

Tesis de Doctorado

Departamento de Ciencias de la Navegación y de la Tierra
Área de Edafología y Química Agrícola

**COMPORTAMIENTO HIDROSEDIMENTARIO DE
UNA CUENCA AGROFORESTAL BAJO DIFERENTES
CONDICIONES CLIMÁTICAS:
IMPORTANCIA PARA ESTABLECER PLANES DE MANEJO**



Ricardo Arias Miguélez

2013



**COMPORTAMIENTO HIDROSEDIMENTARIO DE UNA
CUENCA AGROFORESTAL BAJO DIFERENTES
CONDICIONES CLIMÁTICAS:
IMPORTANCIA PARA ESTABLECER PLANES DE
MANEJO**

Ricardo Arias Miguélez 2013

Directoras:

M^a Teresa Taboada Castro

M^a Mercedes Taboada Castro

M^a Luz Rodríguez Blanco



M^a TERESA TABOADA CASTRO, Profesora Titular de Edafología y Química Agrícola de la Universidad de A Coruña, M^a MERCEDES TABOADA CASTRO, Doctora en Biología y M^a LUZ RODRÍGUEZ BLANCO, Doctora en Biología,

CERTIFICAN:

Que la presente Memoria titulada *Comportamiento hidrosedimentario de una cuenca agroforestal bajo diferentes condiciones climáticas: Importancia para establecer planes de manejo*, que para optar al grado de Doctor por la Universidad de A Coruña presenta el Ingeniero de Montes RICARDO ARIAS MIGUÉLEZ, ha sido realizada en la Facultad de Ciencias (Departamento de Ciencias de la Navegación y de la Tierra, Área de Edafología y Química Agrícola), bajo nuestra dirección y supervisión.

Considerando que constituye trabajo de Tesis Doctoral, autorizan su presentación en la Universidad de A Coruña.

Y para que conste, firman la presente certificación en A Coruña a 5 de Abril de 2013.

M^a Teresa Taboada Castro M^a Mercedes Taboada Castro M^a Luz Rodríguez Blanco

AGRADECIMIENTOS

Ha sido muy largo, difícil y apasionante. Sólo no hubiera podido. Por eso tengo que estar enormemente agradecido, en primer lugar a mis queridos amigos los profesores doctores Jorge Teijeiro Vidal y José Luis Rodríguez-Villamil Fernández que me pusieron en el camino correcto y me dieron el primer empujón, siempre tan necesario.

Lo hicieron con tan buen criterio que me dejaron bajo la tutela de las profesoras doctoras María Teresa Taboada Castro de cuya rigurosidad y seriedad en el trabajo nunca aprenderé lo suficiente, Mercedes Taboada Castro entusiasta y generosa sin límite con sus conocimientos y M^a Luz Rodríguez Blanco trabajadora e investigadora infatigable y el espejo en el que me quiero mirar. Gracias por todos estos años de paciencia y enseñanzas.

Mi agradecimiento al doctor J. Luis Oropeza-Mota y a D. Abraham Domínguez del Colegio de Postgraduados de México por iniciarme en el uso del modelo SWAT.

Gracias a Laura Palleiro por su colaboración indispensable tanto en el trabajo de campo como en el laboratorio.

También, quiero mostrar mi gratitud a todos aquellos compañeros del Departamento que de alguna manera han contribuido a la realización de este trabajo.

Finalmente, quiero mostrar mi profundo agradecimiento a mis padres, que me han puesto en la senda del trabajo, y sin los que nada de lo realizado sería posible y a Gloria y a mis hijas Vera y Natalia, motores de mi actividad y razón de mi felicidad.

Muchas gracias a todos.

INDICE

| | |
|---|-------------|
| Índice de figuras | XIII |
| Índice de tablas | XVII |
| RESUMEN, RESUMO y ABSTRACT | XIX |
| 1. Introducción | 3 |
| 1.1. Planteamiento | 3 |
| 1.2. Ciclo hidrológico | 5 |
| 1.3. Modelos hidrológicos | 8 |
| 1.3.1. Descripción de algunos modelos | 11 |
| 1.3.1.1. Modelos empíricos | 11 |
| 1.3.1.1.1. USLE | 11 |
| 1.3.1.1.2. MUSLE | 15 |
| 1.3.1.2. Modelos físicos | 21 |
| 1.3.1.2.1. CREAMS | 21 |
| 1.3.1.2.2. ANSWERS | 22 |
| 1.3.1.2.3. WEPP..... | 23 |
| 1.3.1.2.4. EUROSEM..... | 23 |
| 1.3.1.2.5. LISEM | 24 |
| 1.3.1.2.6. SWAT..... | 25 |
| 1.4. Cuencas aforadas y no aforadas | 27 |
| 1.5. Cambio climático | 29 |
| 1.5.1. Marco de referencia | 29 |
| 1.5.2. Causas del cambio | 30 |
| 1.5.3. Evidencias climáticas durante el siglo XX | 31 |
| 1.5.4. Sensibilidad de los recursos hídricos al cambio climático | 34 |
| 1.5.4.1. Planteamiento general | 34 |
| 1.5.4.2. Sensibilidad a las variaciones estacionales de precipitación y temperatura... .. | 36 |
| 1.5.4.3. Sensibilidad a sucesos extremos: sequías y avenidas..... | 37 |
| 1.5.5. Impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos | 37 |
| 1.5.6. Impactos sobre otros sistemas relacionados con los recursos hídricos | 39 |
| 1.5.7. Proyecciones de cambio climático | 40 |

| | |
|---|-----------|
| 1.5.7.1. Modelos climáticos | 40 |
| 1.5.7.2. Escenarios de emisiones | 42 |
| 1.5.7.3. Proyecciones de cambios futuros en la temperatura, precipitación y escorrentía: siglo XXI | 45 |
| 2. El modelo SWAT..... | 51 |
| 2.1. Capacidades del modelo..... | 51 |
| 2.2. Estructura y componentes..... | 53 |
| 2.3. Datos de entrada y salida del modelo | 58 |
| 3. Justificación y objetivos..... | 65 |
| 4. Características físicas de la cuenca | 75 |
| 4.1. Área de estudio..... | 75 |
| 4.2. Características geomorfológicas | 76 |
| 4.3. Marco geológico | 78 |
| 4.4. Tipos de suelos | 79 |
| 4.5. Usos del suelo y vegetación..... | 81 |
| 4.6. Caracterización climática..... | 85 |
| 5. Material y métodos..... | 89 |
| 5.1. Elaboración de la cartografía de la cuenca | 91 |
| 5.1.1. Modelo de elevación digital..... | 91 |
| 5.1.2. Mapa de suelos y propiedades | 92 |
| 5.1.3. Mapa de usos del suelo y prácticas de manejo | 92 |
| 5.1.4. Delimitación de URHs | 94 |
| 5.2. Datos hidrometeorológicos, producción de sedimentos y nitratos..... | 95 |
| 5.2.1. Datos meteorológicos..... | 95 |
| 5.2.2. Datos de caudal y separación de flujos..... | 96 |
| 5.2.3. Cargas de sedimentos y nitratos..... | 98 |
| 5.2.3.1. Muestreo de aguas | 98 |
| 5.2.3.2. Análisis de sedimentos y nitratos..... | 99 |
| 5.2.3.3. Cálculo de la carga | 99 |
| 5.3. Análisis y evaluación del modelo | 99 |
| 5.3.1. Metodología para el análisis de sensibilidad | 99 |

| | |
|--|------------|
| 5.3.2. Procedimiento de calibración y validación | 101 |
| 5.3.3. Evaluación estadística de resultados..... | 102 |
| 5.4. Análisis del impacto del cambio climático | 104 |
| 6. Resultados y discusión | 111 |
| 6.1. Comportamiento climático | 111 |
| 6.1.1. Precipitación | 111 |
| 6.1.2. Temperatura..... | 113 |
| 6.1.3. Radiación solar | 114 |
| 6.1.4. Velocidad del viento | 114 |
| 6.1.5. Humedad relativa | 115 |
| 6.2. Análisis de los datos hidrosedimentarios y de nitratos de la cuenca..... | 116 |
| 6.2.1. Descarga de agua, sedimentos y nitratos..... | 116 |
| 6.2.2. Evolución temporal del caudal, producción de sedimentos y nitratos | 121 |
| 6.3. Aplicación y evaluación del modelo SWAT | 126 |
| 6.3.1. Análisis de sensibilidad | 126 |
| 6.3.1.1. Análisis de sensibilidad para el módulo hidrológico..... | 126 |
| 6.3.1.2. Análisis de sensibilidad para el módulo de transporte de sedimentos | 134 |
| 6.3.1.3. Análisis de sensibilidad para el módulo de nutrientes | 135 |
| 6.3.2. Calibración y validación del modelo SWAT | 137 |
| 6.3.2.1. Calibración y validación hidrológica | 137 |
| 6.3.2.2. Calibración y validación de la producción de sedimentos..... | 142 |
| 6.3.2.3. Calibración y validación de la carga de nitratos | 150 |
| 6.4. Valoración de la utilidad del generador climático y de la calibración del SWAT para analizar escenarios de cambio climático..... | 156 |
| 6.5. Evaluación de la incidencia del cambio climático en la respuesta hidrosedimentaria y en la carga de nitratos | 157 |
| 6.5.1. Proyecciones de cambio climático según ENSEMBLES..... | 158 |
| 6.5.2. Respuesta de la descarga de agua, sedimentos y nitratos a cambios individuales de temperatura, precipitación y CO ₂ | 161 |
| 6.5.2.1. Respuesta anual..... | 162 |
| 6.5.2.1.1. Respuesta anual de la descarga de agua | 163 |
| 6.5.2.1.2. Respuesta anual de la producción de sedimentos | 168 |
| 6.5.2.1.3. Respuesta anual de la carga de nitratos | 171 |
| 6.5.2.2. Respuesta estacional | 172 |
| 6.5.2.2.1. Respuesta estacional de la descarga de agua..... | 174 |

| | |
|--|------------|
| 6.5.2.2.2. Respuesta estacional de la producción de sedimentos | 177 |
| 6.5.2.2.3. Respuesta estacional de la carga de nitratos | 177 |
| 6.5.3. Respuesta de la descarga de agua, sedimentos y nitratos a cambios simultáneos de temperatura, precipitación y CO ₂ | 178 |
| 6.5.3.1. Respuesta anual de la descarga de agua..... | 181 |
| 6.5.3.2. Respuesta anual de la producción de sedimentos..... | 184 |
| 6.5.3.3. Respuesta anual de la carga de nitratos | 185 |
| 6.5.3.4. Respuesta estacional de la descarga de agua | 186 |
| 6.5.3.5. Respuesta estacional de la producción de sedimentos | 187 |
| 6.5.3.6. Respuesta estacional de la carga de nitratos..... | 188 |
| 6.5.4. Valoración global de los resultados del cambio climático | 188 |
| 7. Conclusiones | 197 |
| 8. Bibliografía | 203 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Esquema del ciclo hidrológico. | 5 |
| Figura 1.2. Esquema mostrando los tres tipos de discretización para una cuenca hidrográfica. | 10 |
| Figura 1.3. Emisiones mundiales de GEI antropógenos..... | 31 |
| Figura 1.4. Emisiones mundiales de GEI entre 2000 y 2100, para diferentes escenarios, en ausencia de políticas climáticas adicionales (IPCC, 2007)..... | 44 |
| Figura 1.5. Proyecciones del calentamiento en superficie para el siglo XXI (IPCC, 2007). | 46 |
| Figura 1.6. Cambios de la precipitación relativos (en valores porcentuales) para el periodo 2090-2099, respecto del periodo 1980-1999..... | 47 |
| Figura 1.7. Cambios relativos de la escorrentía anual en gran escala (disponibilidad de agua, en valores porcentuales), para el periodo 2090-2099, respecto del periodo 1980-1999. | 48 |
| Figura 2.1. Esquema de los componentes del modelo SWAT. | 53 |
| Figura 2.2. Ciclo del agua simulado por el SWAT. | 55 |
| Figura 4.1. Localización del área de estudio. | 75 |
| Figura 4.2. Modelo de elevación digital de la cuenca del río Corbeira. | 76 |
| Figura 4.3. Mapa de clases de pendientes, según la FAO, en la cuenca del río Corbeira..... | 77 |
| Figura 4.4. Codificación de las corrientes fluviales del río Corbeira según la clasificación de Strahler..... | 78 |
| Figura 4.5. Esquistos en fase avanzada de alteración (especialmente b) en la cuenca del río Corbeira. | 79 |
| Figura 4.6. Tipos de suelos en la cuenca según la clasificación FAO (1998). | 80 |
| Figura 4.7. Distribución de los usos del suelo en la cuenca. | 81 |
| Figura 4.8. Aspectos generales de la cuenca..... | 84 |

