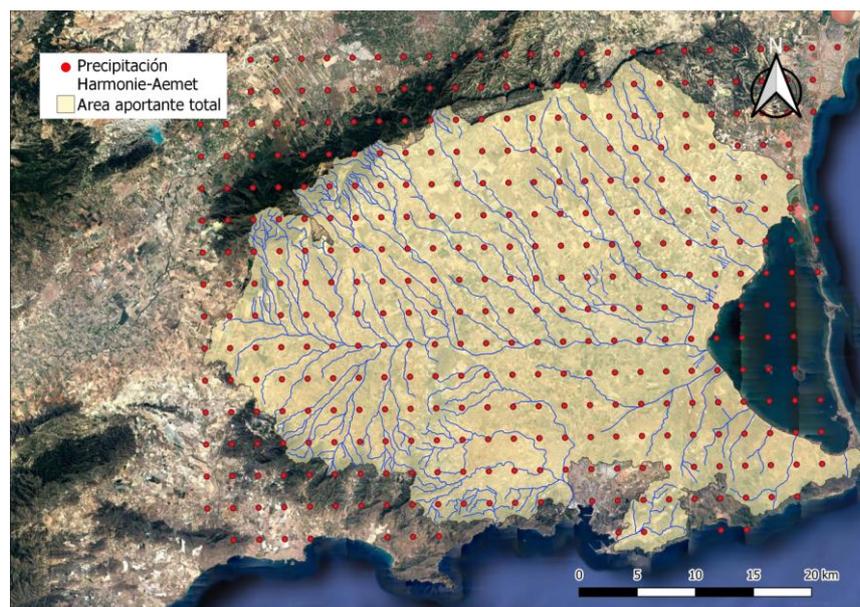


Figura 3-3 Mallado precipitación Harmonie-Aemet para modelo total.

3.1.2. EVAPOTRANSPIRACIÓN

Para la evaporación se utilizó la entregada por el Observatorio del Mar Menor, correspondiente a información del modelo HARMONIE-AEMET, que corresponde a un mallado de resolución espacial 2.5km y escala temporal diaria. La información va desde el 1-10-2020 al 31-08-2022. Una representación del mallado de evapotranspiración se indica en la Figura 3-3

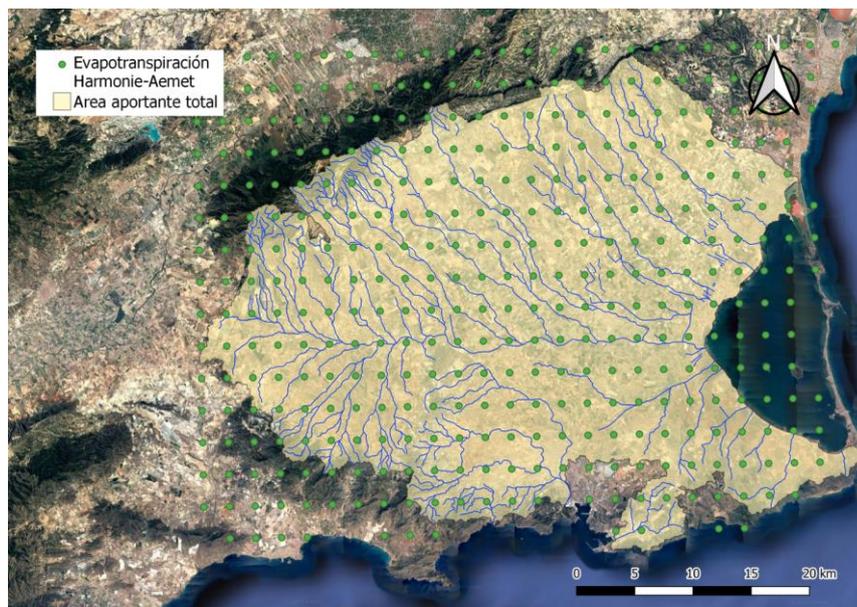


Figura 3-4 Mallado de evapotranspiración Harmonie-Aemet para modelo total.

3.1.3. TEMPERATURA

Para la temperatura se utilizó la entregada por el Observatorio del Mar Menor, correspondiente a información del modelo HARMONIE-AEMET, que corresponde a un mallado de resolución espacial 2.5km y escala temporal diaria. La información va desde el 1-10-2020 al 31-08-2022. Una representación del mallado de temperatura se indica en la Figura 3-3

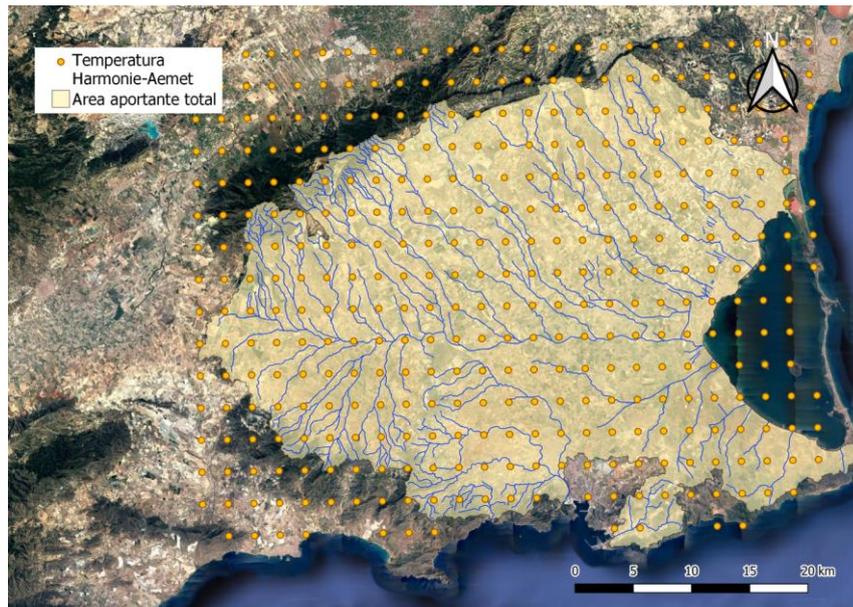


Figura 3-5 Mallado de evapotranspiración Harmonie-Aemet para modelo total.

3.1.4. MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL

Como modelo de elevación digital (MED) se ha empleado el del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) con paso de malla de 25 m de vuelos LIDAR de la primera cobertura del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) (2009). Este modelo de elevación digital se observa en la Figura 3-6. Este modelo es la unión de 9 cuadrantes, indicadas en la Tabla 3-1

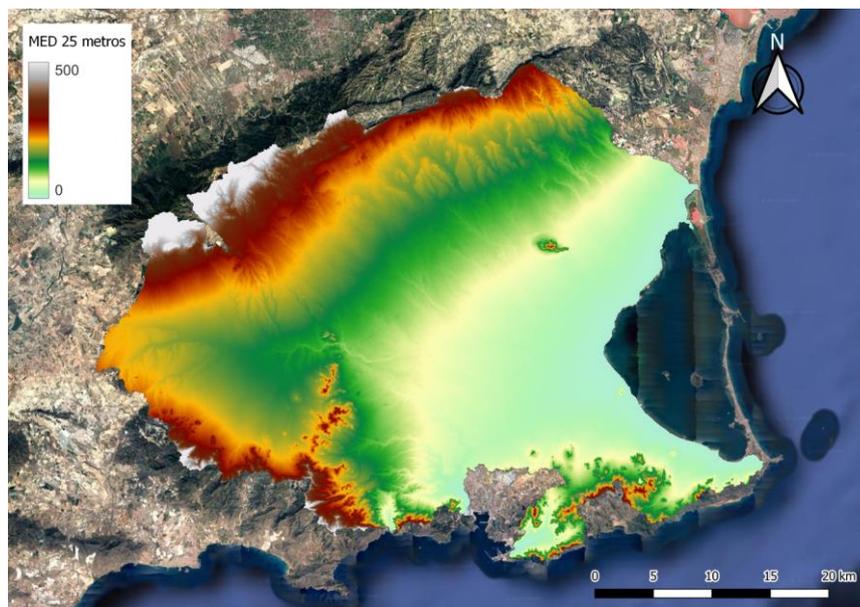


Figura 3-6 Modelo de elevación digital CNIG 25m.

Tabla 3-1 Cuadrantes utilizados para confección de MED.

Nombre cuadrante
PNOA_MDT25_ETRS89_HU30_0935_LID
PNOA_MDT25_ETRS89_HU30_0954_LID
PNOA_MDT25_ETRS89_HU30_0934_LID
PNOA_MDT25_ETRS89_HU30_0955_LID
PNOA_MDT25_ETRS89_HU30_0933_LID
PNOA_MDT25_ETRS89_HU30_0976_LID
PNOA_MDT25_ETRS89_HU30_0977_LID
PNOA_MDT25_ETRS89_HU30_0978_LID
PNOA_MDT25_ETRS89_HU30_0956_LID

3.1.4.1. Acondicionamiento del MED

Para el acondicionamiento del MED se considera el Mapa de Líneas Azules obtenido del MITECO, de la Red Hidrográfica a escala 1:25.000 actualizado en 2018. A partir de esto, se realiza una revisión visual de interferencias y/o modificaciones de cauces por elementos antrópicos, identificando:

- 56 Obras de drenaje transversal: autopistas y carreteras.
- 11 Canales de riego: con referencia a mapas disponibles de la Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena (CRCC) e inspección visual.
- Canal Tajo-Segura.

Con los elementos anteriores, se procede a un acondicionamiento del MED mediante el método AGREE de 3 parámetros.

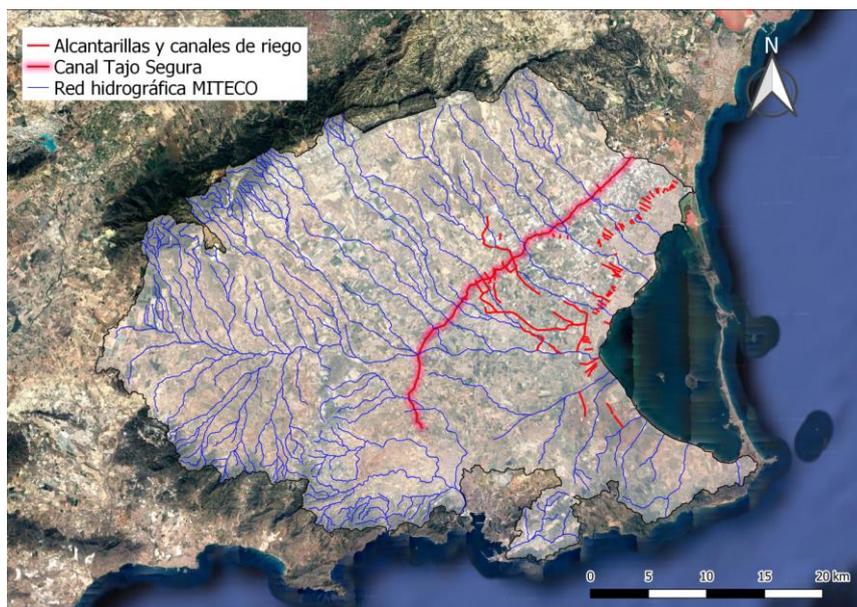


Figura 3-7 Elementos antrópicos incorporados para acondicionamiento de MED.

3.1.4.2. Parámetros derivados del MED

Los mapas necesarios para el funcionamiento del modelo y cuyo cálculo depende del MED se muestran en la Figura 3-8 y corresponden con: mapa de direcciones de drenaje (a), celdas drenantes acumuladas (b), mapa de pendientes (c) y velocidad de flujo en ladera (d).

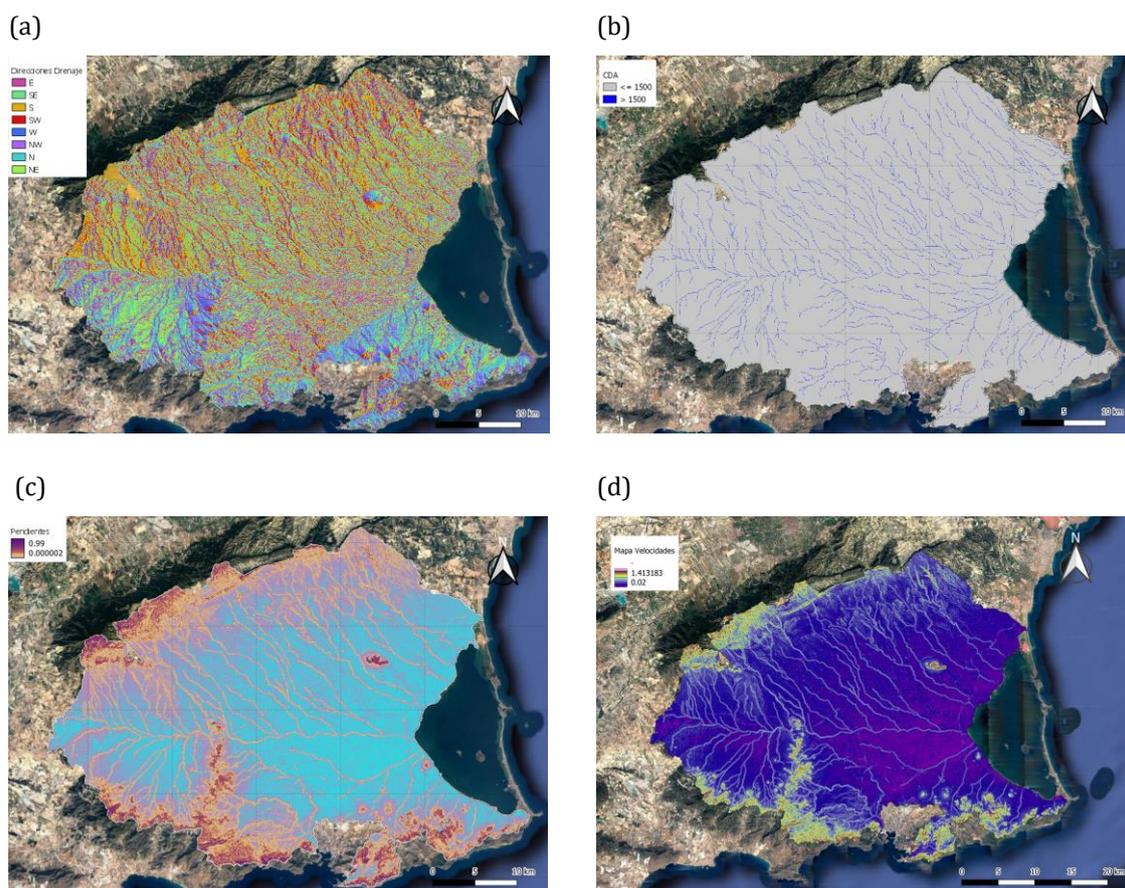


Figura 3-8 (a): Direcciones de drenaje. (b): Celdas drenantes acumuladas. (c): Mapa Pendientes. (d): Mapa velocidades.

3.1.4.3. Delimitación de subcuencas

La Zona Aportante Total considera un área de 1416km². Dentro de esa área se han delimitado:

- 28 cuencas que descargan al Mar Menor
- 3 cuencas externas
 - Rambla Portús
 - Rambla Benipila
 - Rambla Charco

Estas cuencas se indican en la Figura 3-9. Para facilitar la modelación en TETIS, se han agrupado en 4 zonas: Norte, Albuji3n, Sur y Ramblas, como se indican en la Figura 3-9

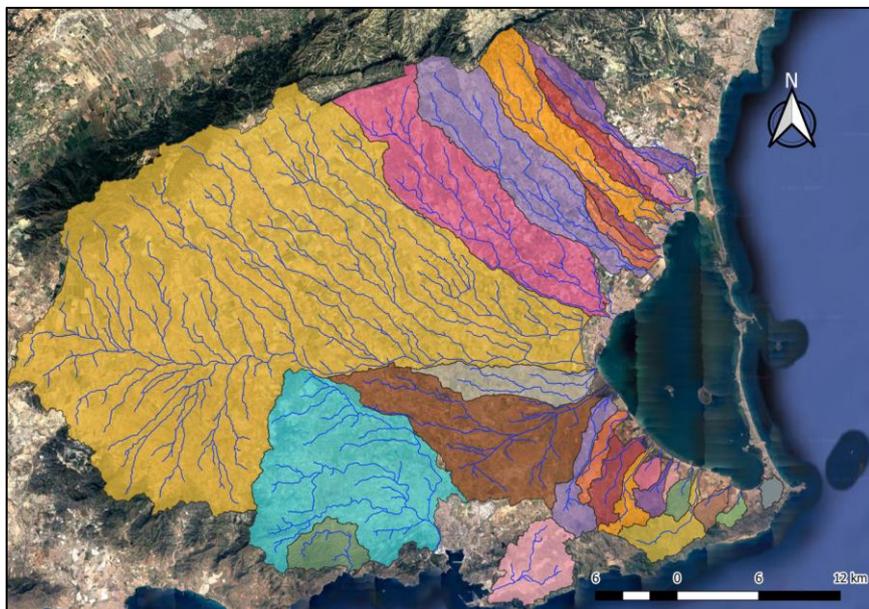


Figura 3-9 Cuencas identificadas.

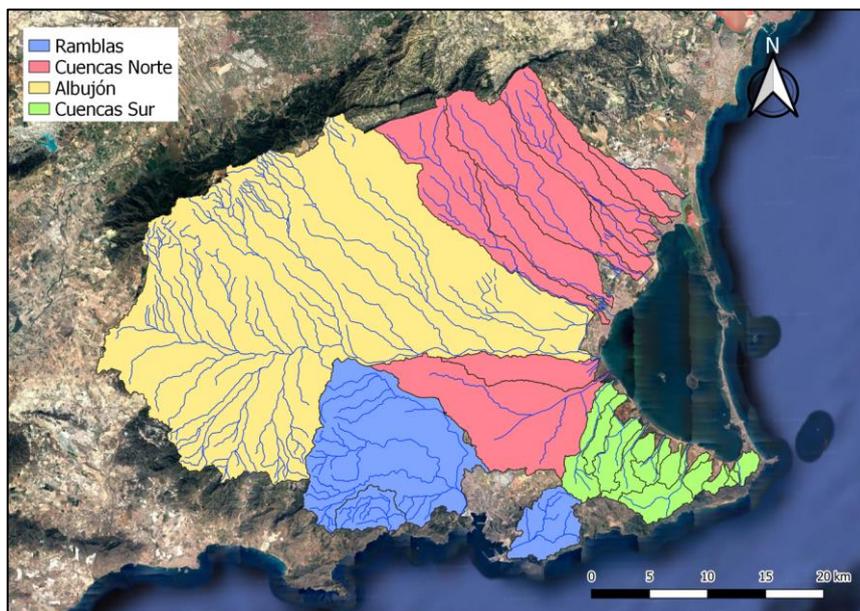


Figura 3-10 Grupos de modelaci3n.

3.1.5. ANÁLISIS DE USOS DE SUELO.

Para la identificación de los usos de suelo, se revisaron dos fuentes de información de coberturas: "CORINE Land Cover 2018" y "SIGPAC 2022". Estas identifican 31 usos de suelo distintos para la zona de estudio, dominando aquellos con fin agrícola, con 1,037km². (73.4% de toda el área de estudio). Se observa la predominancia de cultivos hortícolas (41.5%), cítricos (14.8%) y frutales de hueso (8%). Estos se presentan en la Figura 3-11 con énfasis en los tres mencionados anteriormente.

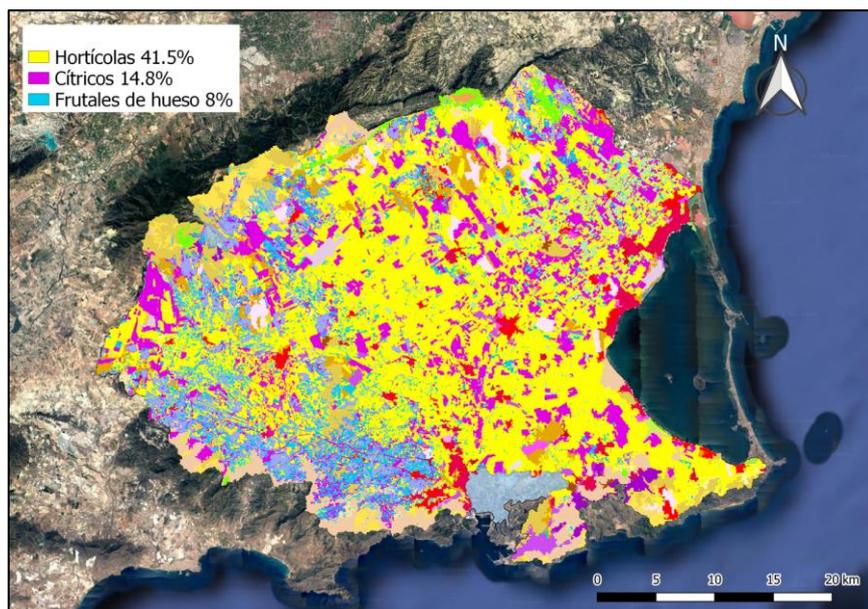


Figura 3-11 Usos de suelo generales.

Para mejorar la información obtenida desde CORINE y SIGPAC se decide una reclasificación del uso de suelo "hortícola", desagregándolo en 4 usos distintos:

- Hortícola aire libre: Lechuga+Melón.
- Hortícola aire libre: Lechuga+Brócoli.
- Hortícola invernadero: Pimiento.
- Hortícola invernadero: Calabacín+Melón.