| | |
|--|------------|
| Figura 4.9. Diagrama climático para la serie 1983-2010..... | 86 |
| Figura 5.1. Diagrama de flujo metodológico para el SWAT. | 90 |
| Figura 5.2. Unidades de respuesta hidrológica..... | 94 |
| Figura 5.3. Estación de aforo. a) Situación del sensor de presión. b) Muestreador automático modelo ISCO 6720. | 96 |
| Figura 5.4. Evolución de la concentración de CO₂ a lo largo del siglo XXI según distintos escenarios (Houghton et al. 2001). | 108 |
| Figura 6.1. Evolución temporal de las precipitaciones anuales en el área de estudio. | 112 |
| Figura 6.2. Distribución estacional de la precipitación para toda la serie de datos y para el periodo de calibración y validación. | 112 |
| Figura 6.3. Patrón estacional de la temperatura del aire en el área de estudio. | 113 |
| Figura 6.4. Radiación diaria media mensual en el área de estudio para el periodo de calibración y validación..... | 114 |
| Figura 6.5. Velocidad del viento media mensual en el área de estudio durante el periodo de calibración y validación..... | 115 |
| Figura 6.6. Humedad relativa media mensual en el área de estudio durante el periodo de calibración y validación..... | 116 |
| Figura 6.7. Curva de duración de los sedimentos en la cuenca..... | 120 |
| Figura 6.8. Variación diaria de la precipitación y del caudal en la cuenca..... | 122 |
| Figura 6.9. Relación entre la precipitación y escorrentía del evento. | 122 |
| Figura 6.10. Producción mensual de sedimentos y nitratos (N-NO₃) en la cuenca.. | 123 |
| Figura 6.11. Las infraestructuras viarias como fuente de sedimentos a)Trabajos de desmonte. b) Aporte de sedimentos desde un vial próximo al cierre de la cuenca..... | 124 |
| Figura 6.12. Áreas fuente de sedimentos en la cuenca del Corbeira..... | 124 |
| Figura 6.13. Fotografía mostrando la retención de sedimentos en una pradera. | 125 |
| Figura 6.14. Sensibilidad de los parámetros del modelo SWAT relacionados con la hidrología en la cuenca del río Corbeira. | 131 |

| | |
|---|-----|
| Figura. 6.15. Vegetación de ribera en los márgenes del cauce principal del río Corbeira..... | 135 |
| Figura 6.16. Caudal observado y estimado durante el periodo de calibración (octubre 2005 - septiembre 2008) y validación (octubre 2008 - septiembre 2010). | 139 |
| Figura 6.17. Diferentes tipos de flujo simulados por el SWAT. | 141 |
| Figura 6.18. Comparación del contenido diario de agua del suelo calculado por el método MAFF y simulado por el SWAT. | 142 |
| Figura 6.19. Valores mensuales observados y estimados de producción de sedimentos. | 143 |
| Figura 6.20. Evolución temporal de las concentraciones de sedimentos durante eventos de escorrentía..... | 144 |
| Figura 6.21. Valores observados y estimados de producción diaria de sedimentos. | 145 |
| Figura 6.22. Sedimentos estimados acumulados frente a los sedimentos observados. | 146 |
| Figura 6.23. Fósforo particulado observado y estimado. | 147 |
| Figura 6.24. Distribución espacial de la producción media anual de sedimentos. .. | 148 |
| Figura 6.25. Proporción de producción de sedimentos para cada uso del suelo..... | 149 |
| Figura 6.26. Ubicación de las principales parcelas agrícolas que actúan como fuente de sedimentos en la cuenca del río Corbeira. | 150 |
| Figura 6.27. Comparación de la carga mensual de N-NO ₃ observada y estimada. .. | 152 |
| Figura 6.28. Distribución de la exportación media anual de N-NO ₃ (simulada). | 154 |
| Figura 6.29. Proporción de N-NO ₃ exportados por cada uso del suelo..... | 155 |
| Figura 6.30. Contribución del tipo de flujo a la carga de N-NO ₃ | 155 |
| Figura 6.31. Rango de variación de las medias anuales de temperatura y precipitación. 2031-2060 (proyecto ENSEMBLES). | 158 |
| Figura 6.31. (Continuación) Rango de variación de las medias anuales de temperatura y precipitación. 2069-2098 (proyecto ENSEMBLES). Los símbolos identifican los distintos modelos globales..... | 159 |

| | |
|---|------------|
| Figura 6.32. Precipitación (a) y temperatura (b) mensual en el área de estudio y proyecciones de cambio climático. | 160 |
| Figura 6.33. Respuesta de la evapotranspiración, descarga de agua, sedimentos y nitratos a cambios en temperatura (T), precipitación (P) y concentración de CO₂ atmosférico. | 164 |
| Figura 6.34. Respuesta de la biomasa vegetal a cambios en temperatura (T), precipitación (P) y concentraciones de CO₂ atmosférico. | 164 |
| Figura 6.35. Respuesta de los diferentes tipos de flujo y contenido de agua en el suelo a cambios en temperatura (T), precipitación (P) y concentraciones de CO₂ atmosférico. | 165 |
| Figura 6.36. Respuesta de la evapotranspiración, flujo superficial y flujo subsuperficial a cambios en la precipitación. | 167 |
| Figura 6.37. Respuesta de la erosión en los terrenos de cultivo a cambios en la precipitación..... | 170 |
| Figura 6.38. Impacto de los cambios de temperatura (T) o precipitación (P) en la descarga de agua (a), sedimentos (b) y nitratos (c) a escala estacional..... | 174 |
| Figura 6.39. Variación en el índice de área foliar del maíz en las simulaciones estacionales que consideran incremento en la temperatura respecto al escenario de referencia. | 176 |
| Figura 6.40. Impacto del efecto combinado de cambios en la temperatura, precipitación y concentración de CO₂ sobre la evapotranspiración y la descarga de agua, sedimentos y nitratos, para los periodos 2031-2060 y 2060-2098. | 181 |
| Figura 6.41. Impacto del efecto combinado de cambios en la temperatura, precipitación y concentración de CO₂ sobre la descarga de agua (a), sedimentos (b) y nitratos (c) a escala estacional para los periodos 2031-2060 y 2060-2098. | 186 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1.1. Atributos de la cobertura vegetal y condiciones hidrológicas (SCS, 1972). | 18 |
| Tabla 1.2. Límites de lluvia para estimar las condiciones de humedad antecedente (SCS, 1972)..... | 19 |
| Tabla 1.3. Equivalencia del NC de la condición de humedad antecedente II a las condiciones I (seco) y III (húmedo). (Según SCS, 1972). | 19 |
| Tabla 1.3. (Continuación) Equivalencia del NC de la condición de humedad antecedente II a las condiciones I (seco) y III (húmedo). (Según SCS, 1972). | 20 |
| Tabla 5.1. Resumen de modelos del proyecto ENSEMBLES considerados para este estudio. | 106 |
| Tabla 6.1. Datos utilizados para crear el generador climático del SWAT..... | 117 |
| Tabla 6.2. Descarga de agua, exportación de sedimentos, nitratos y precipitación en la cuenca del Corbeira. | 118 |
| Tabla 6.3. Parámetros y rango de los parámetros usados en el análisis de sensibilidad (se incluyen parámetros usados en los tres módulos)..... | 127 |
| Tabla 6.3. (Continuación) Parámetros y rango de los parámetros usados en el análisis de sensibilidad (se incluyen parámetros usados en los tres módulos). | 128 |
| Tabla 6.4. Parámetros más sensibles para la calibración hidrológica del SWAT en la cuenca del río Corbeira. | 129 |
| Tabla 6.4. (Continuación) Parámetros más sensibles para la calibración hidrológica del SWAT en la cuenca del río Corbeira. | 130 |
| Tabla 6.5. Relación de los parámetros hidrológicos más sensibles del SWAT obtenidos en algunos estudios. | 133 |
| Tabla 6.6. Parámetros que influyen en el transporte de sedimentos y efecto de sus respectivos ajustes..... | 134 |
| Tabla 6.7. Parámetros que influyen en el transporte de nitratos y efecto de sus respectivos ajustes..... | 136 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 6.8. Estadísticos de calibración y validación de los datos diarios de caudal. . | 138 |
| Tabla 6.9. Estadísticos de la calibración y validación de los datos mensuales de sedimentos..... | 143 |
| Tabla 6.10. Estadísticos de la calibración y validación de los datos diarios de producción de sedimentos | 145 |
| Tabla 6.11. Estadísticos de la calibración y validación de los datos mensuales de nitratos..... | 152 |
| Tabla. 6.12. Estadísticos del rendimiento del modelo para la estimación de valores promedio anuales de descarga de agua, sedimentos y nitratos. | 156 |
| Tabla. 6.13. Escenarios de cambio climático usados para evaluar la respuesta anual de la descarga de agua, sedimentos y nitratos. | 162 |
| Tabla. 6.13. (Continuación) Escenarios de cambio climático usados para evaluar la respuesta anual de la descarga de agua, sedimentos y nitratos. | 163 |
| Tabla. 6.14. Escenarios de cambio climático usados para evaluar la respuesta estacional de la descarga de agua, sedimentos y nitratos. | 173 |
| Tabla 6.15. Escenarios de cambio climático usados para evaluar la respuesta anual de la descarga de agua, sedimentos y nitratos a cambios simultáneos de T, P y CO ₂ | 180 |
| Tabla 6.16. Efecto de los escenarios con incrementos de CO ₂ (escenarios 1 y 3) y sin incremento de CO ₂ sobre la respuesta de la descarga de agua anual..... | 184 |

RESUMEN, RESUMO Y ABSTRACT

RESUMEN

El objetivo de esta tesis es la aplicación, calibración y validación del modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) para descarga de agua, sedimentos y nitratos en una pequeña cuenca agroforestal, localizada en la provincia de A Coruña (noroeste de España), representativa del clima atlántico. Con los resultados de las simulaciones se evalúa el efecto del cambio climático sobre la respuesta hidrosedimentaria y sobre la exportación de nitratos de la cuenca.

De los resultados de este estudio se deduce que el modelo hidrológico SWAT es una herramienta útil para predecir los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos y la producción de sedimentos y nitratos a escala de cuenca. Esta herramienta también permite evaluar cambios en el uso del suelo y planes de manejo, por ejemplo con vistas a la implementación de la Directiva Marco del Agua en la cuenca del Corbeira y en áreas con similares condiciones ambientales y geomorfológicas.

RESUMO

O obxectivo deste traballo é a aplicación, calibración e validación do modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) para descarga de auga, sedimentos e nitratos nunha pequena bacía agroforestal localizada na provincia de A Coruña (NO España), representativa do clima Atlántico. Cos resultados das simulacións avalíase o efecto do cambio climático sobre a resposta hidrosedimentaria e sobre a exportación de nitratos da conca.

Os resultados deste estudo indican que o modelo hidrolóxico SWAT é unha ferramenta útil para prever os efectos do cambio climático sobre os recursos hídricos e a produción de sedimentos e nitratos, a escala de bacía. Esta ferramenta tamén é útil para avaliar os cambios no uso da terra e os plans de xestión, por exemplo, con vistas á aplicación da Directiva Marco da Auga na bacía do Corbeira e en áreas con condicións ambientais e xeomorfolóxicas semellantes.

ABSTRACT

The objective of this thesis is the application, calibration and validation of SWAT model (*Soil and Water Assessment Tool*) for water discharge, sediment and nitrates in a small agroforestry catchment, located in the province of A Coruña (NW Spain), representative of Atlantic climate. With the simulation results, we evaluated the effect of climate change on hydrosedimentary response and on the production exportation of nitrates in the catchment.

The results of this study suggest that the hydrological model SWAT is a useful tool for predicting the effects of climate change on water resources and sediment yield and nitrate at the catchment scale. This tool also allows evaluate changes in land use and management plans, for example with a view to the implementation of the Water Framework Directive in Corbeira catchment and in areas with similar environmental and geomorphological conditions.

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO

Una cuenca es la unidad geográfica natural ideal para comprender el comportamiento hidrológico y la dinámica de contaminantes en un territorio, así como para la gestión del medio natural (Chow et al., 1994). Sin embargo, es ampliamente reconocida la complejidad de los estudios a escala de cuenca, a causa del elevado número de factores y procesos que actúan simultánea y sucesivamente en la movilización, transferencia y almacenamiento de sedimentos y nutrientes a dicha escala. Entre los principales factores se encuentran: el tamaño de la cuenca, la climatología, la geología, los tipos de suelos, la distribución de usos del suelo (Steege et al., 2001) la topografía y el porcentaje de áreas que funcionan como fuente o sumidero. Además, en cuencas agroforestales las prácticas agrícolas y silvícolas, la distribución y extensión de áreas ribereñas también son factores a tener en cuenta.

Debido a que los procesos que actúan a escala de cuenca están íntimamente ligados entre sí, no es posible manejarlos de manera aislada. Es por ello que más que hablar de un manejo del suelo o del agua, debemos hablar de un manejo integrado de cuencas (MA, 2003). El estudio integral de una cuenca implica la ordenación y análisis de una gran cantidad de datos espacialmente distribuidos y variables en el tiempo. En este contexto, los modelos integrales de cuenca se muestran como una herramienta general de análisis y predicción muy válida. En los últimos años, el uso de modelos de simulación hidrológica a nivel de cuenca está tomando mayor relevancia permitiendo conocer su dinámica hídrica bajo escenarios actuales y futuros. Este análisis es necesario en la planificación vinculada al cambio de uso del suelo, a las actividades de reforestación, al efecto del cambio climático y a la realización de obras hidráulicas, entre otros.

Las consecuencias del Cambio Global sobre la calidad y cantidad de los recursos hídricos son en la actualidad uno de los temas que despiertan mayor interés. Las predicciones sobre la evolución de las temperaturas y precipitaciones, basadas en modelos de diferente resolución y grado de incertidumbre, alertan sobre la posibilidad de que los recursos hídricos experimenten a corto y medio plazo importantes fluctuaciones con tendencia negativa (Whitfield et al., 2002), (IPCC, 2007). Una temprana evaluación de la vulnerabilidad de los recursos hídricos frente al cambio climático permite anticipar potenciales impactos negativos y así planificar y dictar acciones con tiempo. Como parte de la evaluación anterior, es esencial analizar no sólo estos potenciales impactos (ya sean positivos o negativos), sino también se deben definir aquellas medidas de adaptación que son más adecuadas para dar respuesta a dichos impactos y así disminuir la vulnerabilidad. Por ello, es necesario contar con herramientas que permitan tomar decisiones informadas. Una forma de evaluar el efecto del cambio climático sobre la hidrología de una cuenca es utilizar un modelo hidrológico, el cual una vez calibrado y validado es modificado con cambios (porcentaje de variación en la precipitación y de cambio en la temperatura) obtenidos de distintos escenarios climáticos futuros.

La aproximación experimental en cuencas de pequeño tamaño permite el estudio detallado de los procesos de generación de escorrentía y transporte de sedimentos, así como la calibración y validación de modelos hidrológicos. Este estudio se ha centrado en la cuenca del río Corbeira, en la que desde el año 2005, se registran varios tipos de datos: climáticos, caudal, concentración de sedimentos y nutrientes (nitrógeno y fósforo), entre otros parámetros. Los datos climáticos, junto con los de caudal y sedimentos, se utilizaron en esta tesis para calibrar y validar el modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), tras lo cual se utilizó para realizar simulaciones de los efectos del cambio climático sobre la respuesta hidrológica y sedimentaria de dicha cuenca.

1.2. CICLO HIDROLÓGICO

El agua en la naturaleza está en movimiento constante, describiendo un circuito cerrado que se denomina ciclo hidrológico. La figura 1.1 muestra una visión esquemática de este ciclo. Se puede suponer que el ciclo hidrológico se inicia con la evaporación del agua en los océanos por efecto de la radiación solar. Por procesos atmosféricos (enfriamiento) el vapor de agua se condensa para formar nubes, que a su vez dan lugar a las precipitaciones. No toda la precipitación alcanza la superficie del suelo ya que la mayoría de la lluvia es interceptada por la vegetación y de nuevo regresa a la atmósfera por **evaporación**. Del agua que alcanza la superficie del suelo, una parte se evapora mientras otra sigue distintas rutas, en función de las características edáficas, topográficas, de vegetación, etc.

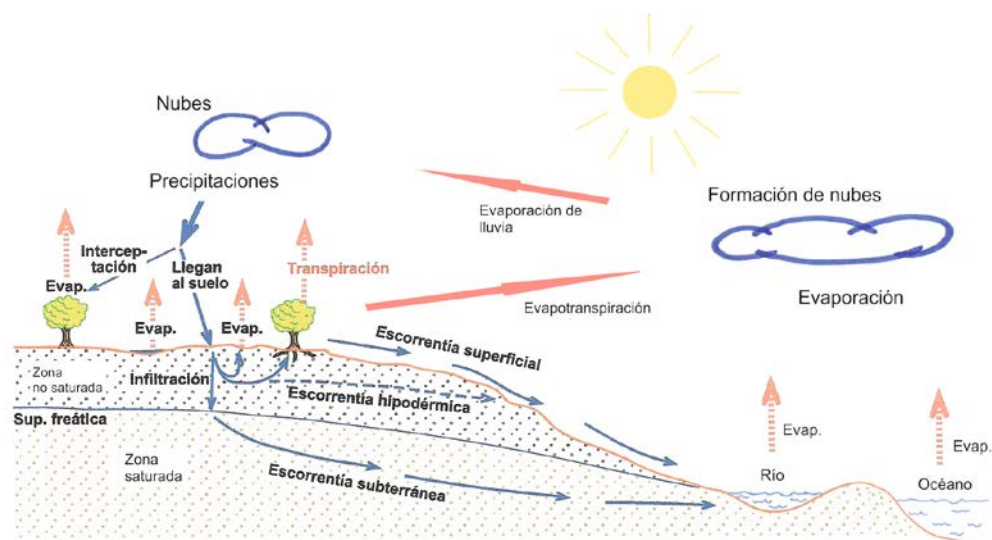


Figura 1.1. Esquema del ciclo hidrológico.

Una porción de la precipitación que alcanza la superficie terrestre se **infiltra** en el suelo, la cual puede permanecer en la zona no saturada (matriz del suelo en la que los poros contienen aire y agua) contribuyendo a la reserva de agua del suelo o bien desplazarse a niveles más profundos hasta alcanzar la zona saturada (poros llenos de agua). Las rutas que sigue el agua de infiltración en cada caso son las siguientes:

- a) En la zona no saturada del suelo

- Evaporación, sin relación con la vegetación.
- Transpiración. Las raíces de las plantas absorben el agua infiltrada, una pequeña parte es retenida para su crecimiento y la mayor parte es transpirada. La pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación se denomina evapotranspiración.
- Otra parte del agua de infiltración circula lateralmente, debido al efecto del gradiente del potencial hidráulico, por las capas más superficiales del suelo constituyendo el flujo subsuperficial o flujo hipodérmico (interflow), que emerge descargando en los lechos de las corrientes de agua. El desplazamiento del agua vía subsuperficial a través de la matriz del suelo es lento en medios no saturados, contribuyendo al mantenimiento prolongado del caudal de base (entendido como el caudal que continúa después de una crecida en ausencia de precipitación), mientras que, en medios saturados el movimiento ocurre rápidamente por transmisión (Hewlett y Hibbert, 1967). Algunos autores, como Bonell et al. (1984), indican que la transmisión del agua vía subsuperficial está favorecida por la presencia de macroporos en la matriz del suelo, los cuales facilitan la transmisión de agua libre y la formación de una escorrentía subsuperficial preferente.

b) En la zona saturada del suelo

- Parte del agua infiltrada, debido a la gravedad, continúa moviéndose verticalmente hacia zonas más profundas, alcanzando primero la superficie de la capa freática, en donde todavía puede ser absorbida por las raíces de las plantas freatófilas de raíces muy profundas que, a diferencia de otras plantas, adquieren el agua del medio saturado.
- Finalmente, el agua restante da lugar a la escorrentía subterránea y recarga los acuíferos.

El agua de las precipitaciones que no es evaporada ni infiltrada, circula superficialmente (**escorrentía superficial**) y se concentra en pequeños cauces que posteriormente formarán regatos que desembocan en los ríos. Es sabido que existen dos mecanismos de formación de escorrentía superficial: la escorrentía de tipo hortoniano (Horton, 1932) y la escorrentía por saturación del suelo. La primera ocurre cuando la intensidad del aporte de agua excede la capacidad de infiltración del suelo, de modo que el agua que no llega a ser infiltrada después de llenar las microdepresiones del terreno, escurre superficialmente. Este tipo de escorrentía es raro que se presente en el conjunto de una cuenca. Pese a ello, hoy

en día, numerosos modelos de predicción de crecidas están basados en esta concepción.

El flujo superficial de saturación difiere del flujo superficial hortoniano en que en este último el suelo se satura desde arriba mediante infiltración, en tanto que en el flujo superficial de saturación el suelo se satura desde abajo, es decir ocurre por el ascenso del nivel freático. Cuando todo está saturado su capacidad de infiltración es nula, de modo que todo aporte nuevo de agua solo puede escurrir, o liberar por efecto pistón un volumen de agua equivalente. Este flujo superficial generado por saturación del suelo, ocurre sobre superficies saturadas, generalmente asociadas a afloramientos de la capa freática ocasionados por las características topográficas y/o propiedades de los suelos. Sin embargo, en ocasiones el flujo subsuperficial no puede propagarse aguas abajo debido a la reducción de la capacidad de transmisión del suelo y aflora en superficie por un proceso de exfiltración o escorrentía de retorno.