Cabe mencionar que los invernaderos representan un área de casi 30 km², principalmente en el área norte del Campo de Cartagena. De forma global se indican con color rojo para su contraste en toda la cuenca. A nivel detallado corresponden a las marcas blancas. Esto se indica en la Figura 3-12

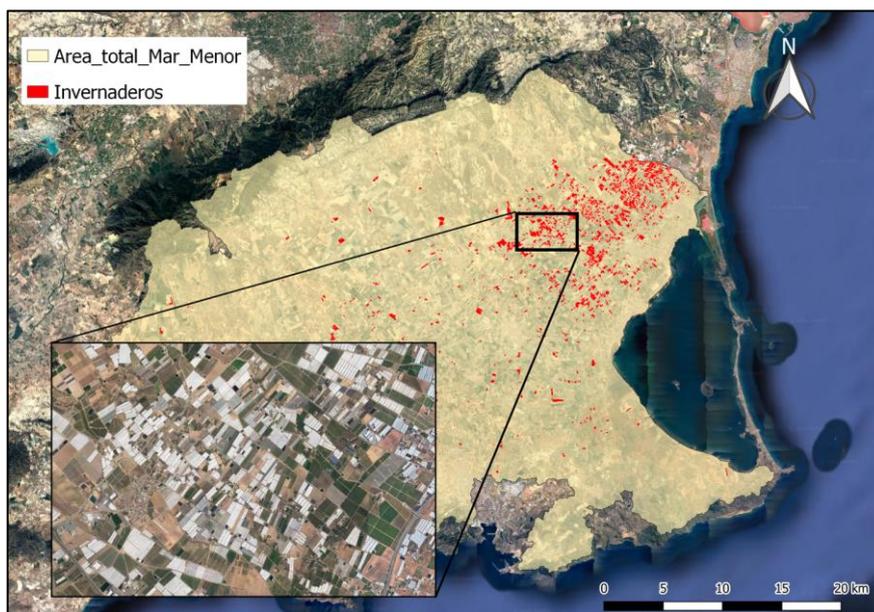


Figura 3-12 Invernaderos en la zona de estudio.

Finalmente, el modelo considera 37 usos de suelo en total, indicados en la Tabla 3-2

Tabla 3-2 Usos de suelo totales.

Uso Suelo	Área [km ²]	% Área
Tejido urbano continuo	30.39	2.15%
Tejido urbano discontinuo	21.30	1.50%
Zona Industrial	20.35	1.44%
Carreteras o ferrocarriles	1.49	0.11%
Áreas portuarias	0.00	0.00%
Aeropuertos	6.36	0.45%
Zonas extracción mineras	8.94	0.63%
Escombreras	1.76	0.12%
Zonas de construcción	4.15	0.29%
Áreas verdes urbanas	0.69	0.05%
Campos de Golf	21.74	1.53%
Cultivos secano	34.37	2.43%
Hortícola Aire Libre: Lechuga + Melón	286.96	20.26%
Viñedos	0.31	0.02%
Cítricos	209.71	14.80%
Olivos	2.74	0.19%
Pastizales	41.45	2.93%
Mosaico de cultivos	32.23	2.27%
Terrenos principalmente agrícolas, pero con importantes espacios de vegetación natural	10.86	0.77%
Bosque de coníferas	30.53	2.15%
Praderas naturales	64.68	4.57%
Vegetación esclerófila	60.73	4.29%
Material boscoso de transición	12.82	0.90%

Uso Suelo	Área [km ²]	% Área
Playas, dunas y arenales	0.19	0.01%
Rocas desnudas	0.00	0.00%
Espacios de vegetación escasa	1.56	0.11%
Marismas	0.00	0.00%
Salinas	0.61	0.04%
Zonas intermareales	0.00	0.00%
Cuerpos de agua	0.51	0.04%
Lagunas costeras	1.08	0.08%
Mar	0.00	0.00%
Frutales de hueso	113.60	8.02%
Invernaderos: Pimiento	14.71	1.04%
Almendros	78.15	5.52%
Hortícola Aire Libre: Lechuga + Brócoli	286.98	20.26%
Invernaderos: Calabacín + Melón	14.71	1.04%

3.1.5.1. Parámetros derivados del uso de suelo

Los parámetros derivados de los usos del suelo son: el factor de vegetación, la interceptación máxima, la profundidad de raíces y las abstracciones iniciales. Los dos últimos, no se emplean directamente en el modelo, pero son necesarios para calcular el parámetro de almacenamiento estático máximo. Las abstracciones iniciales, presentan una componente dependiente del uso del suelo y otra de la pendiente.

En el cálculo del factor de vegetación se ha empleado la metodología propuesta por la Food and Agriculture Organization (FAO) en su Documento No.56, Estudio FAO Riego y Drenaje, *Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (FAO, 2006). Este factor es función exclusiva de la densidad de cubierta vegetal (densidad de hojas por unidad de superficie). Sus condiciones son:

- Independiente de cada celda
- Sin restricción de humedad
- Variación a lo largo del año

En la Tabla 3-3 se observan los valores medios mensuales empleados para cada uno de los usos del suelo, salvo para los usos del suelo de hortícolas (nº 13, 34, 36 y 37), para los cuales el valor del factor de vegetación se introduce de forma diaria.

Tabla 3-3 Factor de vegetación mensual según usos de suelo.

Uso Nº	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
8	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
9	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
10	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
11	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
12	0.2	0.2	0.2	0.37	0.82	0.89	0.8	0.29	0.2	0.2	0.2	0.2
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.61	0.7	0.68	0.59	0.47	0.2	0.2
15	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
16	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
17	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
18	0.2	0.2	0.37	1.04	1.15	1	0.32	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
19	0.6	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.8	0.8	0.8	0.75	0.7	0.6
20	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
21	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
22	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
23	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
24	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
25	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
26	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2
27	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3
28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
29	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
31	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
32	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
33	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9	0.8	0.7	0.4
34	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
35	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9	0.8	0.7	0.4
36	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
37	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

En el caso de los hortícolas de regadío y árboles frutales, se empleará el submodelo de cultivos del modelo TETIS, por lo que el factor de vegetación en vez de tomar un valor medio mensual, toma un valor diario debido a que se requiere más precisión en el cálculo de la evapotranspiración. En la Figura 3-13 se observa la variación anual del factor de vegetación en el caso de los hortícolas de regadío (lechuga, melón, brócoli, calabacín, pimiento) y frutales (naranjos y melocotoneros).

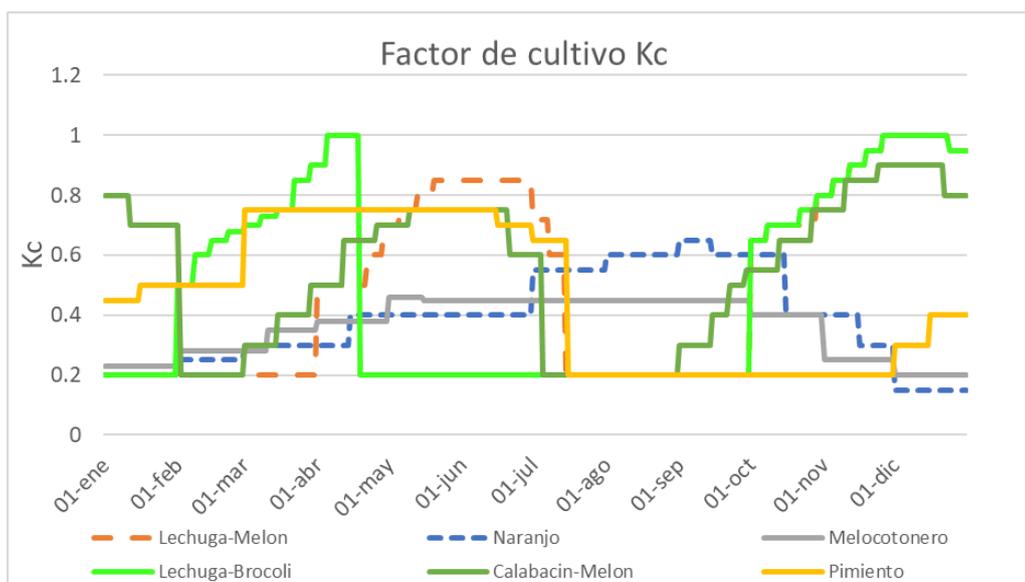


Figura 3-13 Factores de cultivo Kc variables en el año.

Las abstracciones iniciales se pueden agrupar en dos tipos: *intercepción* (de hojas y tallos) donde la única salida es por evaporación y *almacenamiento en depresión* que las únicas salidas son por evaporación e infiltración.

Los valores de interceptación máxima, profundidad de raíces y la componente dependiente del suelo de las abstracciones iniciales son los que se indican en la Tabla 3-4

Tabla 3-4 Valores de interceptación máxima, profundidad de raíces y abstracciones iniciales.

Uso Suelo	Intercepción [mm]	Profundidad Raíces [cm]	Abstracciones iniciales [mm]
Tejido urbano continuo	0	6	3
Tejido urbano discontinuo	3	10	5
Zona Industrial	0	6	3
Carreteras o ferrocarriles	0	6	3
Áreas portuarias	0	10	3
Aeropuertos	0	10	3
Zonas extracción mineras	1	1	3
Escombreras	1	6	2
Zonas de construcción	1	6	1
Áreas verdes urbanas	1	10	5
Campos de Golf	1	10	5
Cultivos secano	1	80	6
Hortícola Aire Libre: Lechuga + Melón	2	50	6
Viñedos	1	80	6
Cítricos	1	150	6
Olivos	1	145	6
Pastizales	3	70	6
Mosaico de cultivos	3	80	6
Terrenos principalmente agrícolas, pero con importantes espacios de vegetación natural	4	80	6
Bosque de coníferas	9	125	4

Uso Suelo	Intercepción [mm]	Profundidad Raíces [cm]	Abstracciones iniciales [mm]
Praderas naturales	3	60	6
Vegetación esclerófila	4	70	6
Material boscoso de transición	4	70	5
Playas, dunas y arenales	0	2	1
Rocas desnudas	0	2	1
Espacios de vegetación escasa	0	2	6
Marismas	0	70	6
Salinas	0	0	6
Zonas intermareales	0	0	5
Cuerpos de agua	0	0	0
Lagunas costeras	0	0	0
Mar	0	0	0
Frutales de hueso	2	150	6
Invernaderos: Pimiento	0	50	6
Almendros	0	150	6
Hortícola Aire Libre: Lechuga + Brócoli	2	50	6
Invernaderos: Calabacín + Melón	0	50	6

En el caso de las abstracciones iniciales, al valor anteriormente tabulado, hay que sumarle la componente dependiente de la pendiente, que se calcula mediante la fórmula empírica:

$$Abs_{ini}[mm] = abs[10 - (1.3S_0)]$$

donde S_0 es la pendiente (%) siempre y cuando sea menor del 7.5%. En caso de pendientes mayores, el almacenamiento superficial se fija en 0

3.1.5.2. Riego y rotación de cultivos.

De los 37 usos de suelo existentes en el área de estudio, se ha considerado 6 usos de suelo con dotación de riego, los cuales se indican en la Tabla 3-5. Si bien en la tabla aparecen de forma individual, está considerada la rotación de cultivos en un mismo uso de suelo.

Tabla 3-5 Dotaciones de riego en [mm/mes].

Cultivo	Inicio	Fin	Ciclo	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Aire Libre Lechuga	01-oct	31-dic	90 días	0	0	0	0	0	0	0	0	0	67.0	57.2	53.4
Aire Libre Melón	01-abr	15-jul	105 días	0	0	0	37.3	78.4	108	43.5	0	0	0	0	0
Naranja	01-ene	31-dic	365 días	7.8	8.4	22.3	34.2	38.8	48.0	81.5	77.8	58.5	32.6	15.3	5.0
Melocotón	01-ene	31-dic	365 días	8.7	9.0	23.3	35.1	42.5	52.0	64.2	56.2	40.5	25.4	10.5	6.2
Invernadero Pimiento	01-dic	01-oct	250 días	50.2	61.3	92.5	119.0	157.6	184.5	199.5	0.0	0.0	0	0	44.2
Aire Libre Brócoli	01-feb	15-abr	75 días	0	24.0	89.2	49.5	0	0	0	0	0	0	0	0
Invernadero Calabacín	01-sep	01-ene	150 días	29.8	0	0	0	0	0	0	0	52.5	82.8	50.0	38.2

Cultivo	Inicio	Fin	Ciclo	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Invernadero Melón	01-mar	30-jun	120 días	0	0	43.8	83.5	109	124.1	0	0	0	0	0	0

3.1.6. PARÁMETROS SUELO Y SUBSUELO

Para la interacción del agua, suelo y subsuelo es necesario el cálculo de los parámetros que se indican a continuación:

3.1.6.1. Almacenamiento estático H_u

El almacenamiento estático (H_u) se refiere al agua evaporable presente en el suelo. En la parametrización del modelo, se calcula como la suma del almacenamiento capilar más el volumen de los charcos.

$$H_u = Alm. Sup. + AWC_{TOP} \times MIN(Prof. Raíces; ROO)$$

Donde

H_u : Almacenamiento estático total [mm]

Alm. Sup. : Almacenamiento en charcos [mm]

AWC_{TOP} : Contenido de agua disponible en el suelo [mm/m]

Prof. Raíces : Profundidad alcanzada por las raíces sin obstáculos (rocas)

ROO : Profundidad del primer obstáculo significativo en desarrollo de las raíces. [m]

Dado que las cantidades de humedad por encima de la capacidad de campo (CC) no pueden ser retenidas contra las fuerzas de gravedad, y las cantidades de humedad por debajo del punto de marchitez permanente (PMP) no pueden ser absorbidas por las raíces de las plantas, el total de agua disponible en la zona radicular se determina como la diferencia entre los contenidos de humedad a capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, multiplicada por la profundidad de las raíces (Z_e).

$$AWC = Z_e \cdot (CC - PMP)$$

Los datos de capacidad de campo y punto de marchitez permanente se obtuvieron del European Soil Data Centre (ESDAC), concretamente del producto "3D Soil Hydraulic Database of Europe" con una resolución de cuadrícula de 250 m. Posteriormente, se calculó el promedio de los valores de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) en siete profundidades: 0, 5, 15, 30, 60, 100 y 200 cm. El cálculo realiza mediante la siguiente expresión:

$$Alm. cap(Prof.r * < 200) = 5 \frac{AWC_0 + AWC_5}{2} + 10 \frac{AWC_5 + AWC_{15}}{2} + 15 \frac{AWC_{15} + AWC_{30}}{2} + 30 \frac{AWC_{30} + AWC_{+60}}{2} + 40 \frac{AWC_{60} + AWC_{100}}{2} + (Prof.r - 100) * \frac{AWC_{100} + AWC_{200}}{2}$$

Para determinar la profundidad del manto rocoso (ROO), se emplearon los datos proporcionados por el ISRIC World Soil Information, específicamente, el producto SoilGrid 2017 con una resolución de cuadrícula de 250 m. Se destaca que la mayor parte de la zona analizada alcanza el valor máximo del producto, el cual es de 2 m, como se indica en la Figura 3-14. Finalmente, el valor del mapa de almacenamiento estático Hu se indica en la Figura 3-15

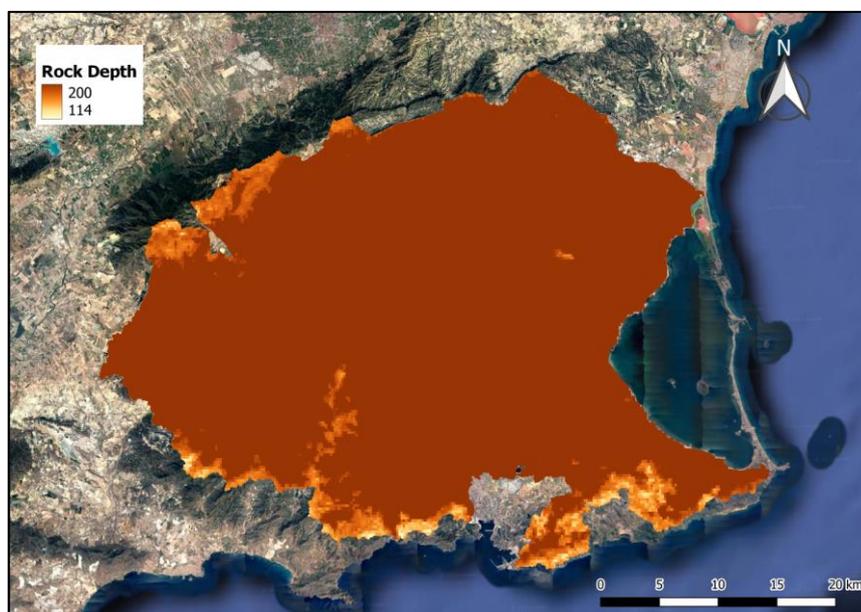


Figura 3-14 Profundidad de la roca en zona de estudio.

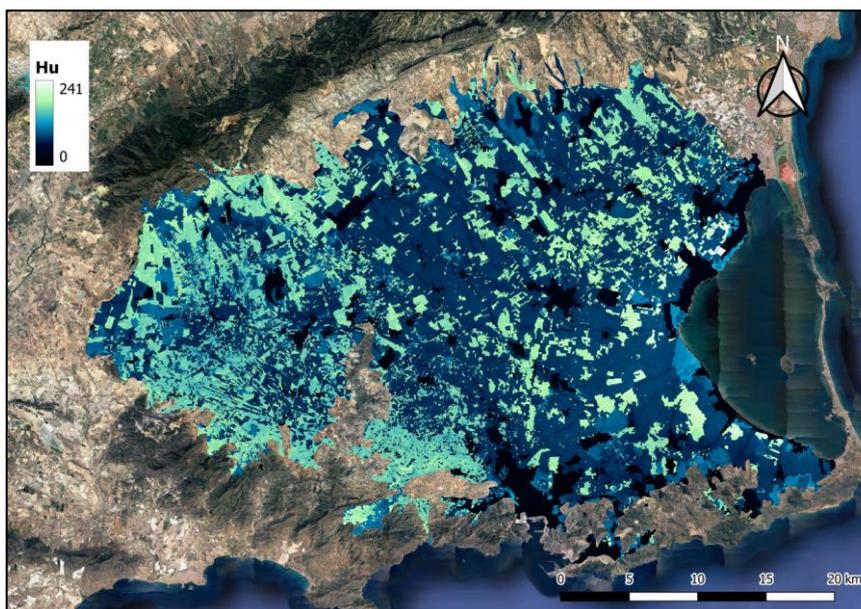


Figura 3-15 Almacenamiento estático Hu.

3.1.6.2. Capacidad de infiltración del suelo ks y kss

La conductividad hidráulica K_s y K_{ss} [mm/h] se obtuvieron a partir de dos fuentes: el "3D Soil Hydraulic Database of Europe" del European Soil Data Centre (ESDAC), con una resolución de cuadrícula de 250 m, y el producto "SoilGrid 2017" de ISRIC World Soil Information, con la misma resolución. Vale destacar que, para los usos de suelo de invernaderos, se consideró un valor específico de K_s de 0.01mm/h. Los mapas de K_s y K_{ss} se presentan en la Figura 3-16 y Figura 3-17 respectivamente.

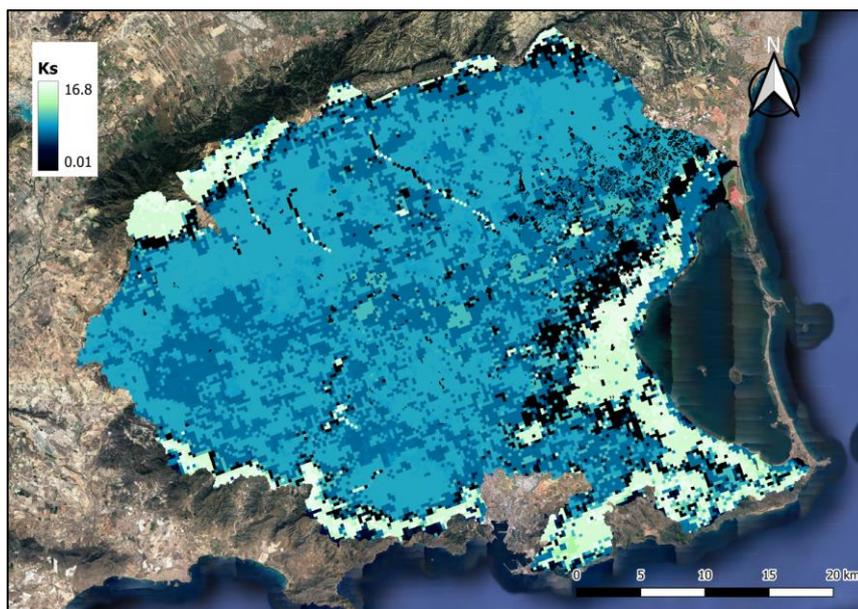


Figura 3-16 Mapa conductividad hidráulica K_s [mm/h].

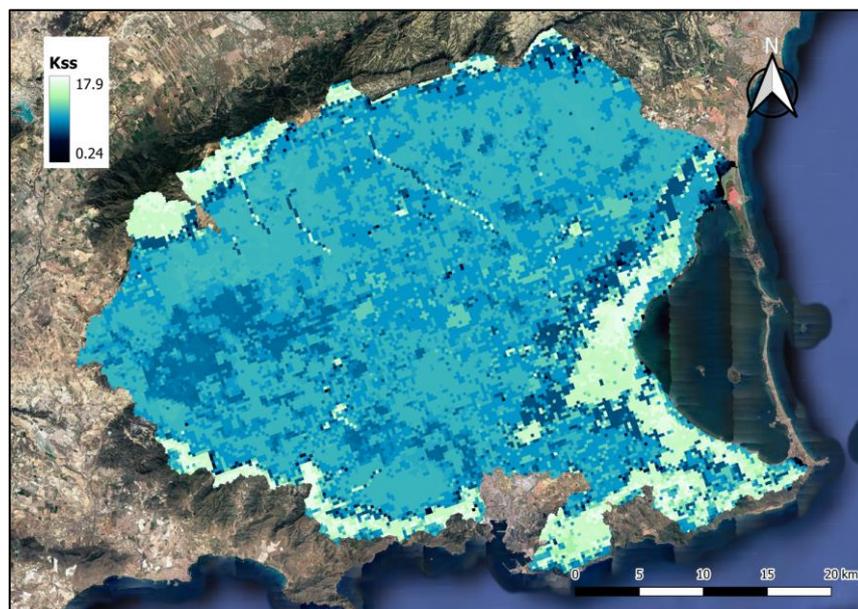


Figura 3-17 Mapa conductividad hidráulica horizontal K_{ss} [mm/h].

3.1.6.3. Capacidad de percolación del sustrato K_p

Para este mapa, se ha considerado que el último estrato conocido de K_s , es decir, a 2m de profundidad, sería equivalente a K_p . El mapa se indica en la Figura 3-18

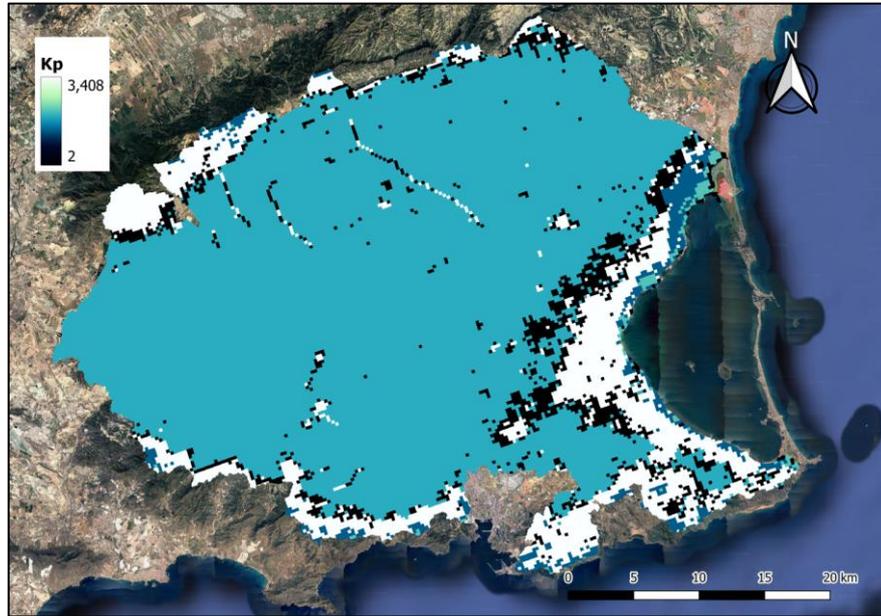


Figura 3-18 Capacidad de percolación K_p [mm/h].

3.2. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS SEDIMENTOS.

En este capítulo únicamente se describe la información necesaria para la implementación del modelo, ya que no se ha encontrado ningún estudio que aporte información acerca de los sedimentos en la zona de estudio. Además, tampoco existen registros de series temporales de transporte de sedimentos en suspensión.

3.2.1. PARÁMETROS DEL SUELO

En primer lugar, es necesario caracterizar la granulometría de la zona de estudio. Para ello el modelo emplea los mapas de contenido en arena, limo y arcilla. En este caso, se han empleado los mapas de European Soil Data Centre (ESDAC), en específico el producto European Soil Database Derived Data. Los mapas de textura se indican en la Figura 3-19

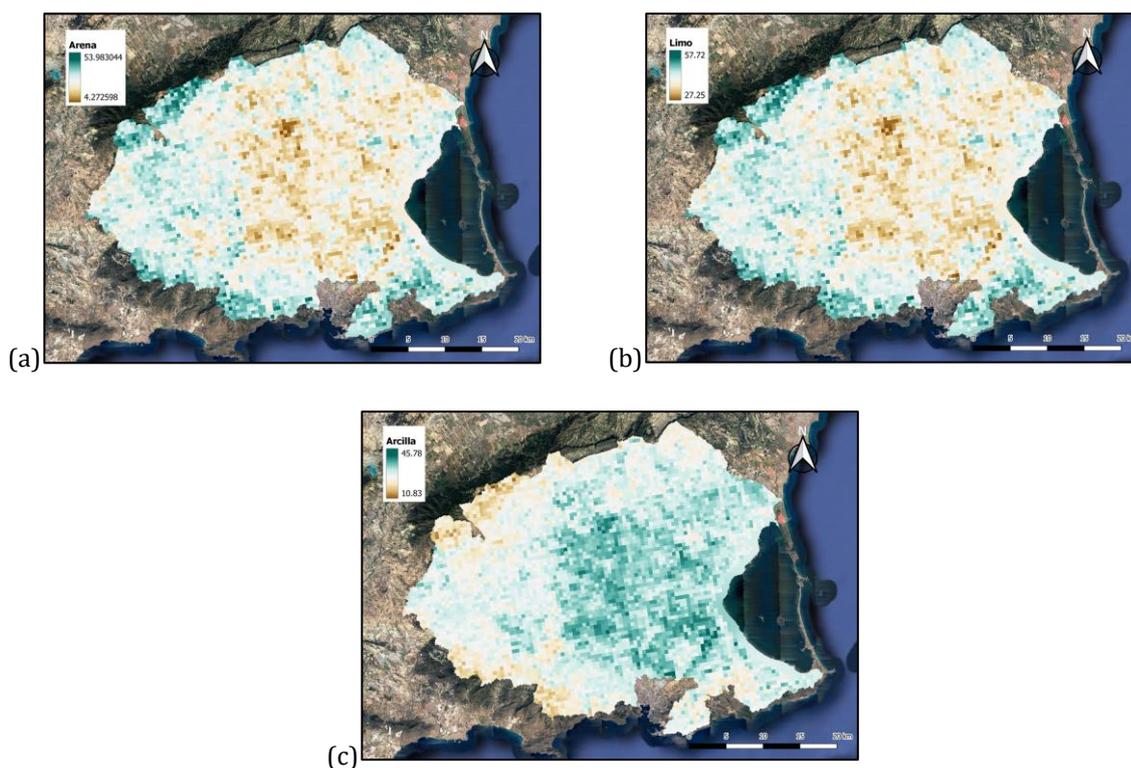


Figura 3-19 (a): Arena. (b): Limo. (c): Arcilla.

3.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO

A continuación, se presenta la información de entrada necesaria para la calibración del modelo: las series de precipitación, caudales y evapotranspiración potencial; se describen las fuentes de información de cada uno de los datos y el método de cálculo empleado en el caso de ser necesario. Los datos diarios de precipitación, caudales y evapotranspiración potencial de la zona de estudio, son los del periodo 2019-2023.

Es importante mencionar que este proceso de calibración se realiza mediante el mismo TETIS, con el algoritmo de optimización mono objetivo propio del software. Los factores correctores a considerar se indican en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6. Factores correctores hidrológicos.

Código TETIS	Parámetro
FC-1	Almacenamiento estático
FC-2	Evapotranspiración
FC-3	Infiltración gravitacional

3.3.1. PRECIPITACIÓN

Para la información de precipitación se utilizó el Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Segura, donde se recoge la información de precipitación diaria entre 2015 y 2023. Estos datos logran incluir el evento de septiembre 2019 donde se registró hasta 129mm/día. La media anual en la zona sur del Mar Menor es de 282 mm/año. Las series de las 6 estaciones se indican en la Figura 3-20. Las ubicaciones de cada una se indican en la Tabla 3-7.

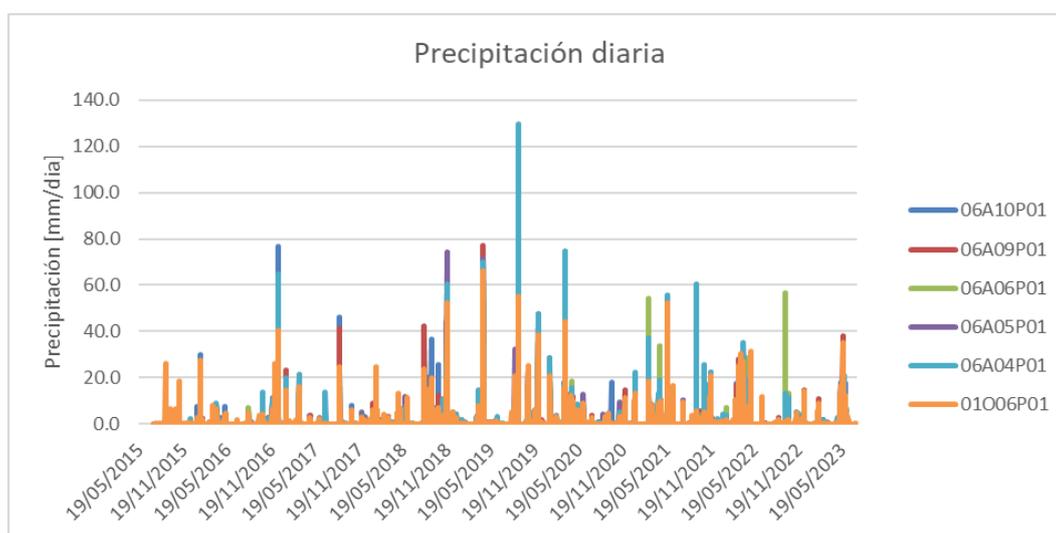


Figura 3-20 Precipitaciones diarias en estaciones SAIH.

Tabla 3-7 Estaciones pluviométricas sistema SAIH.

NOMBRE	X	Y
06A10P01	639177	4175465
06A09P01	645507	4170608
06A06P01	663436	4180084
06A05P01	661071	4176827
06A04P01	666775	4177129
01006P01	635832	4176391

3.3.2. CAUDALES

De igual forma que en el caso de las series de precipitación, se ha empleado la base de datos SAIH para el periodo 2019-2023 con la estación de caudal El Estrecho en la Rambla Albuñón. Los datos de los caudales medios diarios en [m³/s] se observan en la Figura 3-21.

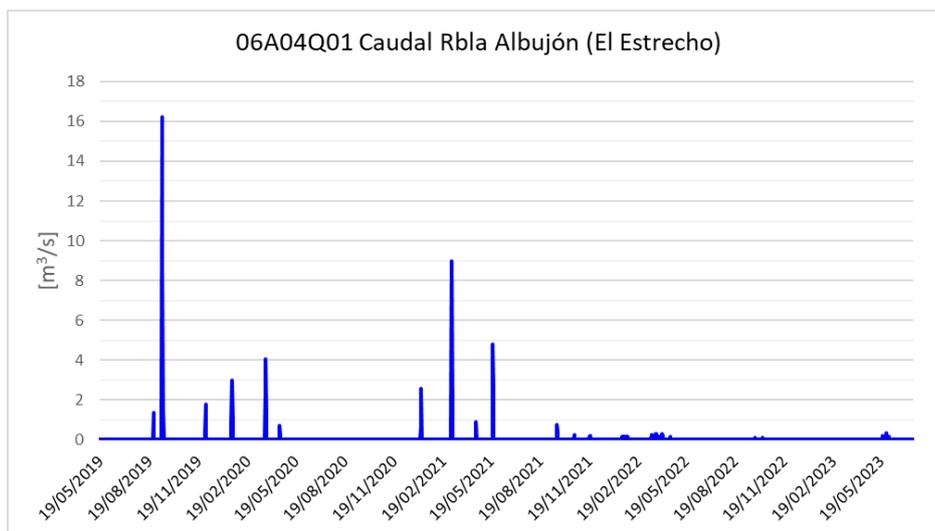


Figura 3-21 Caudales medios diarios estación El Estrecho.

3.3.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL ET0

Para la ET0 se ha empleado la información disponible en el Servicio Integral de Asesoramiento al Regante (SIAR) que entrega las series diarias registradas por las estaciones en red. Se ha recolectado información desde 2017 a 2023. La serie de valores para las 5 estaciones de evapotranspiración potencial, se indican en la Figura 3-22. Las ubicaciones de cada una se indican en la Tabla 3-8.

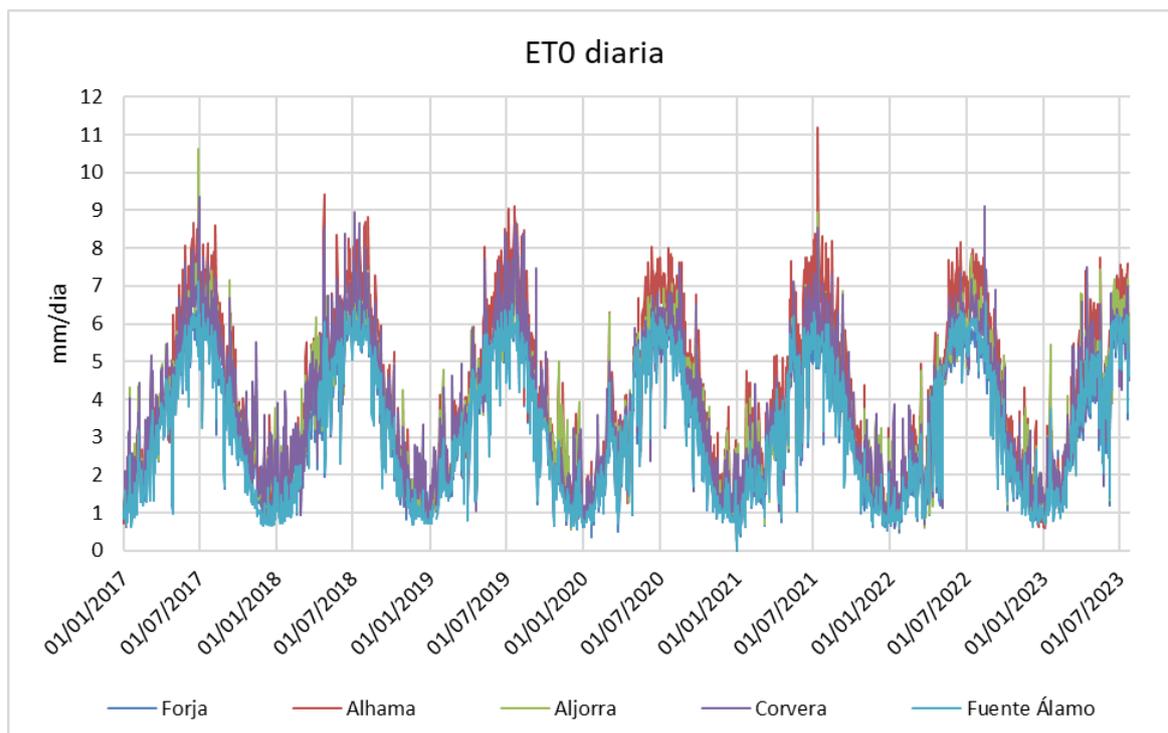


Figura 3-22 Evapotranspiración diaria en estaciones SIAR.

Tabla 3-8 Estaciones ET0 red SIAR.

NOMBRE	X	Y
Forja	664814	4179530
Alhama	639382	4183910
Aljorra	670824	4171706
Corvera	665199	4188760
Fuente Álamo	655351	4173880
Forja	664814	4179530

3.3.4. PERÍODOS A CONSIDERAR

La serie a utilizar en el proceso va desde el 22 de mayo de 2019 al 17 de junio de 2023, correspondiente al lapso en el cual existen registro de caudales en la estación El Estrecho (06A04Q01). En la Figura 3-23 se indica la ubicación de las estaciones pluviométricas, ETO y de caudales utilizada en la calibración. Para esto, la serie se divide en 3 partes: calentamiento (warm up), calibración y validación, definidas en la Tabla 3-9 cuyos resultados se detallarán en los numerales 3.3.5, 3.3.6 y 3.3.7 respectivamente.

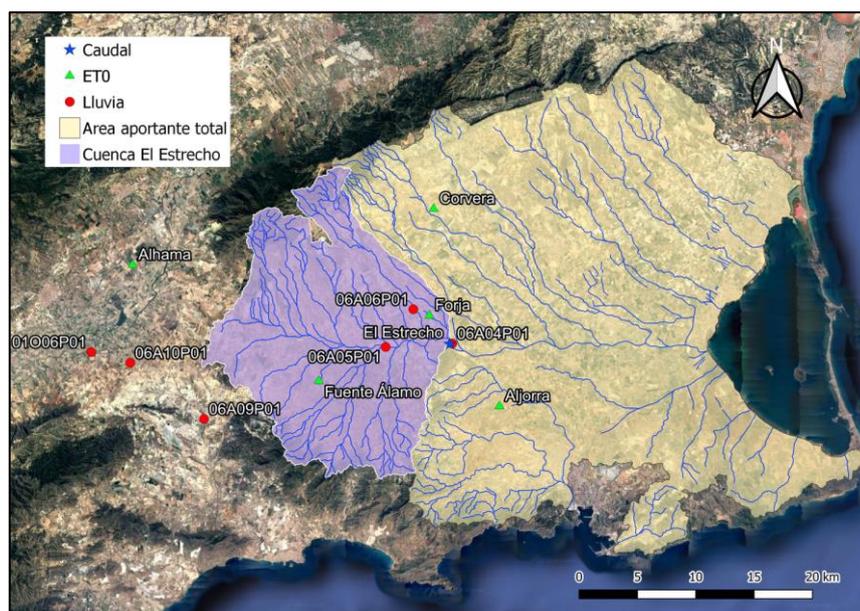


Figura 3-23 Estaciones para calibración del modelo.

Tabla 3-9 Fechas períodos proceso calibración.

Período	Inicio	Fin
Warm Up	25/05/2019	30/09/2019
Calibración	01/10/2019	01/01/2021
Validación	01/01/2021	17/07/2023

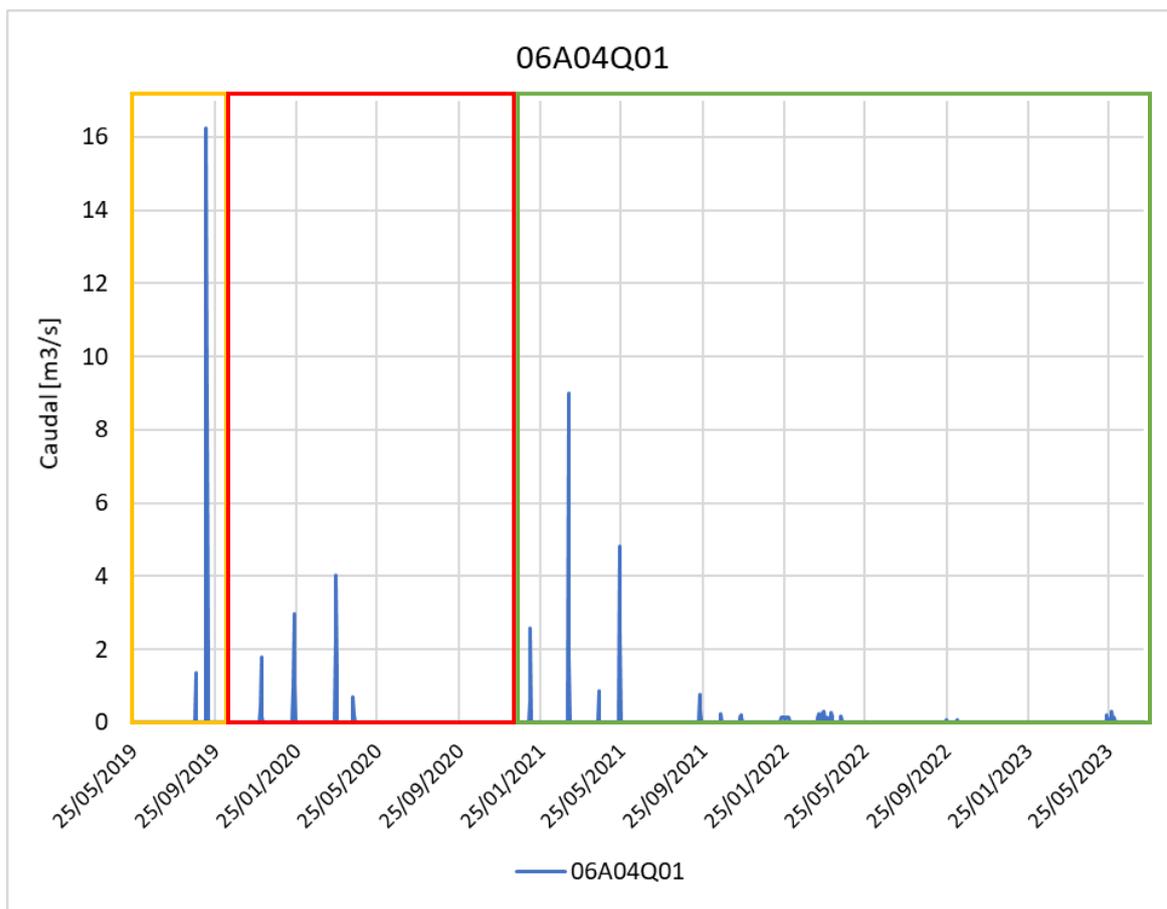


Figura 3-24 En recuadro naranja periodo calentamiento, en recuadro rojo calibración y en recuadro verde periodo de validación.