En general, la escorrentía superficial de tipo hortoniano suele constituir el principal proceso de transferencia de agua en regiones semiáridas, donde la intensidad de la precipitación es elevada, en cuencas de carácter urbano y en áreas desprovistas de vegetación o con una débil cobertura (García-Ruiz et al., 2005). Por el contrario, en zonas húmedas donde la capacidad de infiltración de los suelos es alta (salvo que la cobertura vegetal sea destruida), la escorrentía subsuperficial y la escorrentía superficial por saturación constituyen las principales rutas de aporte de agua a los ríos, quedando confinado el flujo hortoniano a zonas impermeables o con baja capacidad de infiltración tales como carreteras, aparcamientos, zonas de construcción, suelos agrícolas compactados y encostrados, etc. (Hewlett y Hibbert, 1967; Taboada-Castro et al., 1999; Rial Rivas, 2007; Rodríguez-Blanco et al., 2012, Palleiro et al., 2013).

Bajo la influencia de la gravedad, tanto la escorrentía superficial como el agua subterránea se desplazan hacia las zonas bajas, y con el tiempo pasan a integrar la escorrentía total de un río para fluir hacia los océanos.

1.3. MODELOS HIDROLÓGICOS

De forma general, un modelo es cualquier sustituto material o inmaterial de un ente, fenómeno o cosa, de cuyo estudio es posible inferir, al menos bajo ciertas restricciones, el comportamiento del ente natural (Andreu, 1993). Una acepción de la palabra *modelo*, lo define como *una representación simplificada de la realidad, en la que aparecen algunas de sus propiedades*. De la definición se deduce que la realidad que representa el modelo reproduce sólo algunas de las propiedades del objeto, reduciendo su complejidad.

En el ámbito de la modelación hidrológica, los modelos son representaciones de los fenómenos hidrológicos que se presentan en el ciclo del agua. La evaluación de los recursos hídricos requiere la realización de balances en los diferentes componentes del ciclo hidrológico, abordables mediante análisis complejos que involucran variaciones temporales y/o espaciales de precipitación, pérdidas o abstracciones hidrológicas y escorrentía. Las pérdidas hidrológicas son los procesos físicos que actúan para reducir la precipitación total a precipitación efectiva. Como se indicó en el apartado anterior son varios los procesos que rigen la abstracción de la precipitación por la cuenca, interceptación, infiltración, almacenamiento de agua por la superficie, evaporación, evapotranspiración, etc. La realización de modelos matemáticos de estos sistemas, permite obtener herramientas para definir y simular distintas situaciones de utilización de los recursos hídricos. Existen múltiples modelos hidrológicos que han sido desarrollados para analizar opciones para una mejor gestión del agua. El desarrollo y la evolución de los modelos hidrológicos están influenciados por el avance en los sistemas de cómputo, ya que la modelización requiere gran cantidad de información como por ejemplo datos climáticos, topográficos, tipos y usos del suelo, características de los canales de flujo, etc. Con frecuencia se recurre a la clasificación de los modelos atendiendo a criterios que describen aspectos tales como caracterización de variables en el espacio, paso de tiempo para efectuar los cálculos, escala de trabajo, etc.

Según Llamas (1993) e Ibáñez et al. (1995) se pueden considerar los siguientes criterios y tipos de modelos:

- a) Atendiendo a la base del modelo
 - EMPÍRICOS, también llamados modelos de función respuesta, como son las ecuaciones de regresión lineal.
 - DE BASE FÍSICA, compuestos de ecuaciones derivadas de leyes físicas.
- b) Con relación a su aleatoriedad
 - DETERMINISTAS, cuando un dato de entrada dado produce siempre un mismo resultado, de modo que no se considera la existencia de aleatoriedad.
 - ESTOCÁSTICOS, cuando los resultados son, al menos, parcialmente aleatorios.
- c) Considerando la distribución de variables en el espacio (Fig. 1.2)
 - AGREGADOS, si las variables que definen el sistema estudiado son promediadas en el espacio o bien los cálculos se efectúan para un único punto, sin dimensiones en el espacio. Es decir, no se considera variabilidad espacial, o dicho de otro modo, son modelos con una sola celda. Por ejemplo, al modelar una cuenca hidrográfica de forma agregada se consideran por una parte las entradas por precipitación y por otra los caudales en un punto del río a la salida de la cuenca. Sin embargo, se usan valores medios de evapotranspiración, infiltración, etc. Este tipo de modelos presentan la ventaja de que no necesitan de la calibración de demasiados parámetros y utilizan una expresión matemática sencilla, pero solo proporcionan valores medios.
 - DISTRIBUIDOS, si se conoce la distribución espacial y temporal de las variables de entrada, las variables de salida se calculan en función del espacio y el tiempo. En otras palabras, incorporan datos concernientes a la distribución espacial de variables y parámetros, así como algoritmos que permiten evaluar la influencia que tienen las características espaciales sobre el comportamiento de los procesos simulados. Se realiza una discretización del medio físico a estudiar, esto es, se divide la zona de estudio en celdas con diferentes valores para variables y parámetros. Tomando como ejemplo el caso anterior, para cada celda tendremos un determinado valor de la precipitación, y como respuesta a este y a la interacción con las demás celdas unos determinados caudales circulantes por cada punto. El problema de estos modelos reside en el gran número de datos de entrada, que hace imprescindible el uso de herramientas informáticas como los sistemas de información geográfica y la geoestadística.
 - SEMIDISTRIBUIDOS, intentan aprovechar las ventajas de los anteriores, evitando sus inconvenientes. Siguiendo con el ejemplo de

la cuenca hidrográfica, un modelo semidistribuido abordaría el problema considerando diferentes subcuencas o incluso Unidades de Respuesta Hidrológica (URHs) dentro de cada subcuenca. Se trata de segmentos de ladera homogéneos en cuanto a su pendiente, orientación, litología y uso a los que se asume una respuesta hidrológica única. Daría así un alto nivel de precisión sin necesitar una entrada de datos tan grande.

d) Desde el punto de vista temporal

- CONTINUOS, los cuales pretenden representar la evolución de un sistema, sin interrupción, durante periodos prolongados, es decir, el modelo simula para periodos largos de tiempo, meses o años, la variable o variables estudiadas.
- EVENTOS, tratan de simular la respuesta de un sistema natural tras un suceso o impacto determinado. Por ejemplo simulan variables como la escorrentía o la erosión en un intervalo breve de tiempo, es decir durante e inmediatamente después de un episodio individual de precipitación.

e) En relación a la escala de trabajo

Las dimensiones del paisaje a analizar pueden ser variables, desde una simple parcela, una ladera, una cuenca de drenaje, un territorio de grandes dimensiones (regiones, países, etc.).

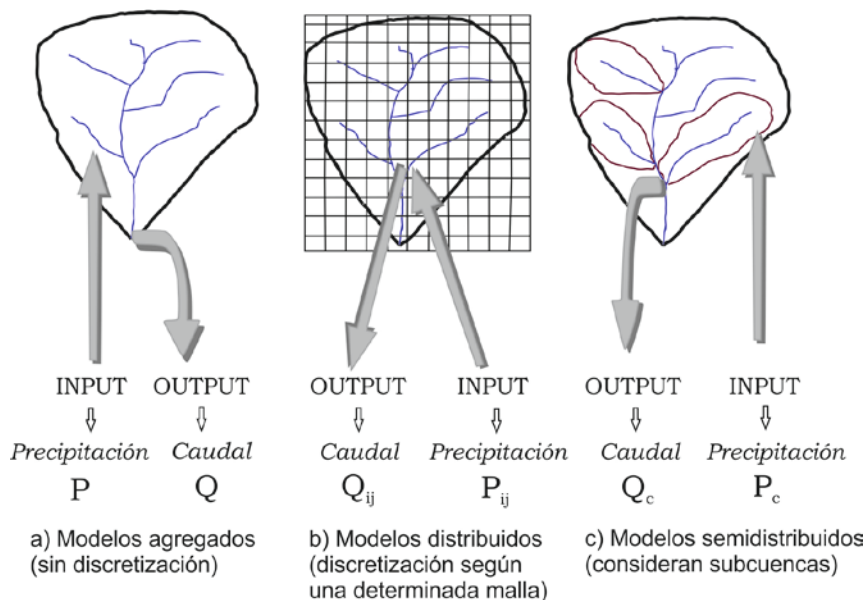


Figura 1.2. Esquema mostrando los tres tipos de discretización para una cuenca hidrográfica.

A continuación se presenta una breve síntesis de las principales capacidades de algunos modelos de amplia difusión en el medio.

1.3.1. DESCRIPCIÓN DE ALGUNOS MODELOS

1.3.1.1. MODELOS EMPÍRICOS

1.3.1.1.1. USLE

La investigación sobre la erosión hídrica del suelo y su efecto en la productividad agrícola se inició en 1930. En el periodo de 1940 a 1956, los investigadores comenzaron a desarrollar un procedimiento cuantitativo para la estimación de la pérdida de suelo en las zonas maiceras de los Estados Unidos. Basándose en los datos reunidos y en estudios previos, Wischmeier, Smith, y otros desarrollaron la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) (Universal Soil Loss Equation). La USLE, formulada definitivamente a finales de la década de los setenta (Wischmeier y Smith, 1978), estima las pérdidas anuales de suelo (entendidas como valores estadísticamente promediados de un número representativo de años) provocadas en una parcela por la erosión superficial, laminar y en regueros.

Estudios posteriores (Mitchell y Bubenzar, 1980) han comprobado experimentalmente que el uso de la USLE es adecuado para:

- Predecir, en condiciones específicas de uso del suelo, la pérdida anual de suelo.
- Servir como guía en la elección de sistemas de cultivo y prácticas agrícolas.
- Obtener estimaciones de pérdida de suelo, para determinar la conveniencia de efectuar planes de conservación.
- Simular el resultado de la aplicación de diferentes prácticas de conservación.
- Ordenación territorial de diferentes usos del suelo en función de los riesgos de erosión.

La ecuación tiene la siguiente expresión:

$$A = R * K * LS * C * P \quad (1.1)$$

donde:

A: Pérdida de suelo (t/ha/año)

R: Factor de erosividad de la lluvia (MJ mm/ha h año)

K: Factor de erosionabilidad del suelo (t ha h/MJ ha mm)

LS: Factor topográfico (adimensional)

C: Factor de cubierta vegetal (adimensional)

P: Factor de prácticas de conservación (adimensional)

PÉRDIDA DE SUELO (A)

La pérdida de suelo se refiere a la cantidad de suelo perdido en un lugar concreto por la acción erosiva del agua en un año, expresada en t/ha/año, y por tanto no es válida para un evento particular.

FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA (R)

El factor R (Wischmeier, 1959) representa la capacidad de la lluvia para producir erosión superficial. Se calcula en base a la energía cinética de la precipitación, que es en definitiva la energía capaz de desagregar el suelo en las partículas individuales que posteriormente serán transportadas por la salpicadura o por la escorrentía. Responde a las características físicas de la lluvia (Hudson, 1982): a mayor tamaño de gota mayor masa y mayor velocidad de caída; a mayor masa y velocidad, mayor energía cinética de impacto; a mayor energía cinética de impacto mayor desagregación; y, finalmente, a mayor desagregación más pérdidas de suelo.

Este factor se deduce a partir del producto de la energía cinética liberada por la lluvia (E) y la máxima intensidad de precipitación durante un intervalo de 30 minutos (I30) de la tormenta. Los cálculos para la determinación del factor R requieren información detallada de las precipitaciones, con un registro continuo de las variaciones de intensidad de la lluvia durante el aguacero. Se asume que el índice de erosividad de las lluvias es relativamente constante para cada zona, puesto que se trata de un valor promedio anual.

FACTOR DE EROSIONABILIDAD DEL SUELO (K)

El factor de erosionabilidad del suelo (K) es una descripción cuantitativa de la erosionabilidad inherente de un suelo, entendida esta como la vulnerabilidad o susceptibilidad del suelo a la erosión, es decir es una medida de la susceptibilidad del suelo al arranque y transporte producido por los agentes de la erosión. Según Evans (1980), la erosionabilidad del suelo es una característica propia del suelo ligada a su textura, estructura, estabilidad de la estructura, pedregosidad superficial, condiciones hidrológicas, etc. y es distinto a la erosión del suelo. No solamente las características físicas del suelo influyen en su erosionabilidad, sino también las prácticas agrícolas como el laboreo, fertilización y calidad del agua de riego.

El factor K representa la cantidad promedio de suelo perdido por unidad del factor erosividad de la lluvia, cuando el suelo en cuestión es mantenido permanentemente desnudo, con laboreo secundario a favor de una pendiente del 9% de gradiente y 22,13 m de longitud.

FACTOR TOPOGRÁFICO (LS)

El factor topográfico (LS) se refiere al efecto que sobre la erosión causan la longitud de la pendiente (L) y su gradiente (S). Wischmeier y Smith (1978) definen la longitud de la pendiente como la distancia desde el origen de la escorrentía superficial hasta el inicio del depósito de los sedimentos o su concentración en un cauce. El factor LS representa la tasa de pérdida de suelo para una longitud de pendiente y gradiente dada, respecto a la pérdida de suelo de una pendiente con una longitud de 22,13 m y un gradiente del 9%.

Está comprobado experimentalmente que las pérdidas de suelo por unidad de superficie aumentan proporcionalmente con la longitud de la pendiente, siendo mayores en su parte más baja debido a que la lámina de escorrentía se va acumulando aguas abajo, incrementándose a medida que desciende por la pendiente, su fuerza de arrastre. Por otra parte en pendientes de mayor longitud es más frecuente la aparición de regueros, en los que aumenta localmente la tasa

de erosión al concentrarse el agua en estos pequeños cauces, aumentando su velocidad y capacidad de abrasión del canal y de transporte de partículas del suelo erosionadas (Meyer et al., 1975).

FACTOR DE CUBIERTA VEGETAL (C)

Este factor se refiere a la cobertura del suelo del área de estudio y refleja el efecto de la cubierta vegetal y las prácticas de manejo en las tasas de erosión (Dismeyer y Foster, 1984). Este factor se determina en función del tipo de cultivo o vegetación natural, asignándole un coeficiente que ajuste el grado de cobertura para cada tipo de cubierta vegetal.

La vegetación es un componente muy importante en la conservación del suelo por su efecto de protección frente a la erosión. De acuerdo con el USDA Forest Service (Dismeyer y Foster, 1984) esta protección del suelo frente a la erosión es función de varios factores, como:

- Permanencia de la vegetación en el suelo. La vegetación arbórea y arbustiva es permanente, al contrario que los cultivos.
- Desarrollo que alcanza la vegetación.
- Aumento de la materia orgánica del suelo originada por la vegetación natural y determinadas prácticas de cultivo, aumentando entonces la porosidad y permeabilidad del suelo y en consecuencia la infiltración.
- Efectos biológicos de protección, como los que sitúan a las raíces como albergue de microfauna, como consecuencia del incremento de permeabilidad que se produce con la formación de macroporos originados por el aumento de la agregación entre materia orgánica y partículas minerales.
- La cubierta vegetal no solo disminuye la energía con la que llegan las gotas de lluvia a la superficie del suelo, sino también la velocidad de la escorrentía superficial y por tanto, la capacidad erosiva de la misma.

FACTOR DE PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN (P)

Agrupar la influencia que tienen las prácticas de conservación de suelos sobre las tasas de erosión de una parcela, realizando determinados trabajos

culturales o disponiendo la vegetación siguiendo curvas de nivel, en fajas o en terrazas para cortar las líneas de escorrentía.

Las prácticas de conservación del suelo contribuyen a:

- Disminuir la longitud de pendiente efectiva para la escorrentía, aumentando la infiltración.
- Proteger el suelo del impacto de las gotas de lluvia y del arrastre por el agua de escorrentía.
- Reducir la velocidad de escorrentía.

Todos los modelos de erosión simplifican y generalizan algunos procesos reales y en consecuencia tienen limitaciones en su aplicación. Las principales limitaciones de la USLE son:

- Solamente estima la erosión laminar y en regueros.
- Fue establecida para condiciones climáticas, topográficas y agrícolas específicas, lo que puede suponer dificultades para su aplicación en otras condiciones.
- No calcula la deposición de los sedimentos.

1.3.1.1.2. MUSLE

Con el fin de aplicar la USLE a cuencas, Williams (1975) y Williams y Berndt (1977), modificaron el factor R de la USLE obteniendo la MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation). La MUSLE evalúa la producción de sedimentos, debida a erosión laminar y en surcos, a escala de cuenca, durante un determinado episodio tormentoso. En la MUSLE, el factor erosividad de la lluvia se sustituye por un factor de escorrentía lo que mejora la predicción de la erosión con respecto a la USLE. La aplicación de la MUSLE a escala de cuenca hidrográfica requiere un complejo procesamiento de datos, lo que se solventa con la utilización de sistemas de información geográfica. Si las condiciones de la cuenca son similares, puede aplicarse la ecuación sin recurrir a cálculos de tránsito de los sedimentos. Cuando existe variación, debe dividirse en subcuencas y aplicar dicho procedimiento para obtener el aporte de sedimentos en la salida de la cuenca.

La ecuación de la MUSLE, expresada en unidades del sistema internacional responde a la siguiente formulación:

$$Y = 11,78 * (Q * q_p)^{0,56} * K * L * S * C * P \quad (1.2)$$

donde:

Y: Sedimentos aportados al cauce por una tormenta determinada sobre la cuenca (t)

Q: Volumen de escorrentía (m³)

q_p: Caudal punta (m³/s)

K: Erosionabilidad suelo (t ha h/MJ ha mm)

LS: Factor topográfico

C: Factor de cultivo

P: Factor prácticas de conservación

Los factores K, LS, C, y P coinciden en la expresión con los ya expuestos al desarrollar la USLE.

CÁLCULO DEL VOLUMEN DE ESCORRENTÍA (Q)

La escorrentía depende de múltiples factores como el régimen de humedad del suelo, la vegetación y el tipo de suelo. El valor real sólo puede determinarse por vía experimental, para ello es necesaria la instalación de pluviógrafos y estaciones de aforo.

La MUSLE estima la escorrentía por el método del Número de Curva (NC) establecido por el Soil Conservation Service (SCS, 1972) del USDA, actualmente Natural Resources Conservation Service (NRCS).

El cálculo de la escorrentía en el modelo Musle se expresa de la siguiente manera:

$$Q = (P - 0,2S)^2 / P + 0,8S \quad (1.3)$$

donde:

Q: Escorrentía (mm)

P: Precipitación (mm).

S: Parámetro de retención de agua en el suelo (mm)

El término S (mm) se calcula:

$$S = 254 \left(\frac{100}{NC} - 1 \right) \quad (1.4)$$

Donde NC es el número de curva, cuyos valores pueden variar entre 0 y 100, tomando el valor de cero para los suelos con poca capacidad de producir escorrentía (suelos altamente permeables en los que toda el agua de lluvia se transforma en infiltración) y el valor de cien para los suelos totalmente impermeables, en los que toda el agua de lluvia se transforma en escorrentía superficial.

El método del número de curva tiene como finalidad la estimación de los volúmenes de escorrentía superficial y, en combinación con otras metodologías, el cálculo de los caudales máximos de salida de cuencas no aforadas. Este método se efectúa la estimación directa de la escorrentía superficial de una lluvia aislada, básicamente, a partir de cuatro variables:

- La pendiente del terreno, influye decisivamente en la generación de escorrentía.
- El grupo hidrológico de suelo que relaciona la escorrentía con las propiedades hídricas de los suelos y con su predisposición para producir escorrentía.
- El uso que soporta el suelo y que evalúa la influencia de las distintas coberturas vegetales sobre la escorrentía.
- La condición antecedente de humedad, que intenta evaluar el estado de saturación de agua del suelo como medida de la tendencia de éste a transformar la lluvia en escorrentía o en infiltración.

La SCS distingue dos **clases de pendiente**: la clase 1, con un rango que se sitúa entre el 0 y el 3%, y la clase 2, para pendientes comprendidas entre el 3 y el 200%.

El NC diferencia cuatro tipos de **grupos hidrológicos del suelo** según su grado de permeabilidad:

- Suelos tipo A: engloba los sustratos más permeables, es decir, con un potencial de escorrentía mínimo.
- Suelos tipo B: sustratos algo menos permeables que los del tipo anterior y, por tanto, con mayor potencial de escorrentía. Se trata de suelos de permeabilidad moderada cuando están saturados. En esta categoría se incluyen los suelos limosos someros, los suelos franco arenosos y los franco profundos.
- Suelos tipo C: sustratos más impermeables, con un potencial de escorrentía medio-alto. Se trata de suelos franco arenosos someros y con bajo contenido de materia orgánica.
- Suelos tipo D: agrupa los sustratos de menor permeabilidad y, por tanto, mayor potencial de escorrentía.

Respecto a la **cubierta vegetal**, el NC distingue tres categorías, en las que, a su vez, define tres posibles condiciones hidrológicas, concebidas en base a su grado de infiltración (mala, media y buena). Dicha clasificación se muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Atributos de la cobertura vegetal y condiciones hidrológicas (SCS, 1972).

| Cobertura vegetal | Condición hidrológica |
|----------------------------|--|
| <i>Cultivo en rotación</i> | Mala: Contiene una alta proporción de cultivos en hilera, pequeño grano, y barbecho. Buena: Contiene una alta proporción de alfalfa y hierba. |
| <i>Pasto natural</i> | Mala: Con alto pastoreo o cobertura de plantas menor del 50%. Media: Con moderado pastoreo; 50-75% de cobertura. Buena: Con ligero pastoreo; más de un 75% de cobertura. Pradera permanente: 100% de cobertura. |
| <i>Bosque</i> | Mala: Con alto pastoreo o quema regular de modo que el matorral, los pequeños árboles, y la maleza son destruidos. Media: Bosque con pastoreo pero no quemado; puede haber matorral. |

En lo que atañe al **estado de humedad antecedente**, el SCS (1972) define tres estados (seco, normal y húmedo) en función de la cantidad de lluvia acumulada en los cinco días precedentes. Los límites de estas condiciones varían según el estado de latencia o crecimiento en que se encuentre la vegetación de la cuenca (tabla 1.2.)