Adicionalmente, para verificar la bondad del ajuste con los parámetros calibrados, se ha calculado la raíz del error cuadrático medio (RMSE), que permite cuantificar la magnitud de la desviación estándar de los valores simulados respecto a los observados, en el cual el cero corresponde a un ajuste perfecto; el índice de Nash- Sutcliffe, que indica una simulación perfecta si el índice es igual a la unidad, se considera un ajuste muy bueno si es mayor a 0.6 y excelente si es mayor a 0.8.

3.3.5. PERÍODO CALENTAMIENTO

Para obtener el correcto estado inicial de humedad para la fase de calentamiento, se procede a una calibración específica de calentamiento, que incluye el evento del 13 de septiembre de 2019. Se asume la hipótesis que el suelo está en una condición seca antes de aquel evento.

Los resultados de la calibración se indican en la Tabla 3-10. La comparativa entre caudales simulados y caudales observados se indican en la Figura 3-25

Tabla 3-10 Resultados calentamiento.

Variable	Valor
Humedad Inicial	Cero
FC1	0.1001
FC2	1.5529
FC3	0.5719
Nash	0.9419
RMSE	0.382
Erro Vol	-8.81%
Fecha inicio	25/05/2019
Fecha Fin	30/09/2019

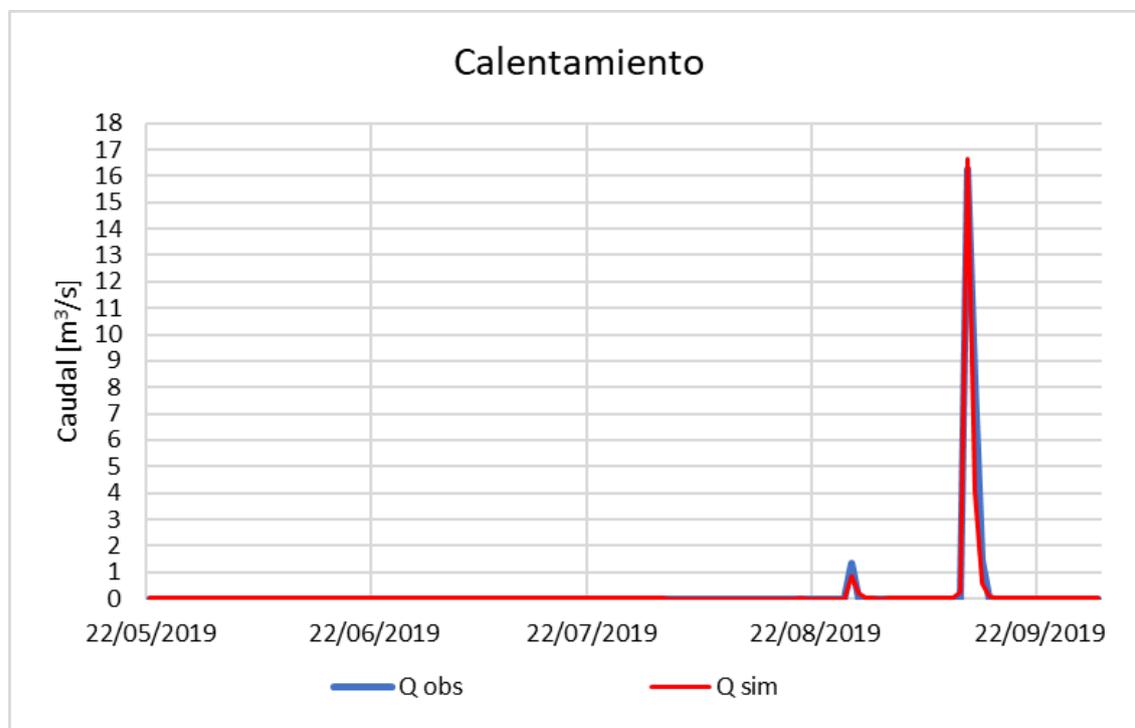


Figura 3-25 Caudales observados y simulados calentamiento.

3.3.6. PERÍODO CALIBRACIÓN

Asumiendo que el estado final del periodo de calentamiento corresponde con la realidad, se toma esa humedad final, como la humedad inicial para el periodo de calibración. Los valores se indican en la Tabla 3-11. La comparativa entre caudales simulados y caudales observados se indican en la Figura 3-26

Tabla 3-11 Resultados calibración.

Variable	Valor
Humedad Inicial	Fin WarmUp
FC1	0.3707
FC2	2.3127
FC3	0.4108
Nash	0.796
RMSE	0.13
Erro Vol	-0.34%
Fecha inicio	01/10/2019
Fecha Fin	01/01/2021

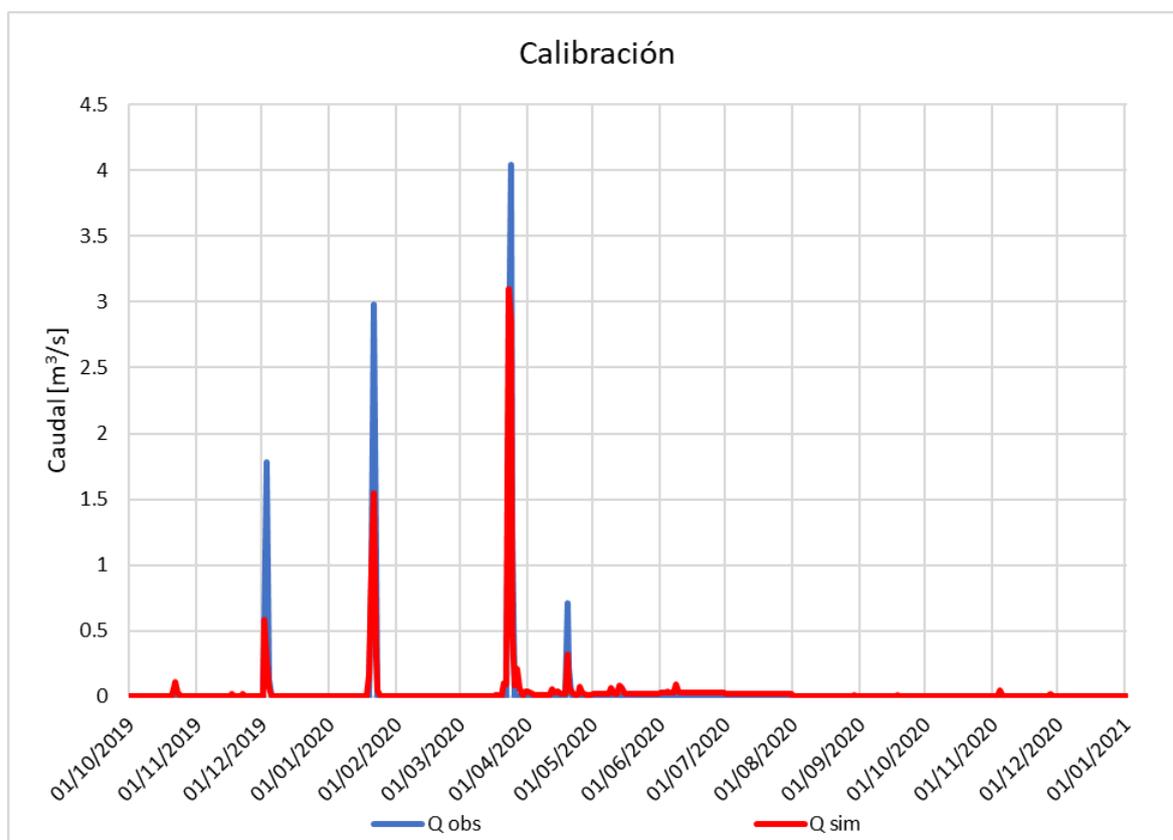


Figura 3-26 Caudales observados y simulados de período de calibración.

3.3.7. PERÍODO VALIDACIÓN

Con los factores correctores obtenidos mediante el período de calibración se lanza el modelo TETIS, los valores se indican en la Tabla 3-12. En la Figura 3-27 se indican los caudales simulados, y caudales observados.

Tabla 3-12 Resultados validación

Variable	Valor
Humedad Inicial	Fin Calibración
FC1	0.3707
FC2	2.3127
FC3	0.4108
Nash	0.1747
RMSE	0.329
Erro Vol	-18.80%
Fecha inicio	01/01/2021
Fecha Fin	17/07/2023

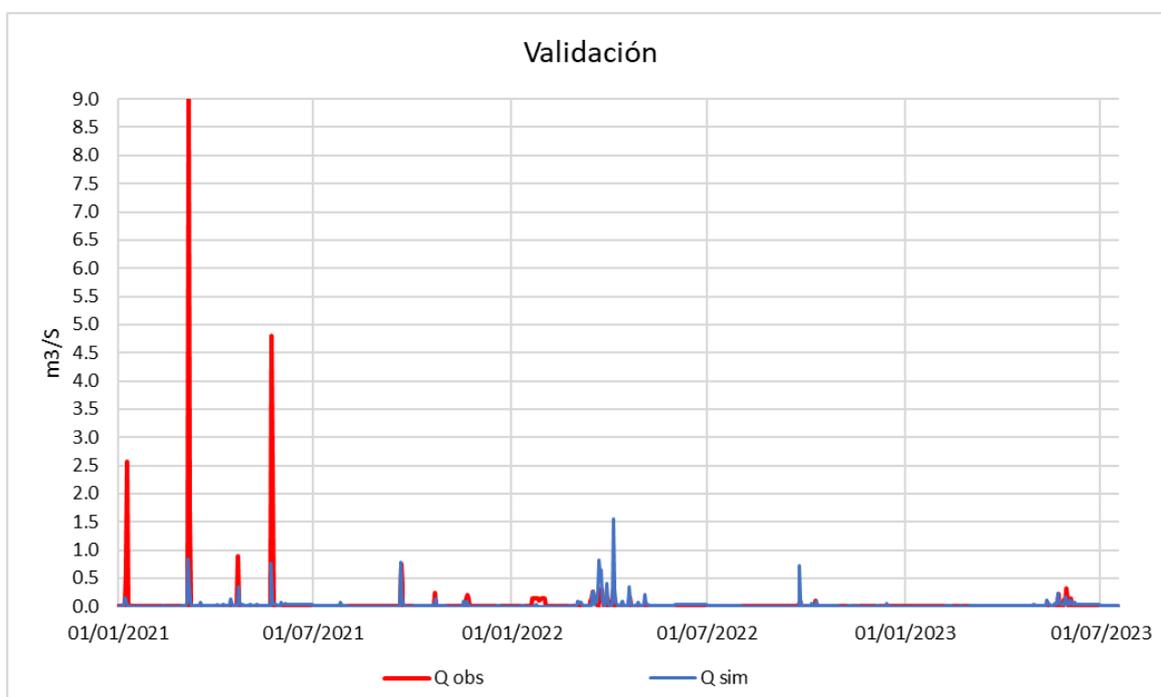


Figura 3-27 Caudales observados y simulados de período de validación.

3.3.8. COMENTARIOS

Se observa que la validación es capaz de identificar la dinámica de la escorrentía y los hidrogramas de los eventos importantes en cuanto a forma y tiempo. Sin embargo, se observa que la magnitud de estos en ocasiones difiere de lo observado.

En algunos períodos (05-2022 a 07-2022), una escorrentía simulada permanente con valores cercanos a los $0.03\text{m}^3/\text{s}$ que no está representada en los caudales observados.

Estos flujos simulados permanentes no están asociados a las precipitaciones. Al revisar los balances de los tanques del modelo se observa una relación directa entre la escorrentía y las aportaciones generadas por el riego. (Figura 3-28)

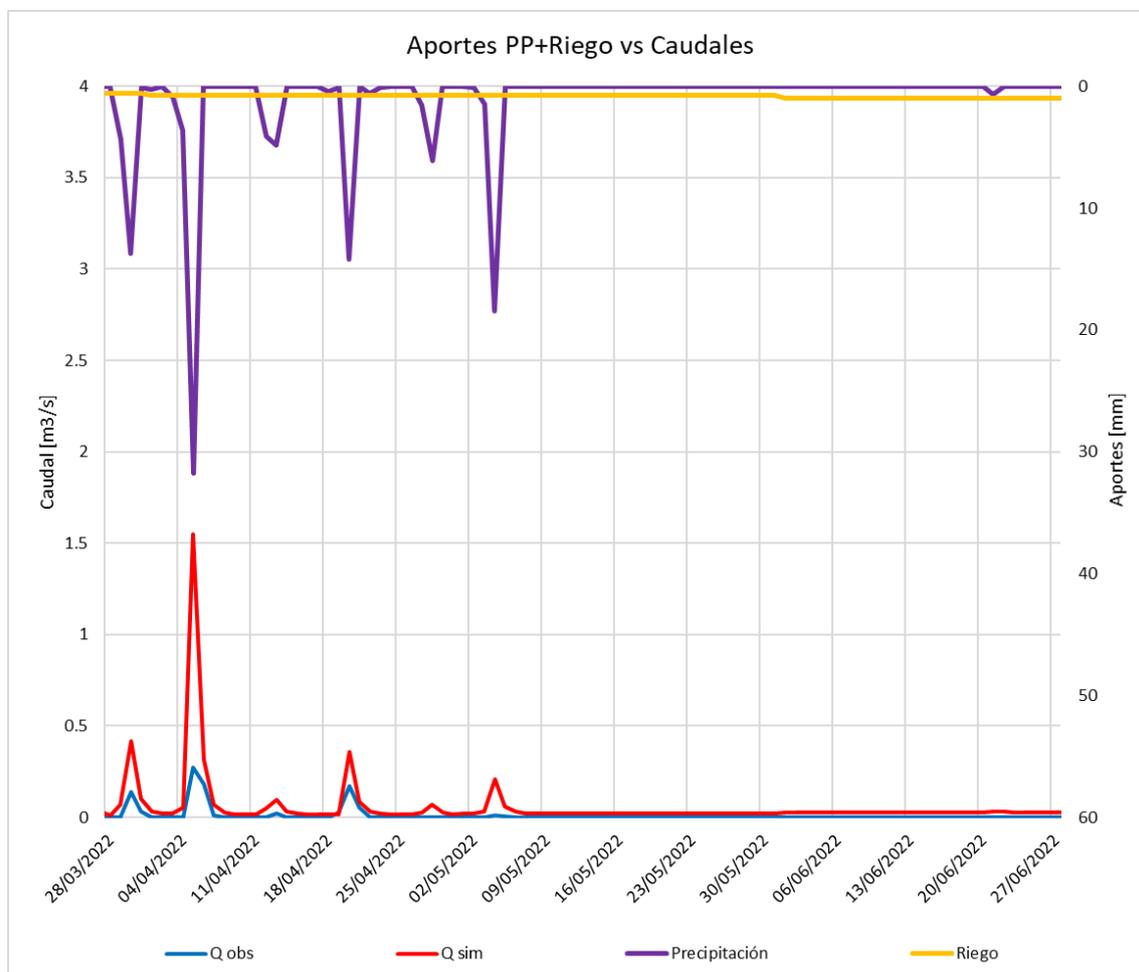


Figura 3-28 Aportes precipitación y riego vs caudales.

3.4. SIMULACIÓN ZONA APORTANTE TOTAL

El modelo TETIS fue lanzado con la información de Harmonie-Aemet para un período de 700 días (1-10-2020 al 31-08-2022). Los balances de agua, separados en las 4 zonas, se indican en la Tabla 3-13.

Los balances muestran que el sector norte presenta las mayores dotaciones de riego, evapotranspiración y escorrentía superficial. Entre el 67% y el 75% de los aportes de precipitación y riego resultan evapotranspirados. Entre el 1% y el 8% de esos mismos aportes, terminan como escorrentía superficial.

Con respecto a los sedimentos, en la Tabla 3-14 se observa que estos están totalmente por debajo de los órdenes de magnitud esperados. Esto se debe a que, si bien el modelo está calibrado para agua, es requerida una calibración de sedimentos que permita afinar a futuro los resultados.

No se realizó una modelación de nitrógeno debido a que no se disponen de datos de dosis/tipos de fertilización, fechas de fertilización que permitan el correcto funcionamiento del módulo de nitrógeno.

Tabla 3-13 Balances agua [mm/año].

Sector	Precipitación	Riego	Evapotranspiración	Escorrentía superficial	Recarga acuífero
Norte	367.2	339.3	518.4	54.3	97.2
Albuñón	392.1	266.6	497.1	9.6	108.9
Ramblas	406.9	199.0	426.2	5.5	128.4
Sur	356.3	196.5	373.1	17.1	115.1

Tabla 3-14 Balances sedimentos año

Escenario	Erosión		Aporte de sedimentos al Mar Menor	
	(t/ha)	(m ³)	(t/ha)	(m ³)
Norte	0.004909	75.50	0.003945	60.7
Albuñón	0.004283	110.70	0.003607	93.2
Ramblas	0.005168	36.23	0.004523	31.7
Sur	0.004424	14.73	0.003388	11.3

4. CONCLUSIONES

El presente Trabajo de Fin de Máster (TFM) aborda el problema existente en la laguna costera del Mar Menor, ubicada en la región de Murcia, España. Esta laguna ha experimentado un deterioro en la calidad de sus aguas debido a la contaminación difusa proveniente del aumento desregulado de la agricultura intensiva y minas a cielo abierto abandonadas. Con la motivación de encontrar soluciones a esta problemática, se ha llevado a cabo la modelación del Mar Menor mediante la utilización del software eco-hidrológico TETIS. El primer modelo analizado opera a escala local y se enfoca en la evaluación de medidas de gestión para controlar los aportes de sedimentos y nitrógeno. El segundo modelo busca representar un modelo a escala global que sirva a futuro como plataforma de evaluación de medidas a gran escala, siendo una herramienta de apoyo a la decisión a partir de predicciones a corto y mediano plazo, las cuales van más allá del alcance de este TFM.

A escala local, se han evaluado 5 medidas: Áreas de Renaturalización (ARN), balsas de interceptación (COAG), franja buffer, agricultura de precisión y aplicación de la Ley3/2020. Cabe mencionar que las evaluaciones de medidas no consideran aspectos económicos, legales o administrativos inherentes a la implementación de cada una. Los comentarios de estas actuaciones se basan en los balances finales del apartado 2.7.2.

ARN: En relación a las variables relacionadas con el agua en las Áreas de Restauración Natural (ARN), la disminución en el riego se origina por la eliminación de suelos destinados a cultivos regados. La evapotranspiración, por su parte, se reduce debido a que las especies vegetales utilizadas en las ARN son de bajo consumo, como olivos, algarrobos o cornicabrales.

Con respecto a los sedimentos, la disminución de la erosión y aporte de sedimentos se debe al uso de terrazas y modificación de la pendiente media de todas las ARN, disminuyendo la velocidad de escurrimiento en laderas y cárcavas. Otro motivo de disminución de la erosión es el uso de barreras vegetales en el perímetro de las ARN, con arbustos y herbáceas, además de una mayor profundidad de raíces con respecto a los cultivos hortícolas de la cobertura anterior.

Las variaciones en nitrógeno, como fertilización y asimilación vegetal, se debe indirectamente a la anulación de un suelo que estaba fertilizado. Consecuentemente las escorrentías de nitrógeno y percolación disminuyen debido a que existe una menor cantidad de fertilizantes nitrogenados presentes en el área.

Si bien esta actuación tiene buenos resultados, es necesario recordar que la actuación original cubre una superficie de 7km² (un 24% de las cuencas afectadas). La modificación de uso de suelo de cultivos por ARN podría encontrar una resistencia desde los agricultores debido a la eliminación de zonas actualmente productivas mediante expropiaciones. El escalamiento a toda la Zona Aportante Sur considera una superficie de 24km², lo cual podría generar problemas de implementación no evaluadas en este TFM.

COAG: Las balsas propuestas por la COAG presentan muy buenos resultados en cuanto a la reducción de la escorrentía superficial hacia el Mar Menor. Sin embargo, carece de impacto en aspectos como la cantidad de riego, la evapotranspiración y la percolación. En relación a los sedimentos, al no alterar el uso de suelo, no cambia la erosión. No obstante, se observa una disminución significativa en el aporte de sedimentos hacia el Mar Menor en la medida que son retenidos por estas balsas.

En cuanto a nitrógeno, sólo tiene efecto en su escorrentía al estar transportado en el agua y sedimentos, que luego retenidos por los embalses. Fertilización, asimilación vegetal o percolación no son afectadas por la solución COAG.