Tabla 1.2. Límites de lluvia para estimar las condiciones de humedad antecedente (SCS, 1972)

| Precipitación total acumulada en los 5 días anteriores | | |
|---|-----------------------------------|--|
| Humedad previa | Plantas en periodo latente | Plantas en periodo de crecimiento |
| I (seco) | Menos de 13 mm | Menos de 35 mm |
| II (normal) | De 13 a 32 mm | De 35 a 52 mm |
| III (húmedo) | Más de 32 mm | Más de 52 mm |

Una vez obtenidos los números de curva, sin considerar las condiciones de humedad (es decir en la situación II de la tabla 1.2.) y teniendo en cuenta la distribución y superficie de los diferentes usos del suelo y vegetación en la cuenca, se procede a ponderar un número de curva medio para la cuenca. Posteriormente, en base a las condiciones de humedad antecedente, se corrige a la condición real a partir de la tabla 1.3.

Tabla 1.3. Equivalencia del NC de la condición de humedad antecedente II a las condiciones I (seco) y III (húmedo). (Según SCS, 1972).

| NC para condición de humedad antecedente | | |
|---|----------|------------|
| II | I | III |
| 100 | 100 | 100 |
| 95 | 87 | 98 |
| 90 | 78 | 96 |
| 85 | 70 | 94 |
| 80 | 63 | 91 |
| 75 | 56 | 88 |
| 70 | 51 | 85 |

Tabla 1.3. (Continuación) Equivalencia del NC de la condición de humedad antecedente II a las condiciones I (seco) y III (húmedo). (Según SCS, 1972).

| NC para condición de humedad antecedente | | |
|--|----|-----|
| II | I | III |
| 65 | 45 | 82 |
| 60 | 40 | 78 |
| 55 | 35 | 74 |
| 50 | 31 | 70 |
| 45 | 26 | 65 |
| 40 | 22 | 60 |
| 35 | 18 | 55 |
| 30 | 15 | 50 |
| 25 | 12 | 43 |
| 20 | 9 | 37 |
| 15 | 6 | 30 |
| 10 | 4 | 22 |
| 5 | 2 | 13 |

Obtenido el NC para cada evento y las precipitaciones que lo causan, se calcula la lluvia neta y el volumen de escorrentía generado.

CÁLCULO DEL CAUDAL PUNTA (QP)

El caudal pico (Q_p) se calcula generalmente mediante la metodología del número de curva o por el método racional. Según el número de curva:

$$Q_p = \frac{(2,1QA)}{(1000(0,5D+0,6tc))} \quad (1.5)$$

donde:

Q_p : Caudal punta $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

Q: Escorrentía (mm), calculada mediante el número de curva.

A: Superficie de la cuenca (ha)

D: Duración de la lluvia efectiva (horas)

t_c : tiempo de concentración (horas).

El tiempo de concentración se calcula mediante la fórmula de Kirpich:

$$t_c = 0,000325 \left(\frac{L^{0,77}}{S^{0,385}} \right) \quad (1.6)$$

donde:

S = pendiente media del cauce principal

L = longitud del cauce principal (m)

Según el método racional:

$$Q_p = CIA/360 \quad (1.7)$$

donde:

C: coeficiente de escorrentía, dependiente de la cobertura vegetal de la cuenca.

I: intensidad de la precipitación (mm/h).

A: área de la cuenca (ha).

1.3.1.2. MODELOS FÍSICOS

1.3.1.2.1. CREAMS

El modelo CREAMS (*Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*) desarrollado por el Departamento de Agricultura de EE.UU. (Knisel, 1980) es uno de los primeros que presenta base determinista. Se trata de un modelo agregado que opera de modo continuo y a escala de parcela. No tiene en cuenta la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, lo que es un factor negativo para el estudio de la escorrentía y erosión, ya que estos son procesos que tienen una alta variabilidad espacio-temporal (Ludwig, 1992; Valcárcel et al., 2003; Florsheim et al., 2011). Por otra parte, al ser un modelo continuo representa la evolución del sistema, sin interrupción, durante periodos de tiempo prolongado y sin tener en cuenta las características de cada tormenta. Describe la parcela y sus parámetros mediante varios segmentos de pendiente que

dan cuenta del flujo superficial medio y otros segmentos de pendiente que permiten modelizar el canal. Consta de tres componentes:

- un SUBMODELO HIDROLÓGICO que o bien utiliza para el cálculo de la escorrentía, datos de precipitación diaria usando el método del Número de Curva (SCS) o el modelo de infiltración de Green-Ampt.
- un SUBMODELO DE EROSIÓN que emplea ecuaciones independientes para describir la disgregación del suelo por la precipitación (erosión entresurcos) y disgregación del suelo por flujo (erosión en surcos). Las dos ecuaciones de disgregación del suelo, son esencialmente, una forma modificada de la USLE.
- un SUBMODELO QUÍMICO

1.3.1.2.2. ANSWERS

El modelo ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation), es el primer ejemplo de modelo distribuido asociado a un sistema de información geográfica, que trabaja a escala de evento. Desarrollado por Beasley y Huggins (1981), simula escorrentía y transporte de sedimentos a escala de cuenca.

La cuenca se representa mediante una serie de celdas cuadradas con un tamaño que oscila entre 1 y 4 Has. Los parámetros que representan las propiedades de los cultivos y los suelos son seleccionados para cada celda. Las ecuaciones que representan el flujo de agua y el transporte de sedimentos se resuelven para cada celda usando un método explícito.

Los datos de entrada incluyen la localización de cada celda en un sistema x/y, así como el tipo y uso del suelo, pendiente, orientación, drenaje subsuperficial y factores que definen el canal. Además se requiere describir los parámetros de infiltración característicos de cada superficie asociada a un determinado tipo y sistema de cultivo.

Los datos de salida se obtienen en forma de hidrogramas de escorrentía, gráficas de concentración de sedimentos y tiempo en el cierre de la cuenca y un

mapa detallado de la erosión y deposición de sedimentos en el interior de la cuenca.

1.3.1.2.3. WEPP

El objetivo del proyecto WEPP fue poner a punto la simulación de procesos por ordenador para desarrollar una tecnología de predicción de erosión del suelo. Este proyecto está basado, entre otros fundamentos, en la generación estocástica de datos climáticos, en la teoría de la infiltración, en la hidrología y la hidráulica, en la física del suelo, en la producción vegetal, y en los mecanismos de erosión estudiados en conservación de suelos (Flanagan et al., 1995). Es un modelo que puede ser usado tanto para simulación continua como para eventos individuales y a dos escalas: ladera y cuenca, pero en cualquiera de las versiones la unidad espacial unitaria es la parcela. Por otra parte, puede funcionar como modelo agregado o como modelo distribuido. Desde el punto de vista conceptual el modelo consta de seis componentes:

- Generación climática
- Hidrología y esorrentía hidráulica
- Crecimiento de las plantas y descomposición de residuos
- Suelos
- Erosión
- Riego

1.3.1.2.4. EUROSEM

Es un modelo de erosión desarrollado por científicos de diez países europeos. Se basa en procesos de eventos simples para predecir la erosión hídrica, desde parcelas y pequeñas cuencas, para evaluar las medidas de protección del suelo (Quinton, 1994; Morgan et al., 1998).

Es un modelo distribuido y está diseñado para operar por sucesivos pasos de tiempo de un minuto a lo largo de tormentas individuales. Las entradas básicas son la longitud y la anchura de las parcelas individuales o segmentos de pendiente

a los que el modelo se aplica y la profundidad de lluvia caída para periodos de tiempo sucesivos en la tormenta en los que la intensidad de lluvia caída es más o menos uniforme.

EUROSEM requiere dos ficheros de entradas, uno para la precipitación durante una tormenta dada y el otro para describir las características de la cuenca (suelo, estado de la superficie y condiciones de vegetación).

La versión 3.0 de EUROSEM presenta tres ficheros de salida opcionales:

- Un fichero de salida dinámico, que contiene la información de entrada para identificar el área de estudio, los nombres de los ficheros de entrada usados, los sedimentos totales producidos desde un segmento elemental, el área de cada segmento elemental, el volumen y la profundidad de escorrentía, la concentración de sedimentos y el volumen total de sedimentos removidos desde un segmento elemental para cada paso de tiempo de la simulación, el tiempo del periodo de flujo punta y una estimación del balance de agua durante una tormenta.
- Un fichero de salida estático que proporciona información acerca del área de estudio y una lista de los datos de entrada usados en la simulación.
- Un fichero de salida auxiliar que proporciona información de las profundidades de lluvia total, caída directa, drenaje foliar, flujo de tallo e interceptación, intensidad de precipitación y energía cinética tanto del agua que cae directamente como del drenaje foliar, para cada par tiempo-profundidad de la tormenta, la cantidad de precipitación interceptada por la cubierta de la planta y la capacidad de almacenamiento de la interceptación.

1.3.1.2.5. LISEM

El modelo LISEM (Limburg Soil Erosion Model) (De Roo et al., 1995, 1996) es un modelo distribuido que simula la hidrología y el transporte de sedimentos durante e inmediatamente después de un evento de precipitación en una cuenca de drenaje. Este modelo es uno de los primeros ejemplos de un modelo con base física que está completamente integrado en un SIG de tipo raster, esto significa que no es necesaria la conversión de archivos de entrada o salida, de modo que el

modelo viene expresado en los términos propios de los comandos SIG, denominado PC-Raster (van Deursen y Wesseling, 1992, Karssenber, 1996).

Los procesos incorporados en el modelo son precipitación, interceptación, almacenamiento temporal en microdepresiones de la superficie, infiltración, movimiento vertical del agua en el suelo, flujo superficial, flujo en el canal, disgregación por impacto directo de la precipitación, erosión por flujo superficial y capacidad de transporte asociada al flujo. También tiene en cuenta la influencia de rodadas de tractor, pequeñas carreteras pavimentadas (más pequeñas que el tamaño de una celda) y superficies encostradas.

El modelo LISEM requiere los siguientes archivos de entrada:

- Fichero de precipitación.
- Tablas de datos físicos para el submodelo de infiltración de agua en el suelo.
- Un grupo de mapas que describen la morfología de la cuenca (área de la cuenca, área del pluviógrafo, un mapa con la dirección de drenaje, un mapa de gradiente de pendiente, un mapa de localización de (sub)-salida(s), un mapa de anchura de caminos.
- Un grupo de mapas necesarios para el submodelo del agua del suelo.
- Un grupo de mapas con variables de las características y usos del suelo.

Del modelo se obtienen los siguientes resultados:

- Un archivo de texto con los totales (precipitación total, descarga total, descarga punta, pérdida de suelo total,...).
- Un archivo de datos ASCII que puede ser usado para dibujar hidrogramas y sedigramas.
- Mapas de erosión del suelo y deposición.
- Mapas de flujo superficial.

1.3.1.2.6. SWAT

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), ha sido desarrollado por Arnold (1993), para el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) con el objeto de cuantificar y predecir el impacto de las prácticas agrícolas

sobre la producción de agua, sedimentos, nutrientes y sustancias químicas en grandes cuencas fluviales. Es un modelo continuo y distribuido, aunque no completamente distribuido, puesto que no utiliza celdas sino que divide la cuenca en subcuencas y estas en Unidades de Respuesta Hidrológica. Por este motivo, a veces se define como semidistribuido. Se basa en principios físicos para describir la relación entre las variables de entrada y de salida. Necesita datos específicos de la cuenca (clima, propiedades físicas del suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo del suelo, etc.) y a partir de estos datos de entrada el SWAT modela procesos físicos relacionados con el movimiento del agua y de los sedimentos, crecimiento de los cultivos y ciclos de nutrientes.