Esta solución nace desde la Coordinadora de Organizaciones de Agricultores y Ganaderos (COAG), debido a la reticencia ante modificaciones de uso de suelo que afecten sus actividades económicas. La principal ventaja de esta solución es que mantiene la producción de cultivos con una intervención mínima en el área, sin embargo, no trata el origen de la contaminación difusa al Mar Menor.

Por último, es importante destacar una utilidad adicional que se escapa del alcance de este documento: la protección contra inundaciones en áreas urbanas que proporciona esta solución mediante la laminación de las crecidas.

Buffer: Este escenario presenta resultados exiguos en cuando a disminuciones en los aportes de riego, evapotranspiración, escorrentía, percolación, erosión y aporte de sedimentos al Mar Menor. No obstante, los beneficios empiezan a ser visibles cuando se consideran los aportes de nitrógeno: fertilización, asimilación vegetal, escorrentía y percolación.

La disminución de riego se debe a la eliminación de tierras regadas en la franja de 0 m a 500 m y el reemplazo del 20% del área de cultivos con riego (cítricos y hortalizas) por barreras vegetales que no requieren riego.

La baja disminución de la erosión se atribuiría a que las barreras vegetales y prácticas de cultivo (siguiendo las curvas de nivel), son poco sensibles cuando los cultivos están ubicados en zonas de baja pendiente, como son las zonas cercanas al Mar Menor.

Agricultura de precisión: Presenta resultados aceptables en la disminución de los aportes de riego y evapotranspiración. La escorrentía y percolación aumentan debido a la disminución de 3 a 2 cultivos anuales en el uso de suelo hortícola, dejando una ventana de tiempo sin cobertura vegetal que anula la transpiración en esos periodos.

La disminución de erosión y aporte de sedimentos al Mar Menor se debe a que el 5% de los usos de suelo hortícolas, cebada y cítricos corresponden a barreras vegetales, además de cultivo siguiendo curvas de nivel (cultivos en contornos).

Con respecto a la disminución en los aportes de nitrógenos, resulta una medida excelente al actuar directamente sobre el origen de la contaminación por nitratos: los fertilizantes, al regular la dosificación para cada cultivo. Esto se refleja en la disminución del abono. La escorrentía de nitrógeno y percolación también disminuyen considerablemente.

Este escenario se basa en un ajuste en la aplicación de fertilizantes mediante balances para ajustar con precisión a los requerimientos recomendados para cada cultivo en específico.

Ley3/2020: Es el escenario que mayor disminución en los aportes de riego y evapotranspiración presenta. Al igual que el escenario anterior, aumenta ligeramente la escorrentía y la percolación, debido a que las rotaciones de cultivos pasan de 3 a 2 anuales, dejando un periodo con el suelo desnudo.

La disminución en la erosión y aporte de sedimentos al Mar Menor resulta igual a las del escenario de Agricultura de Precisión.

Con respecto a la disminución en los aportes de nitrógenos, resulta ser el escenario con mejores resultados en fertilización, asimilación vegetal y percolación.

Este escenario resulta muy favorable como medida de gestión de los aportes de nitrógeno al Mar Menor, debido a su afección a toda la Zona Aportante Sur.

Estos escenarios modelados localmente sirven como referencia para posibles actuaciones futuras, que podrían diseñarse como medidas aplicables a nivel global en toda el área del Mar Menor.

Finalmente, es importante considerar que cada medida de gestión presenta sus propias ventajas y desventajas inherentes a su lógica de aplicación. Por lo tanto, al crear políticas gubernamentales, se debe considerar que no existe una única solución y la concomitancia de soluciones resulta beneficiosa para lograr el objetivo de remediación del ecosistema del Mar Menor.

En la Zona Aportante Total se elaboró un modelo eco-hidrológico TETIS desde cero, con una resolución espacial de 25 metros y una escala temporal diaria, que considera toda la superficie que tiene escorrentía al Mar Menor o que tiene recarga al Acuífero de Cartagena. Estas dos condiciones abarcan un área de 1416 km².

Para la calibración del modelo se ha utilizado como fuente principal de información la disponible en el Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Confederación Hidrográfica del Segura. Considerando que la rambla del Albujón en la estación de aforos del Estrecho presenta caudales efímeros, se pretende que la calibración sea capaz de reconocer y diferenciar dinámica de la escorrentía y los eventos importantes. Para ello, se han utilizado las series temporales de varios meses, que incluyen varios eventos de escorrentía.

Para aislar el comportamiento del acuífero, se han modificado los factores correctores de las pérdidas subterráneas (FC7=100,000,000) y del flujo base (FC8=0). De esta manera se anula cualquier interacción del acuífero con la escorrentía superficial.

En los resultados de la simulación, el interflujo ha adoptado en el proceso de calibración automática valores nulos naturalmente. También en ciertos periodos existe escorrentía directa sin precipitación, interflujo o flujo base asociado. Esto se debe a que existen aportes por riego suficientemente importantes para generar escorrentía directa. Cabe mencionar el modelo TETIS aplica dotaciones de riego promedio de 225.2mm/año.

La calibración resulta satisfactoria considerando el alcance mencionado, pues es capaz de capturar la dinámica de los hidrogramas.

La simulación de la Zona Aportante Total de agua, presenta resultados dentro de los órdenes de magnitud vistos en la Zona Aportante Sur en cuanto a precipitación, riego y evapotranspiración. Con respecto a los valores de sedimentos, la simulación total arroja valores varios órdenes de magnitud por debajo de lo visto en la Zona Aportante Sur, por lo cual se hace patente una necesidad de calibrar sedimentos a futuro. No se realizó en el modelo total balances de nitrógeno al no disponer de información de dosis, tipo o fechas de fertilización.

Finalmente, mencionar que el alcance de la Zona Aportante Total es sólo la implementación de un modelo TETIS que permita funcionar como plataforma para que, a futuro, pueda ser utilizado como herramienta de predicción a corto (días) y media plazo (subestacional) a partir de predicciones meteorológicas y que sea instalado en organismos como el Observatorio del Mar Menor.

ANEXO 1. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Alatorre, L.C., Beguería, S., García-Ruiz, J.M., (2010). Regional scale modeling of hillslope sediment delivery: A case study in the Barasona Reservoir watershed (Spain) using WATEM/SEDEM. *Journal of Hydrology*. 391, pp. 109–123.
- Albaladejo, J., Ortiz, R., Martínez-Mena, M. (1988). Evaluation and mapping of erosion risks: an example from S.E. Spain. *Soil Technology*, 1, pp. 77-87.
- Aragón, R., Jiménez-Martínez, J., García-Aróstegui, J.L., Hornero, J. (2009). Hidrogeología y recursos hídricos subterráneos en el área Campo de Cartagena – Mar Menor. En: *El Mar Menor. Estado actual del conocimiento científico*. Instituto Euromediterráneo del Agua, España, pp. 89-108.
- Arco Sur (2017). *Cuantificación de la descarga subterránea al Mar Menor mediante modelización hidrogeológica del acuífero superficial Cuaternario*. Comunidad de Regantes Arco Sur, Murcia.
- Ballabio, C., Panagos, P., Montanarella, L. (2016). Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database. *Geodema*, 261, pp. 110-123.
- Blanco, H., Lal, R. (2008). *Principles of soil conservation and management*. Springer Dordrecht Heidelberg London New York.
- Bussi, G., Francés, F., Montoya, J.J., Julien, P.Y. (2014). Distributed sediment yield modelling: Importance of initial sediment conditions. *Environmental Modelling & Software*, 58, pp. 58-70.
- CAAMA (2016a). *Proyecto de acciones correctoras frente al riesgo de inundación en el entorno de la urbanización de Los Nietos. T.M. Cartagena (Murcia)*. Consejería de Agua, Agricultura y Medio Ambiente. Región de Murcia.
- CAAMA (2016b). *Proyecto de acciones correctoras frente al riesgo de inundación en el entorno de las urbanizaciones de Islas Menores y Mar de Cristal. T.M. Cartagena (Murcia)*. Consejería de Agua, Agricultura y Medio Ambiente. Región de Murcia.
- CARM (2017). *Decreto-Ley nº. 1/2017, de 4 de abril, de medidas urgentes para garantizar la sostenibilidad ambiental en el entorno del Mar Menor*. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

- CARM (2018). Ley 1/2018, de 7 de febrero, de medidas urgente para garantizar la sostenibilidad ambiental en el entorno del Mar Menor. Boletín Oficial de la Región de Murcia.
- CEDEX (2011). Mapa de caudales máximos. Memoria Técnica. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 73 pp.
- CHS (2015). *Plan hidrológico de la demarcación del Segura 2015/21*. Confederación hidrográfica del Segura.
- Clapp, R. B., Hornberger, G. M. (1978). Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resources Research*, 14(4), pp. 601-604.
- CNIG (2016a). Lidar con densidad de 0.5 puntos/m². Centro Nacional de Información Geográfica.
- CNIG (2016b). Modelo digital del terreno con paso de malla de 5m. Centro Nacional de Información Geográfica.
- CNIG (2018). Modelo digital del terreno con paso de malla de 25m. Centro Nacional de Información Geográfica.
- D’Odorico, P., Laio, F., Porporato, A., Rodriguez-Iturbe, I. (2003). Hydrologic controls on soil carbon and nitrogen cycles. II. A case study. *Advances in Water Resources* 26, pp. 59-70.
- EEA (2018). Corine Land Cover, 2018. European Environment Agency.
- Engelund, F., Hansen, E. (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streams. Monograph, Denmark Technical University, Hydraulic Laboratory, 62 pp.
- FAO (2006). *Estudio FAO riego y drenaje, 56. Evapotranspiración del cultivo, guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Food and Agriculture Organization.
- Francés, F., Vélez, J.I, Vélez, J.J. (2007). Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 332(1-2), pp. 226-240.
- Gallardo, M., Giménez, C., Martínez-Gaitán, C., Stöckle, C.O., Thompson, R.B., Granados, M.R. (2011). Evaluation of the VegSyst model with muskmelon to simulate crop growth, nitrogen uptake and evapotranspiration. *Agricultural water management*. 101(1), pp. 107-117.

- García-Aróstegui, J.L., González, G., María Dolores, E., Marín, F., Martínez, D., Vicente, J.R. (2017). Hidrogeología. En: *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*. Comité de asesoramiento científico del Mar Menor. Consejería de Agua, Agricultura y Medio Ambiente. Región de Murcia.
- García-Gómez, H., Garrido, J.L., Vivanco, M.G., Lassaletta, L., Rábago, I., Àvila, A., Tsyro, S., Sánchez, G., González-Ortiz, A., González-Fernández, I., Alonso, R. (2014). Nitrogen deposition in Spain: Modeled patterns and threatened habitats within the Natura 2000 network. *Science of the total environment*, 485-486, pp. 450-460.
- García-Serrano, P., Ruano, S., Lucena, J.J., Nogales, M. (2010). El suelo, los nutrientes, los fertilizantes y la fertilización. En: *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Gobierno de España.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. In Agric.*, 1(2): pp. 96-99.
- HEC (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical reference manual*. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J.M. (2016). Update of the Spain02 gridded observational dataset for Euro-CORDEX evaluation: assessing the effect of the interpolation methodology. *International Journal of Climatology*, 36, pp. 900-908.
- Hiederer, R. (2013). *Mapping soil properties for Europe – Spatial representation of soil database attributes*. Luxembourg: publications office of the European Union, 47pp. EUR26082EN Scientific and technical research series.
- IIAMA (2018). *Informe sobre el análisis de afecciones de diferentes actuaciones en la zona sur del Mar Menor sobre aportaciones a la laguna de agua, sedimentos y nitrógeno*. Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente.
- ICONA (1988). *Agresividad de la lluvia en España. Valores del factor R de la ecuación universal de pérdidas de suelo*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto de la Conservación de la Naturaleza
- IGME (1991). *Estudio hidrogeológico del Campo de Cartagena*. Instituto Geológico y Minero de España.
- IGME (2003). *Mapa geológico de España. Escala 1:50,000*. Instituto Geológico y Minero de España.

- IGME (2013). Mapa de permeabilidad cualitativa del acuífero. Escala 1:200,000. Instituto Geológico y Minero de España.
- Julien, P.Y., Rojas, R. (2002). Upland erosion modeling with CASC2D-SED. *International Journal of Sediment Research*, 17(4), 265-274.
- Julien, P.Y., 2010a. Erosion and sedimentation. Second edition, Cambridge University Press. 280 pp.
- Julien, P.Y., 2010b. Erosion and sedimentation. Second edition, Cambridge University Press. 371 pp
- Jung, Y.W., Oh, D.-S., Kim, M., Park, J.-W. (2010). Calibration of LEACHN model using LH-OAT sensitivity analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 87, pp. 261-275.
- Kimmins, J.P. (2004). *Forest ecology: a foundation for sustainable forest management and environmental ethics in forestry*. Pearson Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Lidón, A., Ramos, C., Ginestar, D., Contreras, W. (2013). Assessment of LEACHN and a simple compartmental model to simulate nitrogen dynamics in citrus orchards. *Agricultural Water Management*, 121, pp. 42-53.
- López, L. (2010). Abonado de los cereales de invierno: trigo y cebada. En: *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Gobierno de España.
- López, M.V., Arrúe, J.L., Álvaro-Fuentes, j., Moret, D. (2005). Dynamics of Surface barley residues during fallow as affected by tillage and decomposition in semiarid Aragon (NE Spain). *European Journal of Agronomy*. 23(1), pp. 26-36.
- López-Vicente, M., Navas, A. (2009). Predicting soil erosion with RUSLE in Mediterranean agricultural systems at catchment scale. *Soil Science*, 174(5), pp. 272-282.
- Mintegui, J.A., De Simón, E., García- Rodríguez, J.L., Robredo, J.C. (1993). *La restauración hidrológico-forestal en las cuencas hidrográficas de la vertiente mediterránea*. *Información Técnica nº 22/93*. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., van der Zanden, E.H., Poesen, J., Alewell, C. (2015). Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. *Environmental Science & Policy*, 51, pp. 23-34.

- Puertes et al. (2021). Best management practices scenario analysis to reduce agricultural nitrogen loads and sediment yield to the semiarid Mar Menor coastal lagoon (Spain). *Agricultural Systems* 188, 103029
- Puricelli, M.M. (2003). *Estimación y distribución de parámetros del suelo para la modelación hidrológica*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València.
- Quiñones, A., Martínez, B., Primo-Millo, E., Legaz, F. (2010). Abonado de los cítricos. En: *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Gobierno de España.
- Pärn, J., Gilles, P., Mander, Ü. (2012). Indicators of nutrients transport from agricultural catchments under temperate climate: A review. *Ecological Indicators* 22, pp. 4-15.
- Rahn C. R., Zhang K., Lillywhite R., Ramos C., Doltra J., de Paz J.M., Riley H., Fink M., Nendel C., Thorup-Kristensen K., Pedersen A., Piro F., Venezia A., Firth C., Schmutz U., Rayns F., Strohmeyer K., (2010). EU-Rotate_N – a Decision Support System – to Predict Environmental and Economic Consequences of the Management of Nitrogen Fertiliser in Crop Rotations. *European Journal of Horticultural Science* 75(1), pp. 20-32.
- Ramos, C., Pomares, F. (2010). Abonado de los cultivos hortícolas. En: *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Gobierno de España.
- Rankinen, K., Granlund, K., Futter, M. N., Butterfield, D., Wade, A.J., Skeffington, R., Arvola, L., Veijalainen, N., Huttunen, I., Lepistö, A. (2013). Controls on inorganic nitrogen leaching from Finnish catchments assessed using a sensitivity and uncertainty analysis of the INCA-N model. *Boreal Environment Research*, 18, pp. 373-386.
- Renard, K.G., Laflen, J.M., Foster, G.R., McCoo, D.K. (1994). The revised universal soil loss equation. *Soil erosion research methods*, pp. 105-124.
- Rincón, L., Sáez, J., Pérez-Crespo, J.A., Gómez-López, M.D., Pellicer, C. (1999) Crecimiento y absorción de nutrientes del brócoli. *Investigación Agraria. Producción y protección vegetal* 14(1-2), pp. 225-236.
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., Papendick, R.I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America*, 50(4), pp. 1031-1036.
- Senent, M., Martínez, D., Cabezas, F., García-Aróstegui, J.L. (2009). Aproximación mediante modelización matemática a la evaluación de las descargas del acuífero cuaternario del

- Campo de Cartagena al Mar Menor (Murcia). En: *El Mar Menor. Estado actual del conocimiento científico*. Instituto Euromediterráneo del Agua, España, pp. 109-130.
- Soria, A. (2008). *La fertirrigación del limonero*. Oficina Comarcal Agraria "Huerta de Murcia". Consejería de Agua, Agricultura y Medio Ambiente. Región de Murcia.
- Suárez-Rey, E.M., Romero-Gámez, M., Giménez, C., Thompson, R.B., Gallardo, M. (2016). Use of EU-Rotate_N and CropSyst models to predict yield, growth and water and N dynamics of fertigated leafy vegetables in a Mediterranean climate and to determine N fertilizer requirements. *Agricultural Systems*. 149, pp. 150-164.
- Subbarao, K.V., Hubbard, J.C. (1999). Evaluation of broccoli residue incorporation into field soil for verticillium wilt control in cauliflower. *Plant disease*. 83(2), pp. 124-129.
- Témez, J.R. (1991). Generalización y mejora del método racional. Versión de la Dirección General de Carreteras de España. *Ingeniería Civil*, 82, pp. 51-56.
- Van Vooren, L., Reubens, B., Broekx, S., De Frenne, P., Nelissen, V., Pardon, P., Verheyen, K. (2017). Ecosystem service delivery of agri-environment measures: A synthesis for hedgerows and grass strips on arable land. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 244, pp. 32-51.
- Vélez, J.I. (2001). *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de crecidas*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València.
- Wade, A.J., Durand, P., Beaujouan, V., Wessel, W.W., Raat, K.J., Whitehead, P.G., Butterfield, D., Rankinen, K., Lepisto, A. (2002). A nitrogen model for European catchments: INCA, new model structure and equations. *Hydrology and Earth System Sciences* 6(3), pp. 559-582.
- Weil, R. R., Brady N. C. (2017). *The nature and properties of soils*. Pearson Education Limited, Edinburgh Gate, England.
- Wischmeier, W, Smith, D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Agricultural Handbook No. 537. Washington DC, USA: U.S. Department of Agriculture.
- Yorio, N.C, Goins, G.D., Kagie, H.R., Wheeler, R.M., Sager, J.C. (2001). Improving spinach, radish and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. *Hort Science*, 36(2), pp. 380-383.

ANEXO 2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO TETIS

TETIS es un modelo conceptual, con parámetros de base física, distribuido en el espacio mediante la división en celdas cuadradas con una integración numérica de sus ecuaciones mediante diferencias finitas. Este modelo se ha desarrollado desde el año 1996 en la Universitat Politècnica de València, es de libre distribución en su versión para PCs y ha sido ampliamente utilizado en España y otros países del mundo. Se trata de un modelo integral, en el sentido que reproduce todos los procesos hidrológicos importantes a escala de cuenca, por lo que puede utilizarse tanto en problemas de evaluación de recursos como de crecidas. Además, se incluyen los submodelos de nieve, sedimentos, nitrógeno, riego, producción agrícola, vegetación dinámica y embalses, por lo que puede denominarse como modelo eco-hidrológico.

CONCEPTUALIZACIÓN RESUMIDA DEL MODELO

El modelo eco-hidrológico TETIS (Francés et al., 2007) está basado en una estructura de tanques en cada celda, interconectados vertical y horizontalmente y que representan los procesos de ladera y acuífero, como se esquematiza en la Figura 0-1. El acuífero se encuentra representado como un único tanque, mientras que la ladera se subdivide a su vez en cinco tanques que se corresponden con el manto de nieve, interceptación, almacenamiento en superficie y las zonas capilar (almacenamiento estático) y gravitacional del suelo (almacenamiento gravitacional). El resultado es la representación de la mayoría de los procesos hidrológicos: almacenamiento estático, evapotranspiración, infiltración, escorrentía directa, percolación, interflujo, flujo base y flujo subterráneo profundo. Aunque las ecuaciones que definen todos estos procesos pueden ser modificables, en la mayor parte de las aplicaciones prácticas han funcionado de forma excelente las versiones más simples (tanques lineales y umbrales de capacidad de flujo) con un total de 8 parámetros hidrológicos de celda. Las entradas del modelo son la precipitación, la evapotranspiración potencial.

La escorrentía directa, el interflujo y el flujo base se conectan con la red fluvial (conceptualizada con un tanque) como se indica en la Figura 0-2, mediante la definición de dos umbrales de áreas de drenaje. La red fluvial se divide en cárcavas y cauces, que pueden tener parametrizaciones diferentes a efectos de la propagación del agua. Las laderas (escorrentía directa e interflujo) se conectan a la red de cárcavas, y sólo cuando aparece un flujo permanente proveniente de la conexión del flujo base de los acuíferos se tiene la red de cauces. La propagación en la red fluvial se resuelve con la hipótesis de la onda cinemática,

estimando las características hidráulicas en todas las celdas haciendo uso de relaciones morfométricas de tipo potencial en lo que se denomina Onda Cinemática Geomorfológica.