A este modelo, por ser el que se usa en esta Tesis, se le dedica más adelante un capítulo específico.

Aunque todos los modelos descritos anteriormente tienen en común que son de base física y buscan objetivos similares, existen importantes diferencias entre ellos, fundamentalmente atendiendo a la modelización espacio-temporal y a la escala de trabajo utilizada. La aplicación de un modelo u otro, va a depender de los objetivos de la simulación, no necesariamente los modelos hidrológicos distribuidos son la mejor opción, sobre todo cuando se trata de proyectos de gran visión. Sin embargo, cuando se trata de representar la física de fenómenos hidrológicos en la cuenca, y ante la evidencia de la variabilidad espacial de la precipitación, la temperatura, la cobertura vegetal, entre otros parámetros; es una ventaja el empleo de los modelos hidrológicos distribuidos respecto a los modelos agregados. Sin pasar por alto que los primeros llegan a un notable incremento de complejidad en su aplicación, asociada principalmente, a la cantidad de información requerida para su modelación que se basa en la aplicación de los SIG, en los cuales se procesa gran parte de los datos para representar la fisiografía de la cuenca, aunque esta complejidad es atenuada por el uso de equipos de cómputo que cada vez tienen mayor velocidad y capacidad de almacenamiento. De los modelos descritos anteriormente solo ANSWERS, LISEM y SWAT están asociados a un sistema de información geográfica. (SIG). Los SIG, se definen como herramientas para la recolección, manipulación, transformación, análisis y

despliegue de la información que tiene una referencia en el espacio. El uso de modelos asociados a un SIG supone:

- La posibilidad de modificar rápidamente los datos de entrada, como usos del suelo o posibles medidas de conservación, simulando escenarios alternativos.
- La capacidad de efectuar simulaciones con mayor detalle al actuar sobre grandes cuencas.
- La facilidad visualizar los resultados mediante mapas.

1.4. CUENCAS AFORADAS Y NO AFORADAS

En muchas partes del mundo, los datos medidos en las cuencas de drenaje son muy escasos o inexistentes, y la situación se está agravando, debido al descenso de las redes de observación existentes (Alsdorf et al., 2007). Al mismo tiempo, los recursos hídricos están cada vez más amenazados en un mundo cuya población sigue en aumento y en el que la demanda de agua por habitante crece incesantemente. Por consiguiente, a medida que disminuye el aporte de datos, la necesidad de estos aumenta. Esta situación plantea un problema importante a la hora de evaluar y gestionar los recursos hídricos.

Una técnica habitualmente utilizada para resolver problemas hidrológicos ha consistido en extrapolar emplazamientos con datos hidrométricos a otros carentes de ellos, es decir, de cuencas aforadas (instrumentadas) a cuencas no aforadas. Una cuenca no aforada es una cuenca con registros inadecuados (en cuanto a cantidad y calidad de los datos) de las observaciones hidrológicas para permitir el cálculo de las variables hidrológicas de interés (en cantidad o calidad del agua) a las escalas espaciales y temporales apropiadas, y con la precisión suficiente para aplicaciones prácticas. Por ejemplo, si la variable de interés no se ha medido a la resolución requerida para el periodo de calibración o de simulación del modelo, la cuenca se clasificaría como no aforada con respecto a esa variable. Variables de interés pueden ser, por ejemplo, la precipitación, la escorrentía, las tasas de erosión, las concentraciones de sedimentos en el cauce, etc., por lo que una cuenca puede no estar aforada con respecto a alguna de estas variables.

Debido a la heterogeneidad espacial y a la variabilidad temporal de los procesos hidrológicos, para la extrapolación se requieren herramientas de predicción capaces de generar predicciones de la respuesta hidrológica sobre un rango de climas y escalas espacio-temporales (Bastola et al., 2008). De ahí surge la necesidad de contar con modelos bien calibrados y validados para aplicarlos a cuencas no aforadas. Cada modelo hidrológico requiere unos datos de entrada y tiene una estructura específica con un cierto número de parámetros agregados o distribuidos espacialmente para simular los diversos procesos hidrológicos en la cuenca. En función de lo anterior, cada modelo puede tener mayor o menor habilidad para representar los mecanismos de respuesta de la cuenca al producirse una precipitación, que en muchos casos presenta un comportamiento altamente no lineal

La calidad de una simulación o predicción realizada con un modelo hidrológico dependerá de la información disponible para representar la variabilidad espacio-temporal de las variables hidrometeorológicas, así como de la capacidad del modelo para propagar en el tiempo el estado de humedad en la cuenca, responsable en buena medida de la no linealidad, y del tipo de parametrización realizada de los procesos hidrológicos dominantes. Será, pues, necesario asegurarse de que los resultados de los modelos son lo más exactos y representativos posible. Como mínimo, será esencial conocer las limitaciones y cotas de error de los resultados, con el fin de que las decisiones acerca de los recursos hídricos puedan estar basadas en información adecuada. Uno de los objetivos propuestos por la Asociación Internacional de las Ciencias Hidrológicas, en la última década, ha sido reducir la incertidumbre de las predicciones, es decir, establecer con qué probabilidad se puede verificar la ocurrencia real de un caudal (o de cualquier otra variable de estado) de cierta magnitud condicionado a la estimación que se ha realizado sobre éste con el modelo o modelos de simulación (Sivapalan et al., 2003). Dicho objetivo aún no se ha alcanzado, por ello son necesarios estudios a diversas escalas para mejorar la capacidad de simulación en cuencas aforadas y consecuentemente en las no aforadas.

1.5. CAMBIO CLIMÁTICO

1.5.1. MARCO DE REFERENCIA

En el año 1992 se constituye en Nueva York la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC). Desde la fecha de su constitución fue firmada por 186 Estados, tomando conciencia la sociedad de uno de los principales problemas medioambientales a los que nos enfrentamos las generaciones actuales y, de manera más acentuada, las próximas. Las bases técnicas que soportan la Convención son establecidas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), el cual emitió cuatro informes de evaluación (IPCC, 1990, 1996, 2001, 2007) que tienen como finalidad evaluar las fuentes de evidencia de cambio climático y comprobar su solidez desde el punto de vista científico.

Para el IPCC el término “cambio climático” denota un cambio en el estado del clima identificable (por ejemplo, mediante análisis estadísticos) a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un periodo prolongado, generalmente cifrado en decenios o en periodos más largos. Denota todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana. Este significado difiere del utilizado en la CMCC que, en su artículo 1, define cambio climático como ‘un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables’. La CMCC distingue entre ‘cambio climático’ atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica y ‘variabilidad climática’ atribuida a causas naturales.

El IPCC en su segundo informe (IPCC, 1996) ha llevado a primer plano de la atención internacional el creciente consenso científico sobre el hecho de que las actividades humanas pueden causar alteraciones en el clima que posiblemente

tengan efecto no solo en el presente, sino en escalas de tiempo mucho más largas. En años posteriores, nuevos análisis han confirmado estas hipótesis (IPCC, 2007), evidenciadas a nivel mundial por los aumentos observados en el promedio de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado y el aumento promedio del nivel del mar.

1.5.2. CAUSAS DEL CAMBIO

Actualmente, parece claro que el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), producido por la actividad industrial, ganadera y forestal, entre otras, y la transformación de los usos del suelo, están introduciendo modificaciones en la evolución del clima que van más allá de las tendencias existentes antes de la Revolución Industrial.

Los gases de efecto invernadero son gases integrantes de la *atmósfera*, de origen *natural* y *antropogénico*, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de ondas del espectro de radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra, la atmósfera, y las nubes. Esta propiedad causa el efecto invernadero. El vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄), y ozono (O₃) son los principales gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre. Además existe en la atmósfera una serie de gases de efecto invernadero totalmente producidos por el hombre, como los halocarbonos y otras sustancias que contienen cloro y bromuro. Además del CO₂, N₂O, y CH₄, el Protocolo de Kyoto aborda otros gases de efecto invernadero, como el hexafluoruro de azufre (SF₆), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC).

Según el IPCC (2007) las emisiones mundiales de GEI por efectos de actividades humanas han aumentado, desde la era preindustrial, en un 70% entre 1970 y 2004 (Figura 1. 3). El CO₂ es el GEI antropógeno más importante. Sus emisiones anuales se incrementaron en torno a un 80% entre 1970 y 2004. Las concentraciones atmosféricas mundiales de CO₂, CH₄ y N₂O han aumentado notablemente por efecto de las actividades humanas desde 1750. Los aumentos

de la concentración mundial de CO₂ se deben principalmente a la utilización de combustibles de origen fósil y, en una parte apreciable pero menor, a los cambios de uso de la tierra. En ese mismo informe se considera que es muy probable que el incremento observado de la concentración de CH₄ se deba predominantemente a la agricultura y a la utilización de combustibles fósiles. El aumento de metano ha sido menos rápido desde comienzos de los años 90, en concordancia con las emisiones totales (suma de fuentes antropógenas y naturales), que han sido casi constantes durante ese periodo. El aumento de NO₂ procede principalmente de la agricultura.

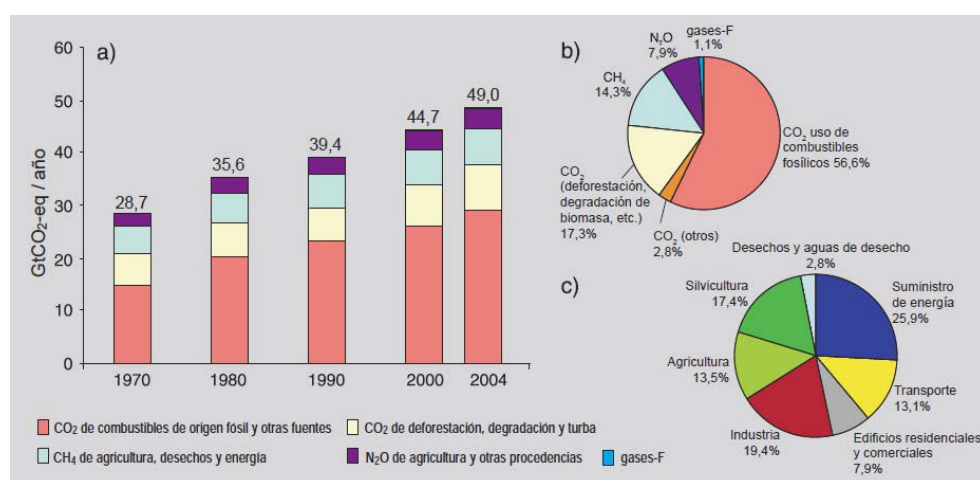


Figura 1.3. Emisiones mundiales de GEI antropógenos.

a) Emisiones anuales mundiales de GEI antropógenos entre 1970 y 2004. b) Parte proporcional que representan diferentes GEI antropógenos respecto a las emisiones totales en 2004, en términos de CO₂ equivalente. c) Parte proporcional que representan diferentes sectores en las emisiones totales de GEI antropógenos en 2004, en términos de CO₂ equivalente. (Sector silvicultura incluye deforestación).

La mayor parte del aumento observado del promedio mundial de temperatura desde mediados del siglo XX se atribuye al aumento observado en las concentraciones de GEI antropógenos.