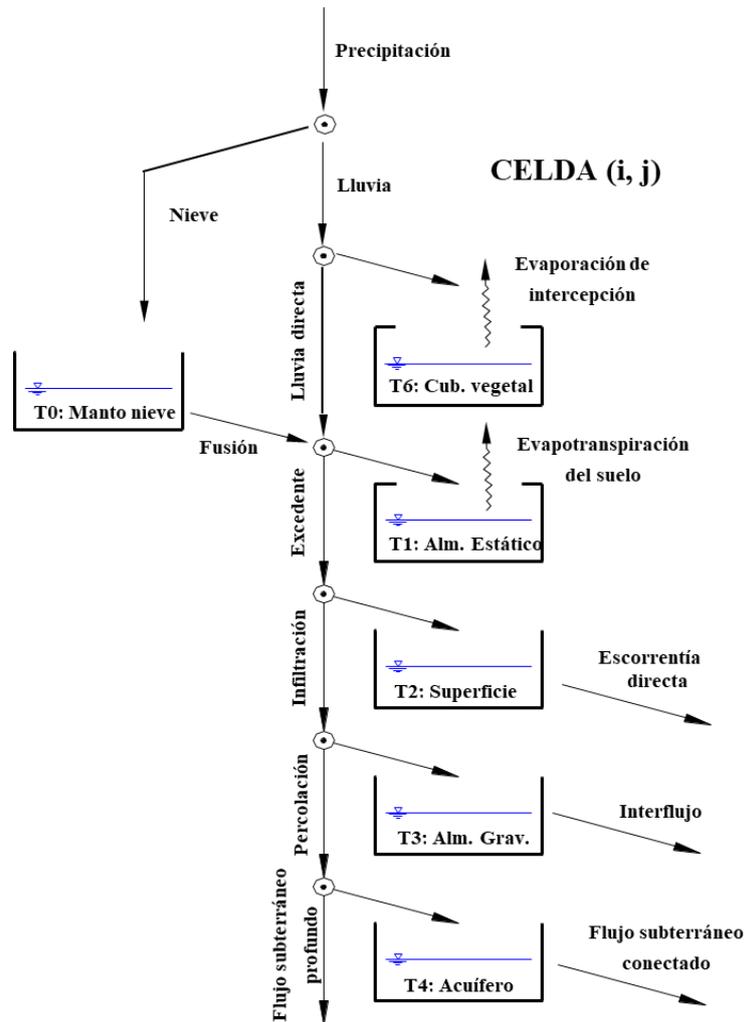


Figura 0-1 Esquema conceptual del ciclo hidrológico para una celda en el modelo TETIS.

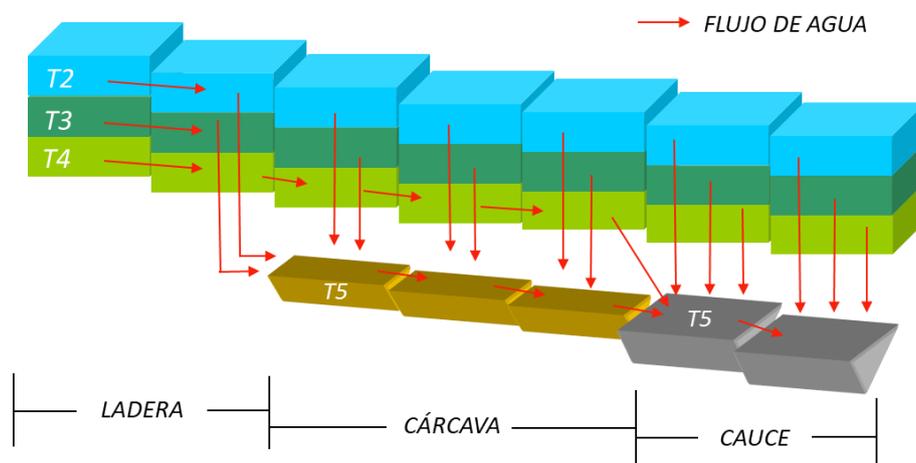


Figura 0-2 Esquema de conexiones horizontales del ciclo hidrológico en el modelo TETIS.

Presenta una estructura separada de sus parámetros efectivos, de tal forma que el valor efectivo en una celda de un parámetro determinado es el resultado de la multiplicación del valor del mapa correspondiente estimado inicialmente por un factor corrector, que es común para todas las celdas, aunque diferente para cada parámetro. De esta forma el número de variables a calibrar se reduce drásticamente, ya que son sólo 9 los factores correctores (ocho de procesos de celda y uno de propagación en la red fluvial) a calibrar en vez de 9 veces el número total de celdas de la cuenca. Con ello se facilita enormemente la etapa de calibración del modelo y, además, es posible el uso de algoritmos de optimización automática para la búsqueda de un conjunto de factores correctores óptimo. Para esto último, TETIS utiliza el algoritmo SCE-UA, acrónimo de “*Shuffled Complex Evolution*” de la “*University of Arizona*”.

EL SUBMODELO DEL CICLO DE SEDIMENTOS

El sub-modelo sedimentológico TETIS (Bussi et al., 2014) está basado en la formulación desarrollada en el modelo CASC2D-SED (Julien y Rojas, 2002). Este modelo simula los procesos de sedimentos en ladera en dos dimensiones, mientras que en canales la aproximación es unidimensional. En el modelo TETIS tanto los procesos en ladera como en canales son unidimensionales. Las tasas de producción, transporte y depositación están controladas por dos características: la disponibilidad de sedimentos en la cuenca y la capacidad de transporte de la corriente. El transporte de materiales finos está limitado por la disponibilidad de sedimentos en la cuenca, mientras que el transporte de materiales gruesos por la capacidad de transporte del flujo. Además, la velocidad necesaria para que una partícula se mueva a través de la corriente depende del tamaño de la partícula. El

modelo separa las partículas en tres categorías de tamaño: arena, limo y arcilla; cada una de ellas con unas características físicas. El proceso de producción, transporte y deposición de sedimentos tanto en laderas como en canales ha sido implementado en este sentido para simular el proceso descrito.

En zonas de ladera, el modelo utiliza la ecuación de Kilinc y Richardson modificada de capacidad de transporte (Julien, 2010a,b), que permite considerar los efectos de los usos del suelo, las prácticas de cultivo y las características de los suelos empleando para ello los siguientes factores propuestos según la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE): K (factor de erosionabilidad), C (factor de cultivo) y P (factor de prácticas de conservación). La capacidad de transporte calculada se utiliza en primer lugar para la propagación de los sedimentos aguas abajo y en segundo lugar, si aún queda capacidad de transporte, el suelo es erosionado proporcionalmente al porcentaje de la fracción de tamaño correspondiente de material parental (Figura 0-3).

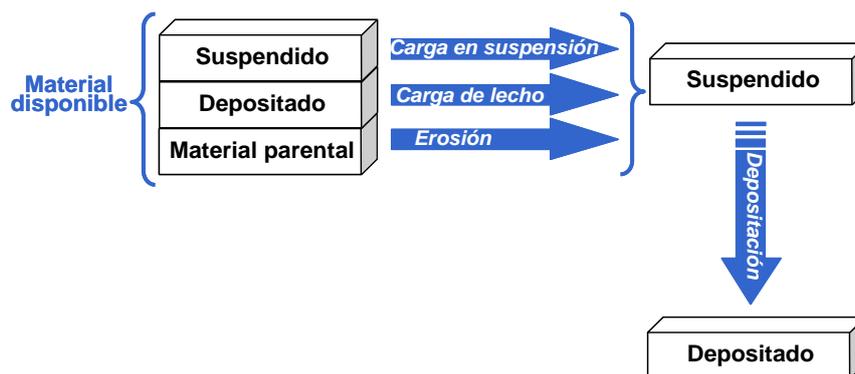


Figura 0-3 Esquema de los procesos de sedimentos en ladera del modelo TETIS.

Por su parte, el transporte de los sedimentos en cárcavas y cauces se lleva a cabo usando la ecuación de Engelund y Hansen (Engelund y Hansen, 1967). Esta formulación depende de parámetros hidráulicos (radio hidráulico, velocidad de flujo y ángulo de fricción) y las características de las partículas (gravedad específica y diámetro). En este caso, para cada fracción de tamaño, una vez se sustrae la cantidad de sedimentos transportados en suspensión en función de la capacidad de transporte calculada, el material del lecho es transportado usando la capacidad de transporte en exceso. En el caso de cárcavas y cauces, no se considera explícitamente la erosión del material parental.

La calibración del submodelo sedimentológico de TETIS se realiza a través el ajuste de tres parámetros, o factores correctores: α que es un coeficiente multiplicativo de la fórmula de Killinc y Richardson modificada empleada para las laderas; β_1 y β_2 que son coeficientes

multiplicativos de la fórmula de Engelund y Hansen empleada en cárcavas y cauces respectivamente.

EL SUBMODELO DEL CICLO DE NITRÓGENO

El sub-modelo de nitrógeno TETIS (Puertes et al., 2021) está basado en la formulación de los modelos INCA-N (Wade et al., 2002) y EU-Rotate_N (Rahn et al., 2007). El modelo INCA-N es un modelo espacialmente semidistribuido que simula los procesos del ciclo del nitrógeno a escala de cuenca. En cambio, el modelo EU-Rotate_N es un modelo desarrollado a escala de parcela que simula el ciclo del nitrógeno únicamente en el suelo, pero que considera la vegetación como una variable de estado, por lo que es capaz de realizar un cálculo más preciso del nitrógeno asimilado por la vegetación.

En el modelo TETIS el ciclo del nitrógeno se modeliza de igual forma que en el modelo INCA-N, con la diferencia de que se ha incorporado el nitrógeno orgánico como forma nitrogenada a evaluar y su acoplamiento al ya existente sub-modelo de sedimentos. Esta última mejora, permite evaluar no sólo el volumen de nitrógeno transportado en disolución, sino también el transportado adsorbido a los sedimentos. Además, para poder modelizar de forma más precisa la asimilación de nitrógeno por parte de la vegetación en las zonas con cultivos hortícolas o herbáceos, el modelo TETIS incorpora una subrutina de crecimiento basada en el modelo EU-Rotate_N.

En la Figura 0-4 se muestra el esquema conceptual del modelo en las zonas de ladera. Los procesos de transformación del nitrógeno están representados mediante cinéticas de primer orden corregidas por temperatura y humedad, a excepción de los procesos de fijación y deposición atmosférica, que están representados por cinéticas de orden cero, y los procesos de adsorción y desorción de amonio que se modelizan a través del coeficiente de partición que mantiene el equilibrio entre ambas fases. La transmisión vertical y horizontal del nitrógeno disuelto se modeliza mediante transporte advectivo con la masa de agua y siguiendo el esquema de conexiones verticales y horizontales del modelo hidrológico. El transporte de nitrógeno debido a los procesos de erosión y sedimentación, se modelizan mediante un balance de masas.

ANÁLISIS DE LA EFICACIA DE DIVERSAS MEDIDAS DE CONTROL SOBRE EL VERTIDO DE AGUA, SEDIMENTOS Y NITRÓGENO A LA LAGUNA COSTERA DEL MAR MENOR MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO TETIS

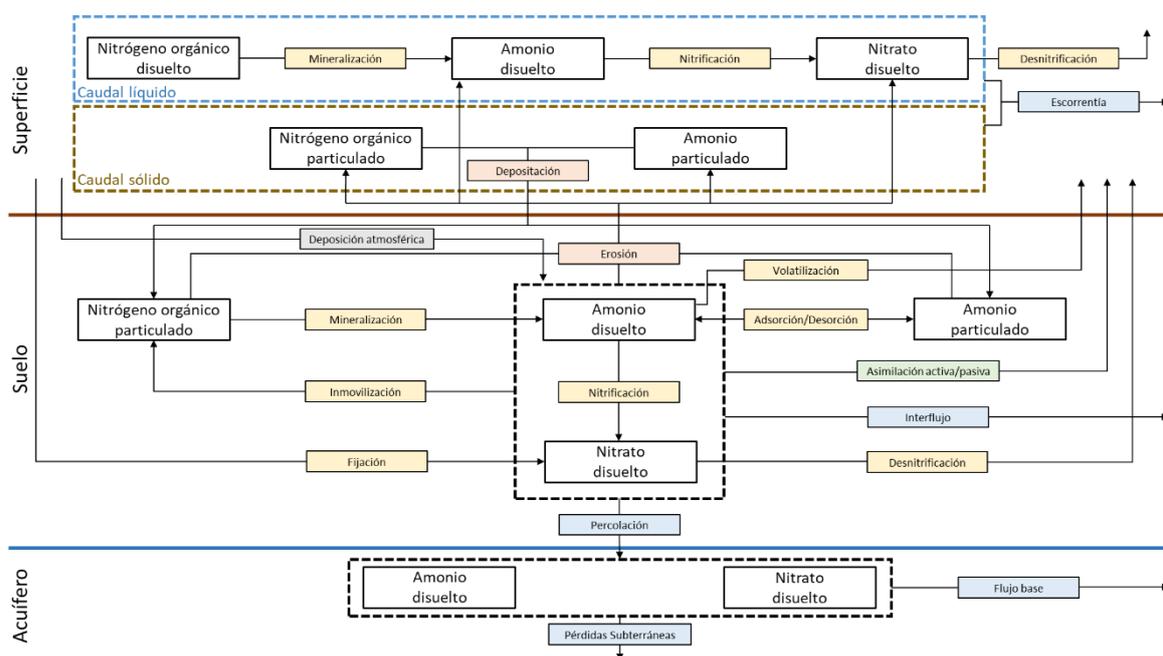


Figura 0-4 Esquema conceptual de los procesos de nitrógeno en ladera del modelo TETIS.

Si se precisa modelizar una zona con cultivos hortícolas o herbáceos, los requisitos de nitrógeno son muy diferentes según el cultivo y la fase de desarrollo en la que se encuentre. Por ello, TETIS emplea una subrutina que simula el crecimiento de la vegetación y permite considerar una rotación anual de cultivos en la misma celda. De esta forma la extracción potencial diaria es calculada en cada diferencial de tiempo según el estado de la vegetación.

Los parámetros a calibrar dependen del tipo de vegetación, a excepción del coeficiente de partición que es el que gobierna los procesos de adsorción/desorción y que presentará un valor para cada celda y un factor corrector. En zonas de ladera los parámetros tienen un valor según uso del suelo (9 parámetros por uso del suelo): constante de mineralización, inmovilización, volatilización, nitrificación, desnitrificación, fijación, coeficiente de difusión, demanda potencial y preferencia de NO_3 . En cárcavas y cauces, tan sólo hay procesos en el volumen de agua, por lo que tan sólo se consideran tres parámetros: constante de mineralización, nitrificación y desnitrificación.

Para la subrutina que simula el crecimiento de los es necesario definir el número de cultivos que están en rotación, con sus respectivas fechas de siembra y cosecha, el peso seco en la fecha de plantación y el coeficiente de cubierta; y el peso seco esperado en la fecha de cosecha y su coeficiente de cubierta, así como la temperatura base para el crecimiento y los coeficientes a y b que permiten el cálculo del crecimiento y que se encuentran tabulados según cultivo (Rahn et al., 2007).

ANEXO 3. Efectividad de los embalses

En las siguientes páginas se recogen para los dos escenarios COAG las series temporales de:

- Flujo de entrada al canal y desbordado por falta de capacidad
- Volumen de agua embalsado
- Flujo de entrada al embalse y desbordado por falta de volumen libre

ANEXO 3

SIN VACIADO

EMBALSES 1 Y 2

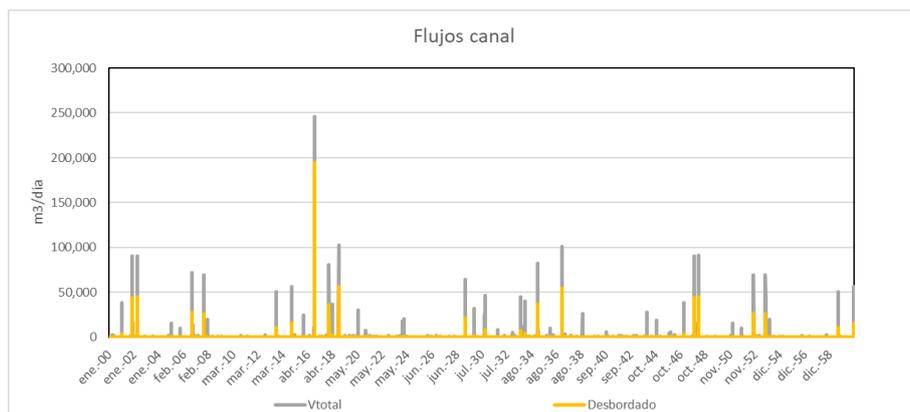


Figura 0-1 Embalse 1 y 2 - Entradas y desbordes canal.

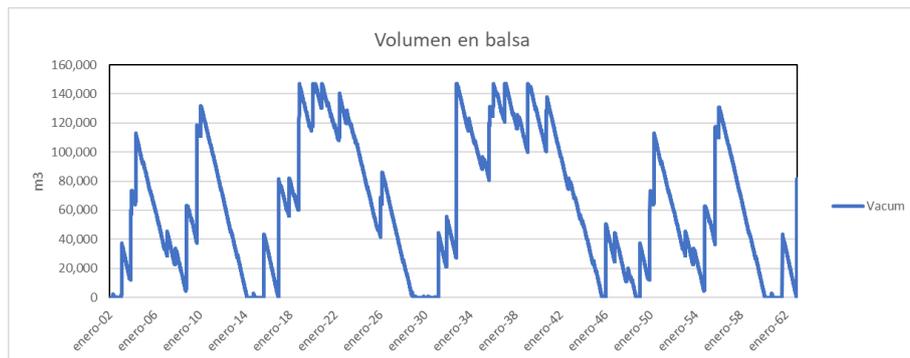


Figura 0-2 Embalse 1 y 2 - Volumen en Embalse.

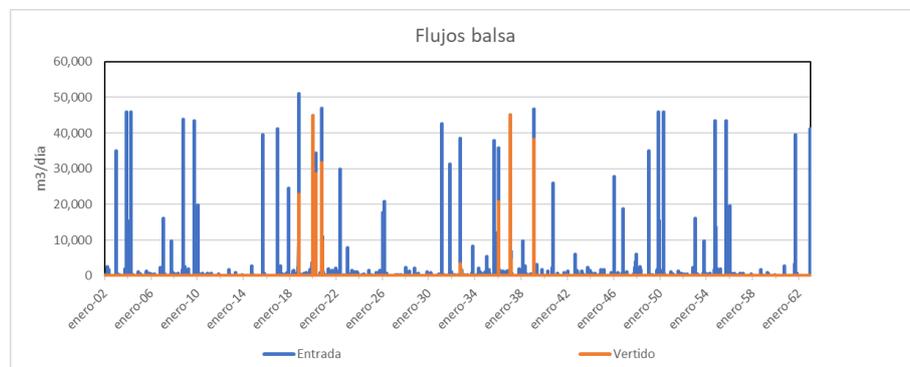


Figura 0-3 Embalses 1 y 2 - Entradas y desbordes embalse.

EMBALSE 3

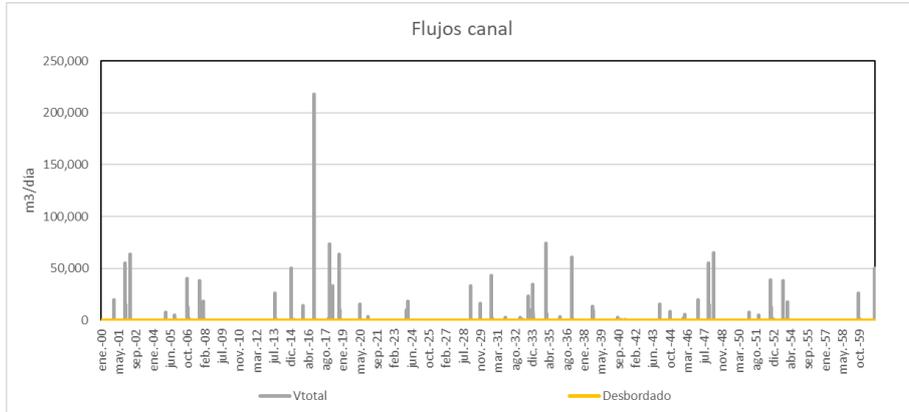


Figura 0-4 Embalse 3- Entradas y desbordes canal.



Figura 0-5 Embalse 3 - Volumen en Embalse.

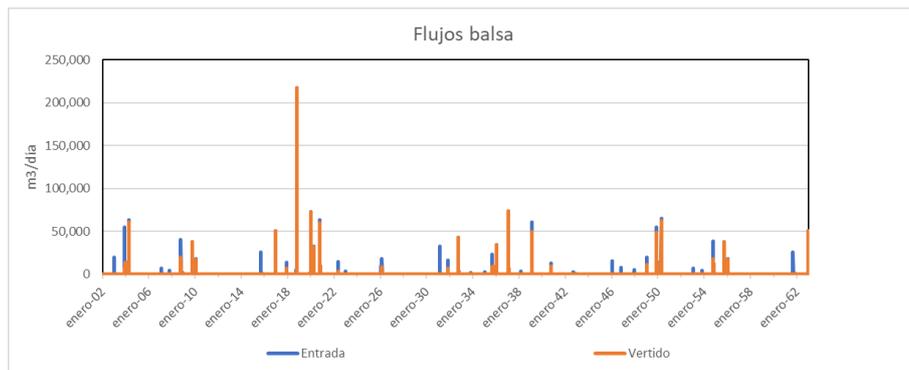


Figura 0-6 Embalse 3 - Entradas y desbordes embalse.

EMBALSE 4

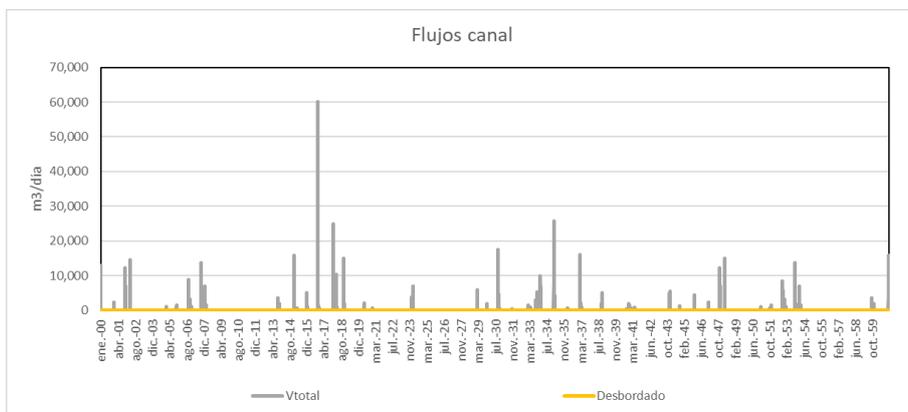


Figura 0-7 Embalse 4 – Entradas y desbordes canal.

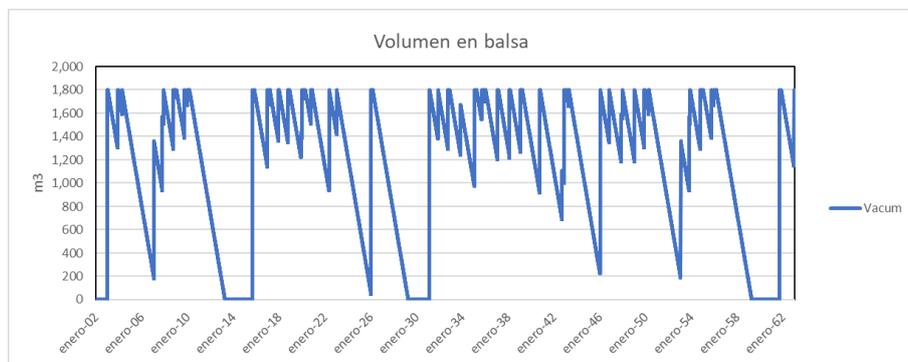


Figura 0-8 Embalse 4- Volumen en Embalse.

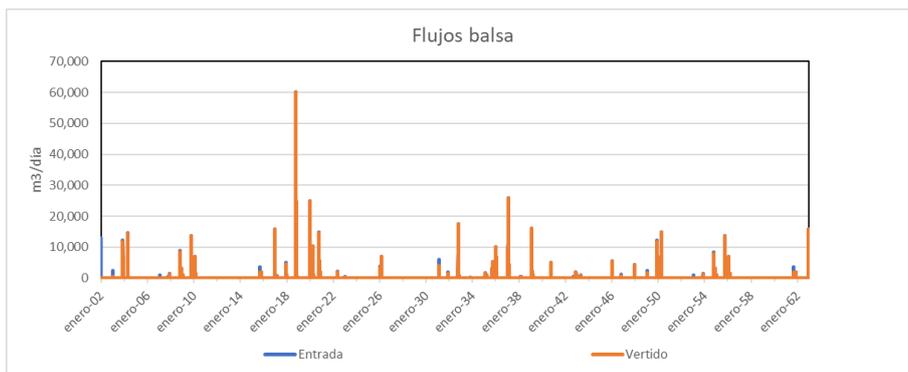


Figura 0-9 Embalse 4 Entradas y desbordes embalse.

EMBALSE 7

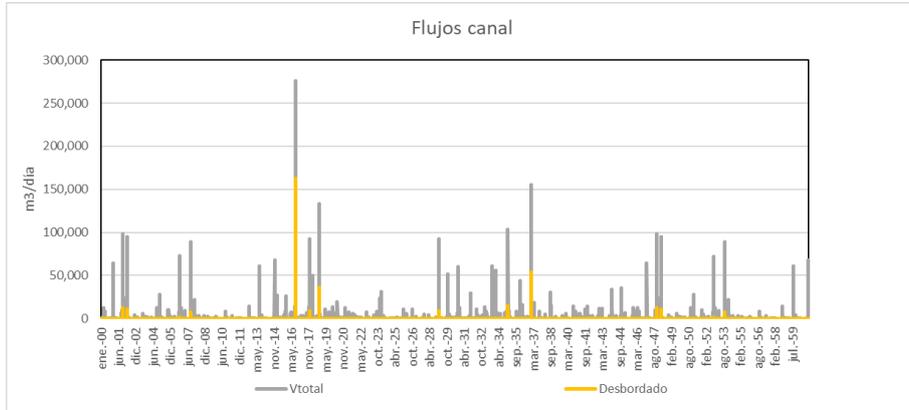


Figura 0-10 Embalse 7- Entradas y desbordes canal.

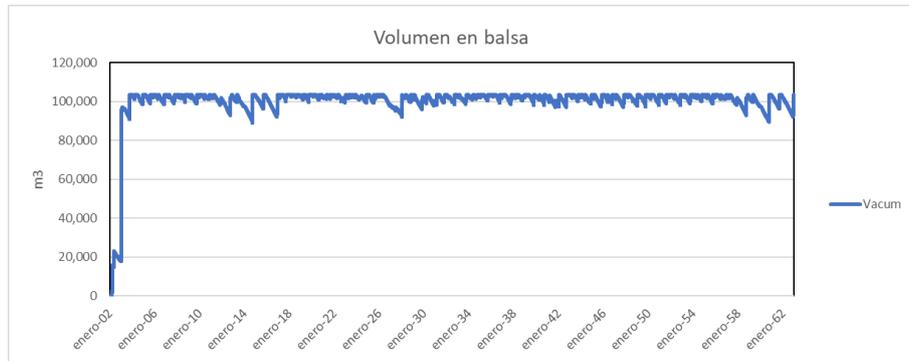


Figura 0-11 Embalse 7- Volumen en Embalse.

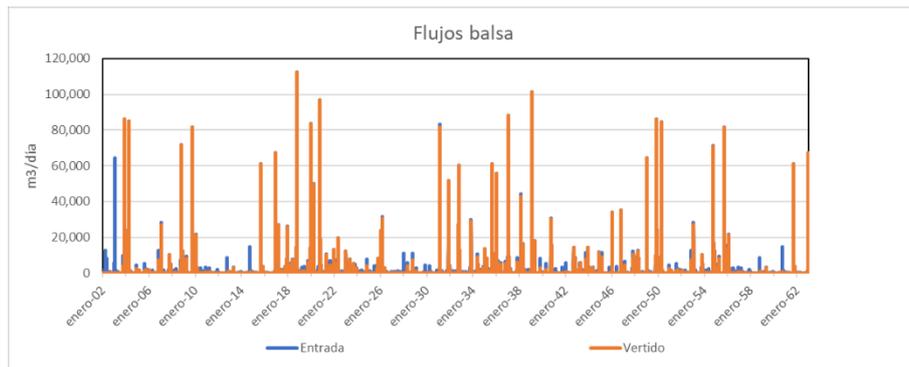


Figura 0-12 Embalse 7 - Entradas y desbordes embalse.

EMBALSE EJECUTADO

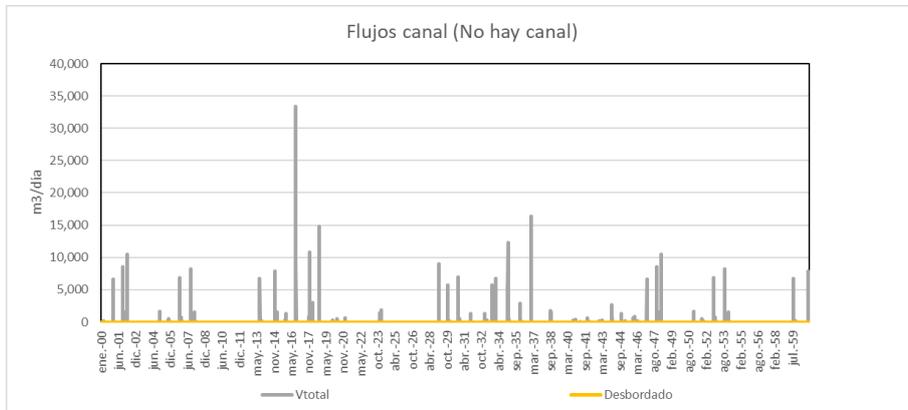


Figura 0-13 Embalse Ejecutado – Entradas y desbordes canal.



Figura 0-14 Embalse Ejecutado- Volumen en Embalse.

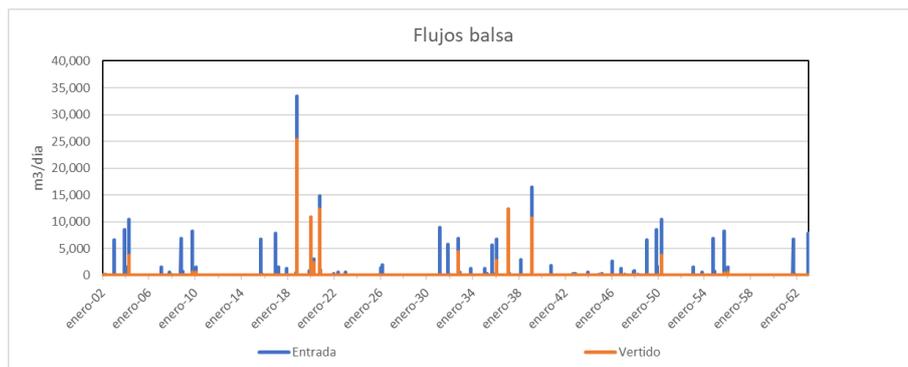


Figura 0-15 Embalse Ejecutado Entradas y desbordes embalse.

EMBALSE 8

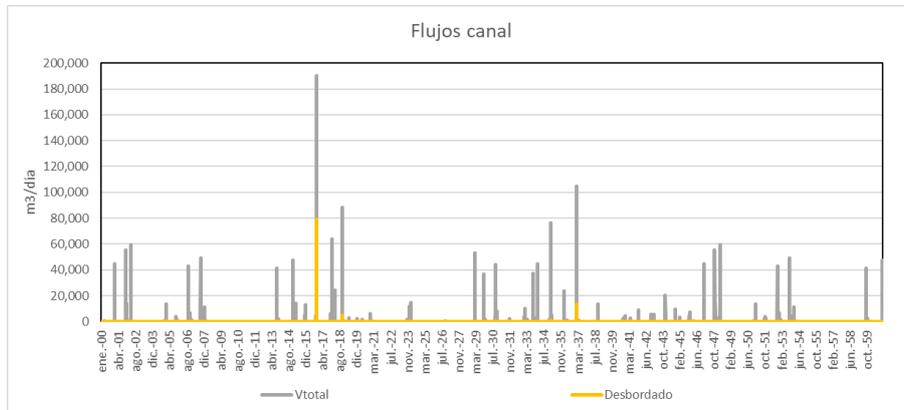


Figura 0-16 Embalse 8- Entradas y desbordes canal.

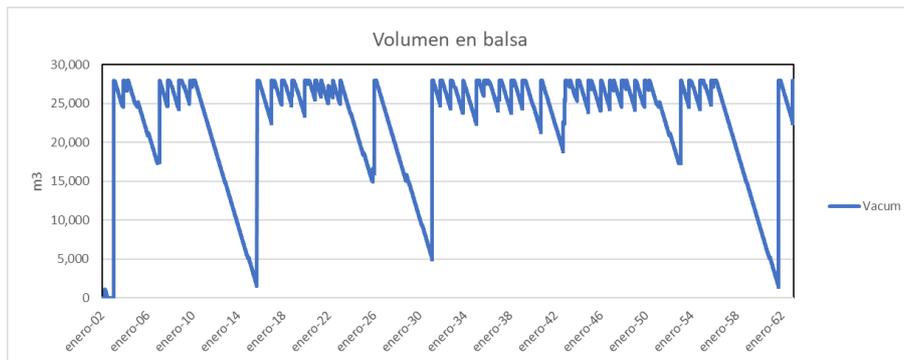


Figura 0-17 Embalse 8- Volumen en Embalse.

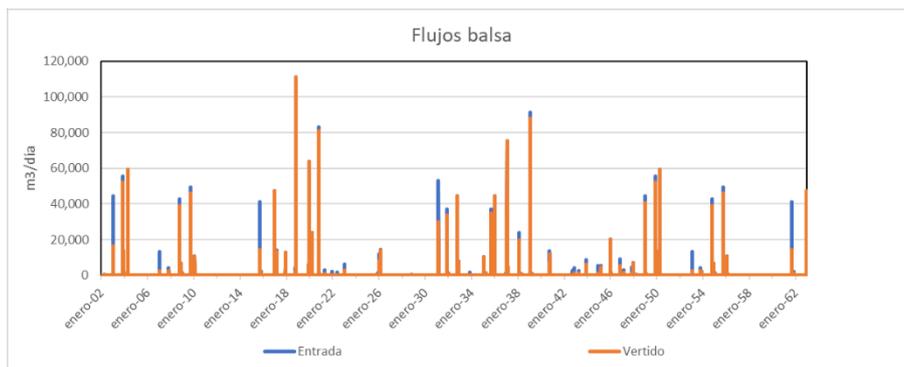


Figura 0-18 Embalse 8 Entradas y desbordes embalse.

LAGUNA NATURALIZADA

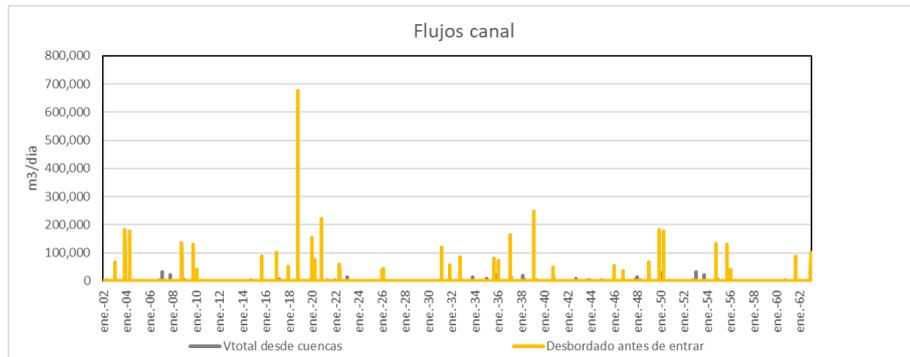


Figura 0-19 Laguna Naturalizada- Entradas y desbordes canal.

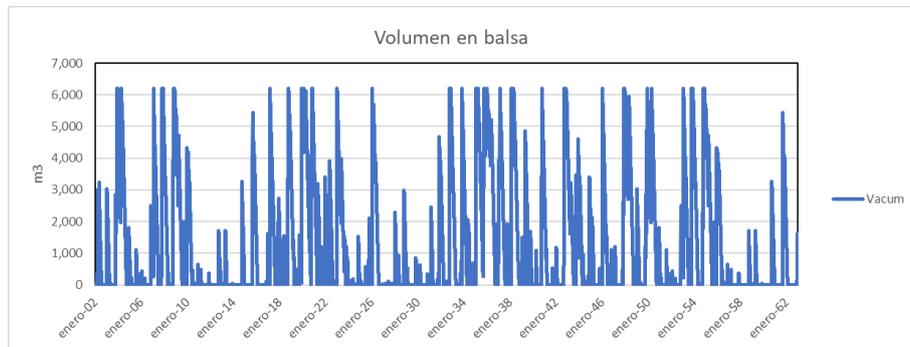


Figura 0-20 Laguna Naturalizada- Volumen en Embalse.

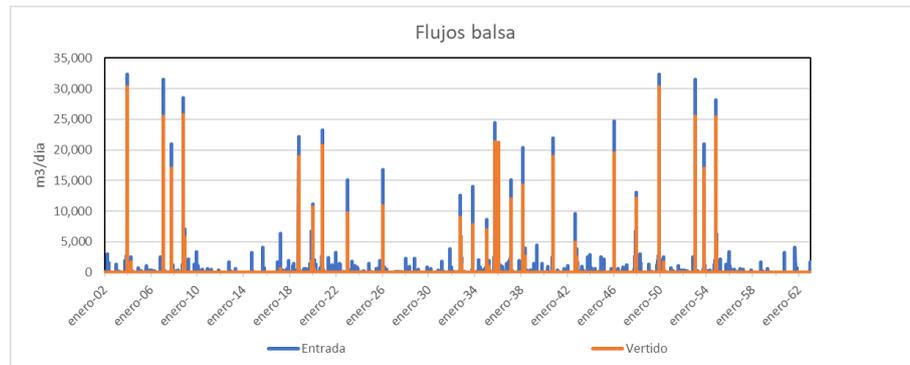


Figura 0-21 Laguna Naturalizada Entradas y desbordes Laguna Naturalizada.

CON VACIADO

EMBALSES 1 Y 2

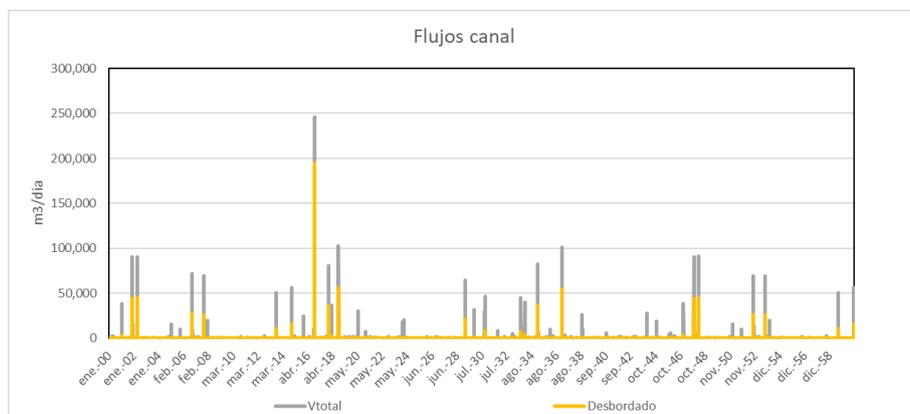


Figura 0-22 Embalse 1 y 2- Entradas y desbordes canal.

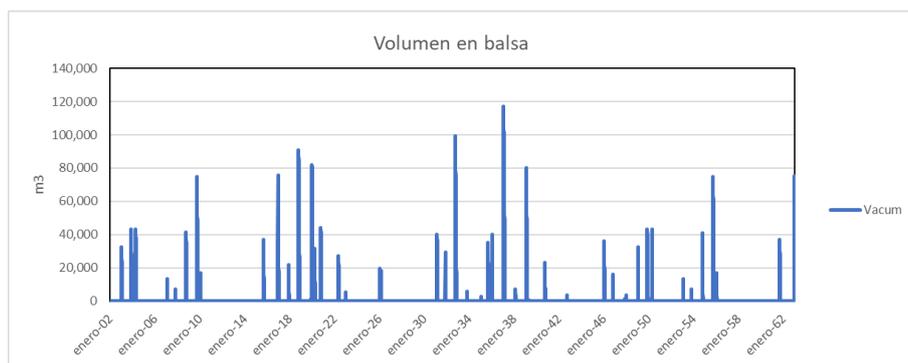


Figura 0-23 Embalse 1 y 2- Volumen en Embalse.

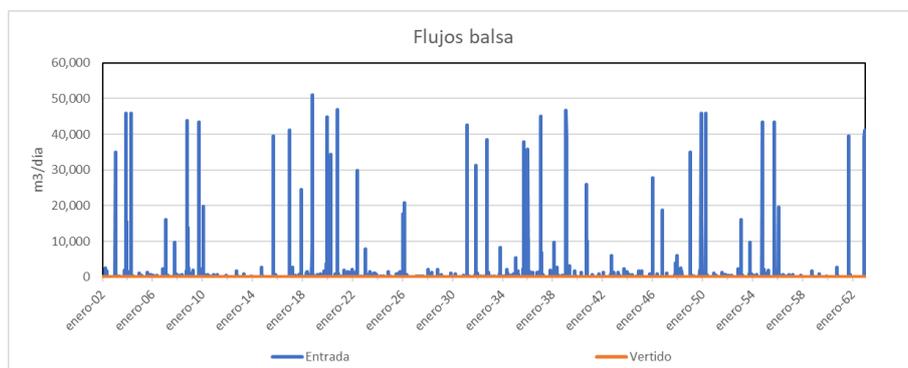


Figura 0-24 Embalse 1 y 2 Entradas y desbordes embalse.

EMBALSE 3

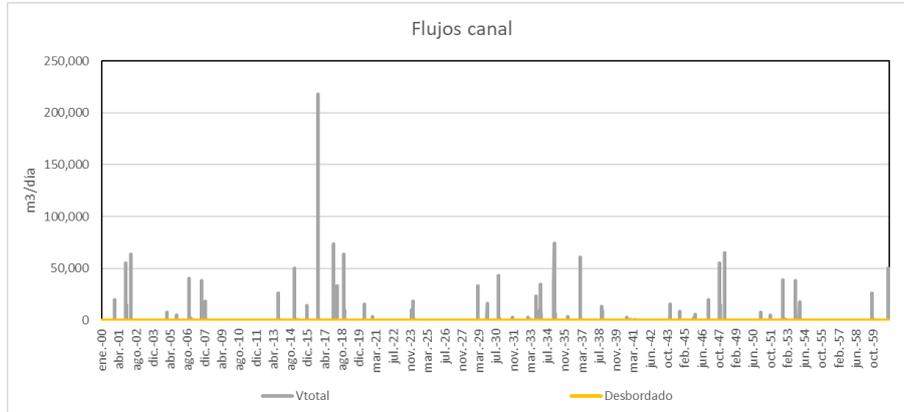


Figura 0-25 Embalse 3- Entradas y desbordes canal.

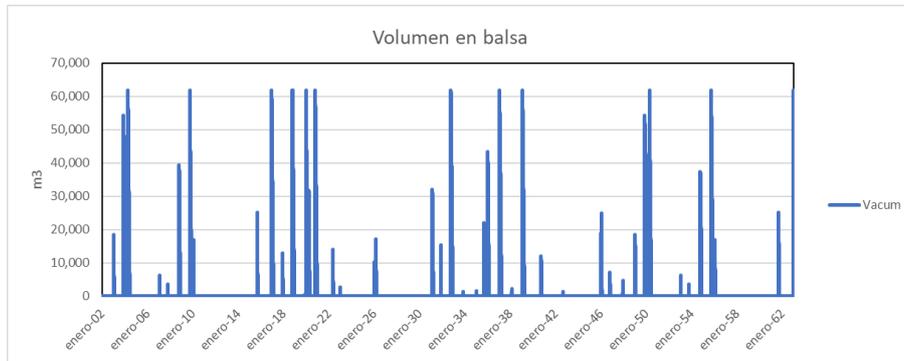


Figura 0-26 Embalse 3- Volumen en Embalse.

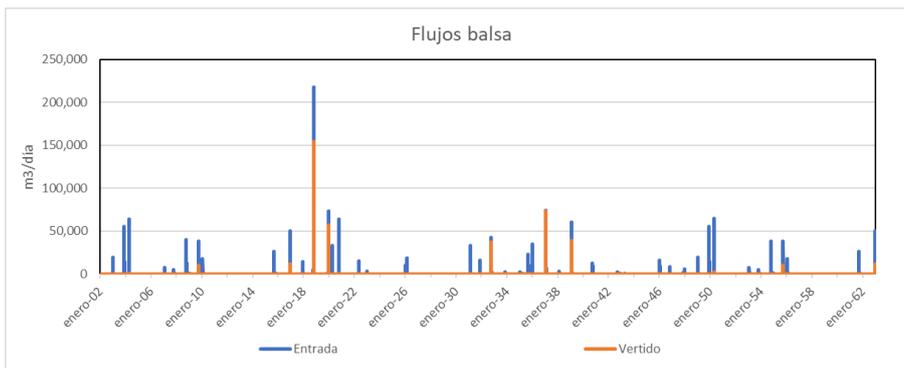


Figura 0-27 Embalse 3 Entradas y desbordes embalse.

EMBALSE 4

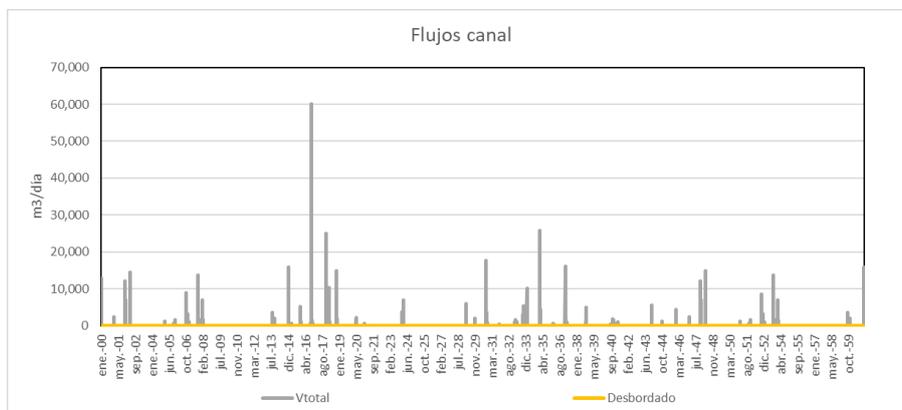


Figura 0-28 Embalse 4- Entradas y desbordes canal.

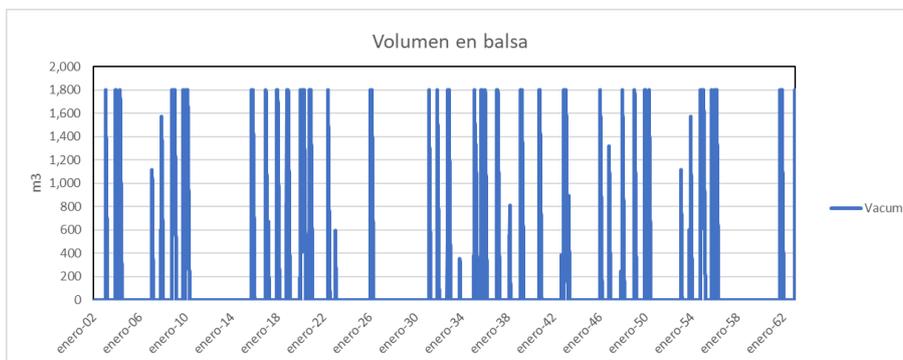


Figura 0-29 Embalse 4- Volumen en Embalse.

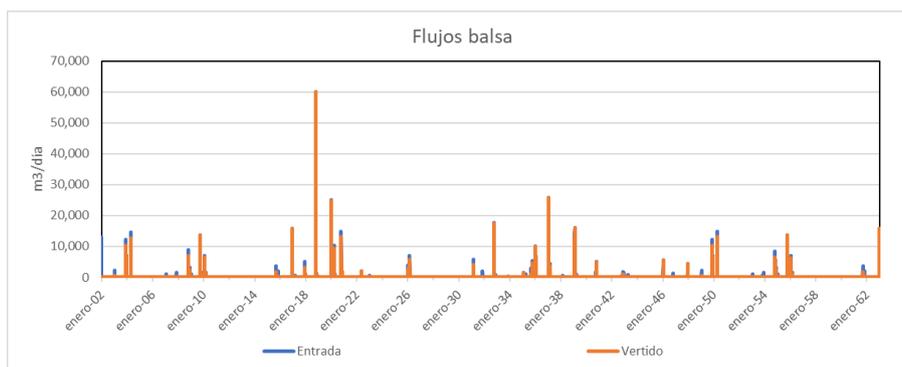


Figura 0-30 Embalse 4 Entradas y desbordes embalse.

EMBALSE 7

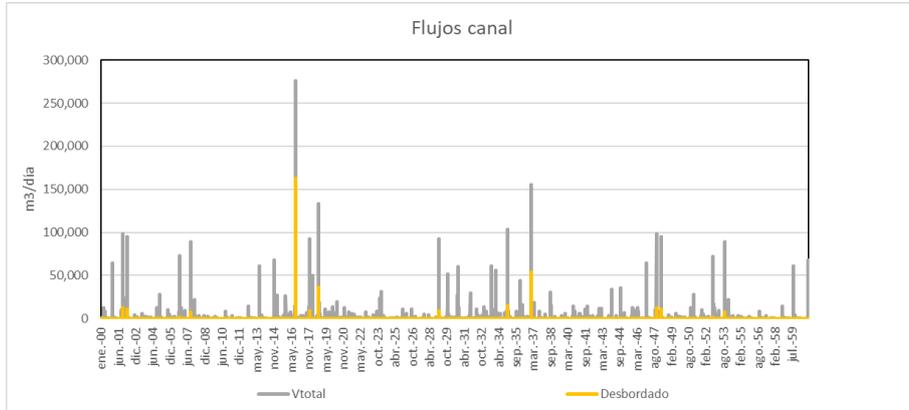


Figura 0-31 Embalse 7- Entradas y desbordes canal.

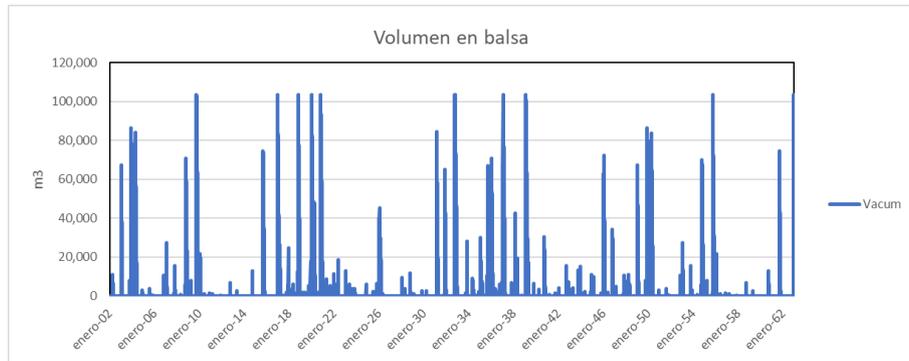


Figura 0-32 Embalse 7- Volumen en Embalse.

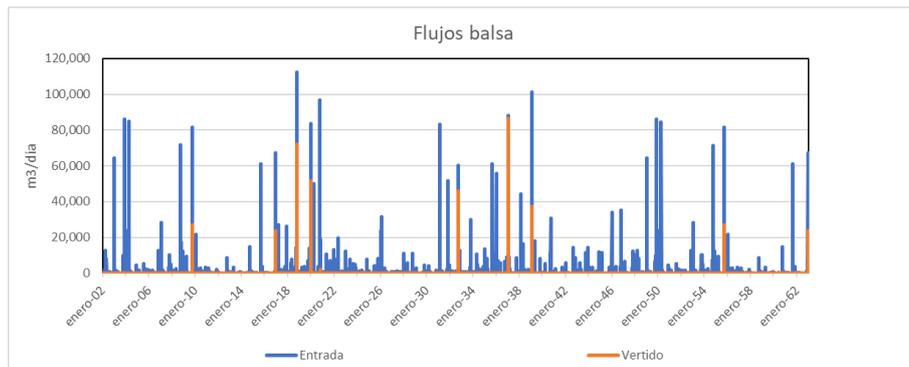


Figura 0-33 Embalse 7 Entradas y desbordes embalse.

EMBALSE EJECUTADO

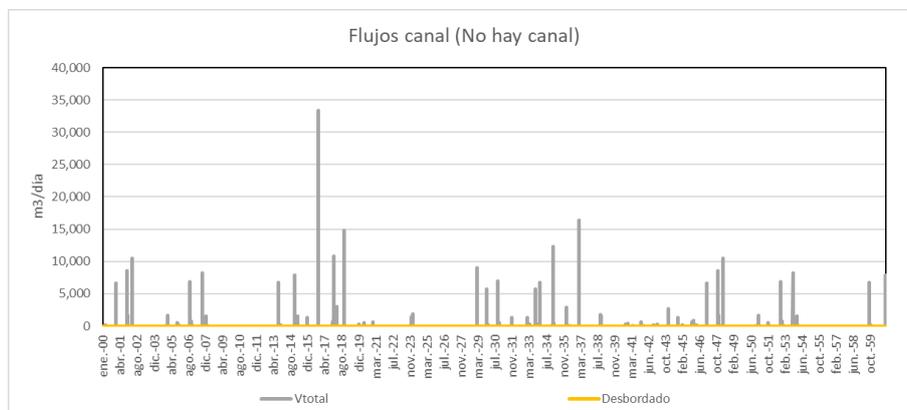


Figura 0-34 Embalse Ejecutado- Entradas y desbordes canal.

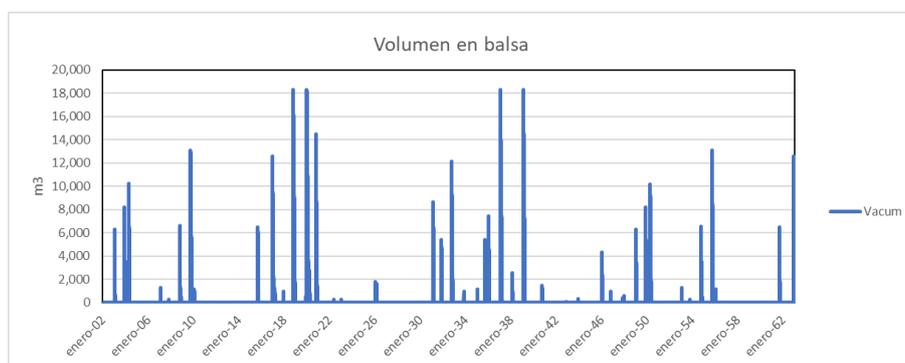


Figura 0-35 Embalse Ejecutado- Volumen en Embalse.

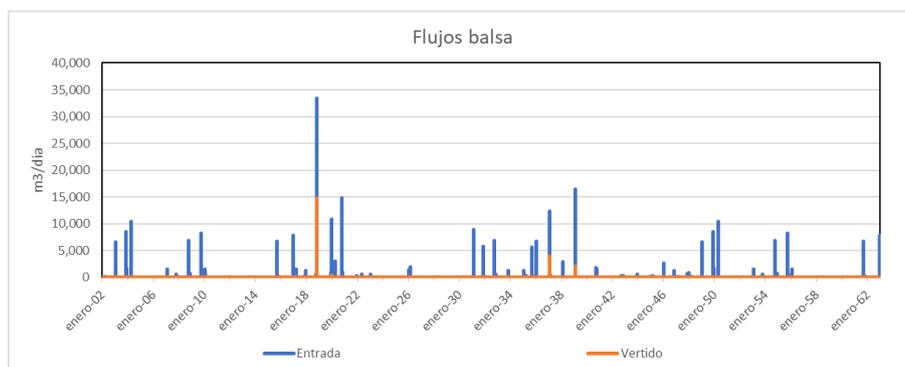


Figura 0-36 Embalse Ejecutado Entradas y desbordes embalse.

EMBALSE 8

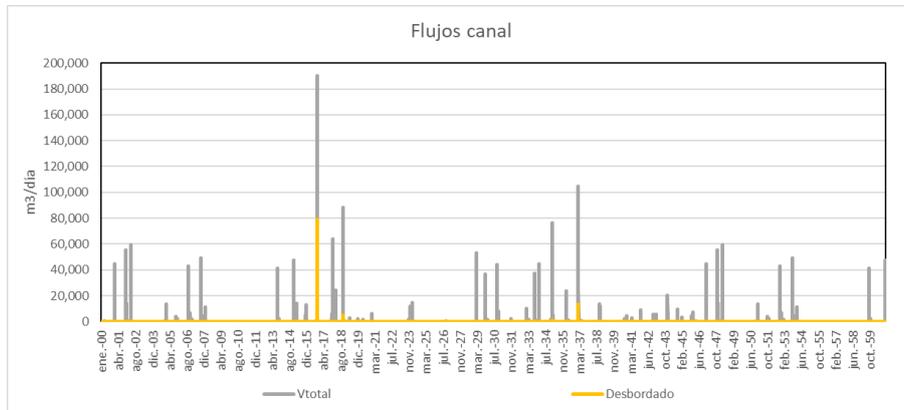


Figura 0-37 Embalse 8- Entradas y desbordes canal.

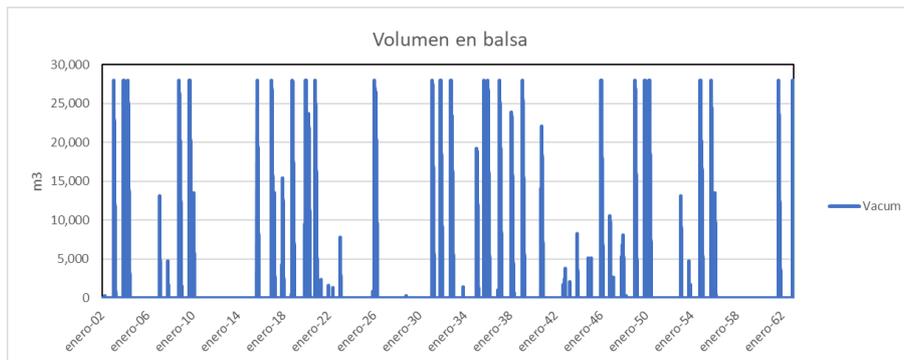


Figura 0-38 Embalse 8- Volumen en Embalse.

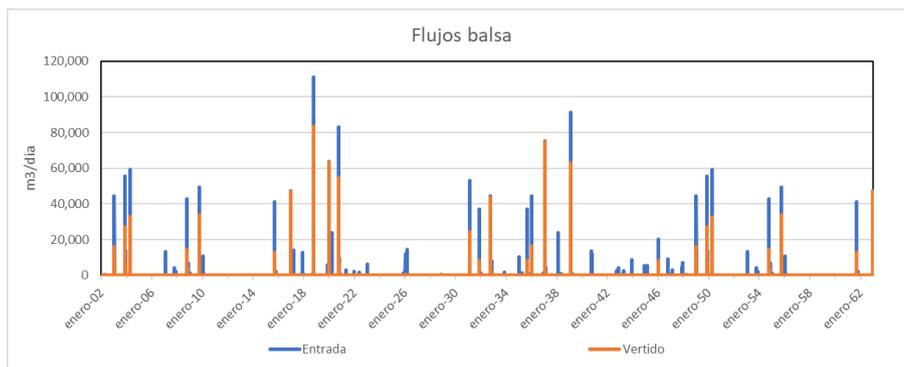


Figura 0-39 Embalse 8 Entradas y desbordes embalse.

LAGUNA NATURALIZADA

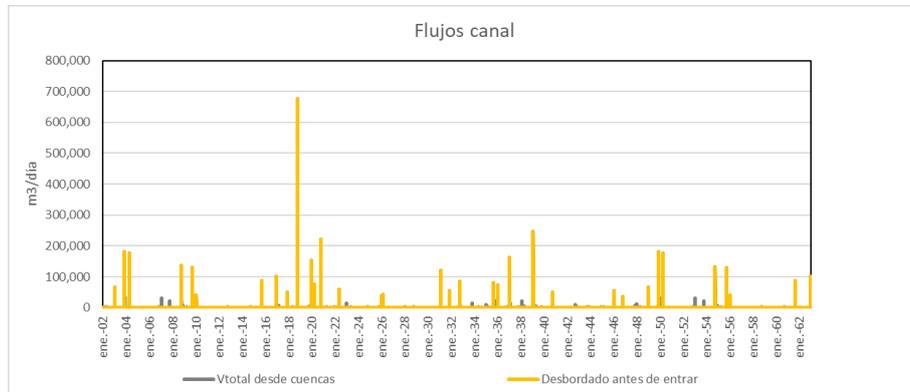


Figura 0-40 Laguna Naturalizada- Entradas y desbordes canal.

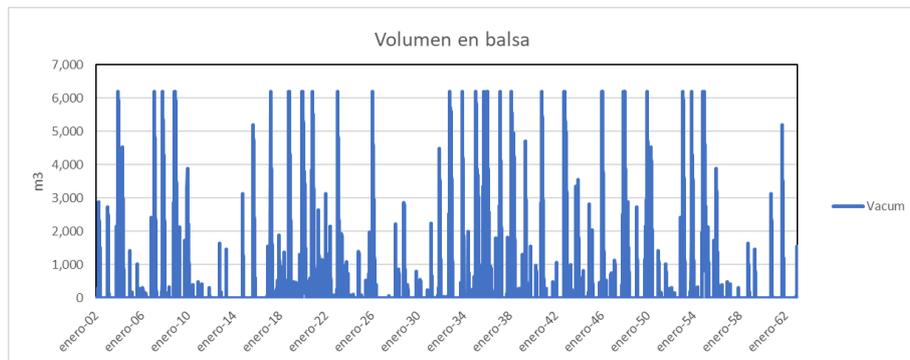


Figura 0-41 Laguna Naturalizada- Volumen en Embalse.

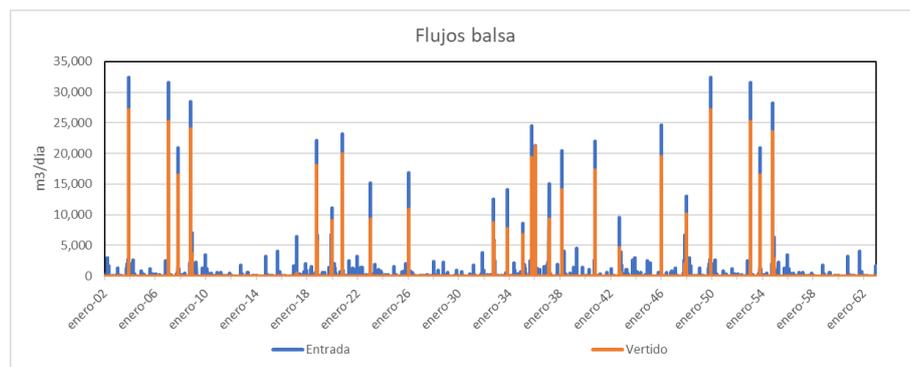


Figura 0-42 Laguna Naturalizada Entradas y desbordes embalse.