1.5.3. EVIDENCIAS CLIMÁTICAS DURANTE EL SIGLO XX

El aumento de temperatura se constató a nivel global (Jones y Moberg, 2003). Se estima que a **nivel mundial** la temperatura media anual aumentó desde

1850 en $0,8 \pm 0,2$ °C (IPCC, 2007). Este calentamiento no fue constante ni homogéneo, destacando, como por ejemplo, el incremento de temperatura desde mediados de los años setenta del siglo XX y, en especial, las temperaturas alcanzadas globalmente en el periodo 1995-2005 (IPCC, 2007). Europa ha sufrido desde 1900 un calentamiento mayor al global (0,95 °C), siendo esta subida más notable en primavera y verano (Castro et al. 2005, EEA 2008), y aún mayor en algunas zonas como en la Península Ibérica (European Environment Agency, EEA, 2008).

En los últimos años en **España** se han realizado numerosos trabajos que analizaron la variabilidad existente en el conjunto de la Península Ibérica (Rodríguez-Puebla et al., 2002; Castro et al., 2005), en distintas subregiones, como por ejemplo el litoral mediterráneo (Romero et al., 1999; Saladié, 2004), o en la mitad norte de la península (Esteban-Parra et al., 1995; Abaurrea et al., 2001). En todos ellos se confirma que el aumento de temperatura más reseñable del siglo XX, se produce desde comienzos de los años setenta, a pesar de que existan diferencias en cuanto a la importancia relativa de las estaciones del año en función del periodo analizado y en cuanto a las tasas relativas de aumento en las temperaturas máximas y mínimas. Las temperaturas muestran una tendencia generalizada al alza en todo el territorio, con incrementos entre 1-2°C en el periodo comprendido entre 1850 y 2005 (VVAA 2007). En las tres últimas décadas (1975-2005), se registró una tasa media de calentamiento aproximada de 0,5°C/década (un 50% superior a la media continental en el Hemisferio Norte y casi el triple de la media global). Si se considera todo el siglo XX, la subida de temperatura ha afectado a todas las estaciones del año por igual, pero en los últimos 30 años el calentamiento ha sido mucho más pronunciado en primavera y en verano (Blade et al. 2010). Las regiones españolas más afectadas por el calentamiento son las situadas en la mitad oriental peninsular, desde Girona hasta Málaga. La temperatura media ha aumentado en 36 de 38 observatorios analizados de forma estadísticamente significativa al 95% (Ayala-Carcedo, 2004).

Por otro lado, las tendencias en los totales anuales o estacionales de precipitación presentan diferencias todavía mayores, tanto a nivel global (IPCC,

2007) como nacional (Esteban-Parra et al., 1998), debido esto último a la complejidad de la distribución espacial de la lluvia en España (Brunet et al., 2007). En la segunda mitad del siglo pasado, varios estudios realizados, con datos de la serie 1949-2005, revelan una tendencia claramente negativa de las lluvias en buena parte del territorio español, en particular en el Cantábrico (disminuciones de 4,8 mm/año en Santander y 3,3 mm/año en Bilbao) y en el sureste peninsular (VVAA, 2007). La precipitación anual en las tres décadas más recientes ha disminuido de forma significativa en la Península Ibérica en relación a las décadas de los 60 y 70. La década 2000-2010 registra los valores más bajos de precipitación anual desde el año 1950. Sin embargo, la señal de cambios en la precipitación por efecto del cambio climático es débil en comparación con la de temperatura (Blade et al., 2010).

A nivel nacional, también existen numerosos estudios que exploran la variabilidad existente en distintos periodos del siglo pasado en cuanto a frecuencia de fenómenos extremos (Abaurrea y Cebrián, 2001; Prieto et al., 2004; Rodrigo y Trigo, 2007), aunque los resultados son heterogéneos, especialmente en precipitación, tanto temporal como espacialmente.

Galicia está localizada en una zona de transición de distintos tipos de masas de aire, masas de aire cálido y húmedo (tropicales marítimas) además de varios tipos de masas de aire frío procedentes de latitudes superiores con distinto contenido de humedad (masas de aire ártico marítimo, ártico continental y polar continental) de lo que se deduce que las conclusiones de los estudios de variaciones climáticas realizadas tanto para el norte de Europa como para otras zonas de España, como por ejemplo para el mediterráneo, no son directamente extrapolables para la comunidad gallega.

Estudios realizados en Galicia por Cruz et al. (2009), tomando como referencia el periodo 1961-2006, destacaron los siguientes cambios:

- Un aumento en la temperatura anual de 0,18 °C por década, aunque dicho incremento no fue homogéneo a lo largo del periodo analizado, destacando el aumento abrupto desde 1972, llegando la tasa a duplicarse: 0,36 °C por década. El aumento de temperatura fue algo

más pronunciado y generalizado en las máximas, aunque la diferencia respecto al incremento en las mínimas solo fue significativa en la primavera. Dentro del año, el aumento de temperatura fue mayor en primavera y en verano. En primavera aumentó principalmente la temperatura máxima, la frecuencia de días y noches cálidas y descendió la frecuencia de días fríos. En verano aumentó la frecuencia de noches cálidas y disminuyó la de noches frías. En otoño descendieron los días y noches frías. En invierno constataron un aumento en la temperatura máxima y un descenso en el número de días fríos.

- En la precipitación encontraron tendencias en la cantidad total a nivel mensual: un descenso significativo en febrero y aumento en octubre, lo que parece apuntar a cierto cambio en la distribución de la lluvia a lo largo del año. En este sentido cabe mencionar el estudio de Gómez-Gesteira et al. (2011), el cual indica que las lluvias tienden a aumentar en otoño y a disminuir en invierno. Los resultados de Cruz et al. (2009) señalan que aumentan los episodios de lluvia intensa en otoño y disminuyen en primavera. Además, se constata una disminución de los periodos de retorno de los eventos extremos de precipitación.

Como resumen de las tendencias actuales para Galicia, se puede decir que las temperaturas en promedio tienden a subir, particularmente en primavera y verano mientras que las precipitaciones no presentan una tendencia definida, aunque sí se aprecian cambios intra-anales, con más lluvia en otoño y menos en invierno.

1.5.4. SENSIBILIDAD DE LOS RECURSOS HÍDRICOS AL CAMBIO CLIMÁTICO

1.5.4.1. PLANTEAMIENTO GENERAL

Los recursos hídricos disponibles para la humanidad provienen de un desequilibrio en los continentes, entre el agua de precipitación y la que se evapora o evapotranspira, claramente favorable a la primera que los hace excedentarios. En los océanos el fenómeno es inverso, y la evaporación es aproximadamente un 10% superior a la precipitación.

Como se expuso en el apartado 1.2, referente al ciclo hidrológico, el agua existente en la naturaleza forma parte de un ciclo donde pasa continuamente de estado líquido o sólido a vapor y viceversa. El clima gobierna este ciclo y por tanto los cambios climáticos proyectan necesariamente cambios en el tiempo y en el espacio de los recursos hídricos disponibles. Cambios en la precipitación condicionan directamente el agua que cae sobre los continentes y cambios en las temperaturas modifican los valores de evaporación y evapotranspiración quedando alterada la cantidad y característica de las escorrentías.

La capacidad de retener agua por parte del suelo, y de ser utilizada por las plantas, trae como consecuencia que el agua de precipitación, o una parte de ella quede retenida a expensas de que las plantas la evapotranspiren. La reserva de agua utilizable por las plantas, que es función de la capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente y profundidad radicular media, incorpora agua de precipitación y devuelve agua a la atmósfera por evapotranspiración de un modo continuo llenándose o vaciándose, según sean superiores las entradas o las salidas, hasta que se llega a un punto en que el suelo no admite más agua, se llena la reserva y se genera la escorrentía o la recarga de los acuíferos con los excedentes. Las características de la vegetación también determinan los intercambios de agua y energía, no sólo por la profundidad de las raíces sino también por la biomasa aérea y la rugosidad aerodinámica.

Teniendo en cuenta que solo se produce escorrentía cuando el suelo tiene excedentes, o bien la intensidad de precipitación es superior a la capacidad de infiltración, hay que admitir que la distribución temporal y el régimen de las precipitaciones incide sobre la generación de escorrentía tanto o más que el volumen de precipitación en si mismo. Por tanto, una modificación de la temperatura o de la precipitación debida a un cambio climático repercutirá sobre los recursos hídricos de un territorio, pues, a largo plazo, sus recursos renovables son igual a la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración.

1.5.4.2. SENSIBILIDAD A LAS VARIACIONES ESTACIONALES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA

Los recursos hídricos son sensibles a las variaciones estacionales de precipitación y temperatura. No se generan en un momento instantáneo concreto del tiempo, ni tampoco de una forma regular a lo largo del año. Tienen periodos en los que su generación es posible, en función de las temperaturas y precipitaciones de este periodo y del estado de saturación del suelo entre otros factores. Ello hace que la temporalidad en la distribución de precipitaciones y temperaturas incida en la generación de recursos hídricos con mayor entidad, en muchas ocasiones, que los mismos valores medios de estos dos parámetros climáticos.

En la mayor parte de la superficie de España, los recursos hídricos se generan en los meses más fríos o con mayor precipitación siempre que no hayan ascendido excesivamente las temperaturas. En los meses más fríos la evapotranspiración es muy baja y por tanto la demanda de agua de las plantas es también baja mientras que el exceso de aportación satura el suelo y se producen los excedentes. Por el contrario, en verano con temperaturas y evapotranspiraciones altas, la mayor parte del agua que retiene el suelo es utilizada por las plantas. El suelo está seco o en bajo estado de saturación y no se producen recargas ni esorrentías significativas.

Si las temperaturas aumentan solo en verano muy probablemente el volumen de esorrentía no disminuiría apreciablemente, dado que no se produciría esorrentía ni antes ni después del posible cambio climático. El mismo razonamiento cabe si se asumen disminuciones de la precipitación pero solo para los meses de verano; daría igual a nivel de generación de esorrentía, salvo en que el déficit de agua de los regadíos sería más acusado.

1.5.4.3. SENSIBILIDAD A SUCESOS EXTREMOS: SEQUÍAS Y AVENIDAS

Si la precipitación y temperatura sufrieran modificaciones aproximadamente lineales, un aumento de la temperatura y una reducción de la precipitación causarían un aumento de la frecuencia y severidad de las sequías. El aumento de la demanda evapotranspirativa relacionado con el calentamiento representará un aumento de los retornos a la atmósfera, así como unas condiciones antecedentes más secas de los suelos durante los eventos lluviosos, de modo que cabe esperar una reducción de la escorrentía y de la recarga de los acuíferos, y con ello una pérdida de calidad del recurso, debido a una menor dilución. Sin embargo, las avenidas no siguen este patrón relativamente sencillo. Hay evidencias de que las precipitaciones extremas han aumentado ligeramente durante las últimas décadas en diversas áreas del Globo (IPCC, 2007). Por ejemplo, en España se ha observado en algunos sectores del Pirineo (Beguiría et al., 2003; Morán-Tejeda et al., 2010). En las áreas donde una parte significativa de la precipitación es en forma de nieve, cabe esperar un adelanto de la estación de fusión como consecuencia del calentamiento global, lo que puede causar cambios en la magnitud de las crecidas si coincide el periodo de fusión con un periodo de precipitaciones de gran magnitud. Por otra parte, en un escenario de calentamiento global y de aumento de la sequía estival, cabe esperar una degradación de la cubierta vegetal y un aumento de la frecuencia de los incendios forestales. Estas condiciones pueden representar un aumento de la frecuencia y severidad de las crecidas y de los fenómenos de erosión de los suelos.

1.5.5. IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos se manifestarán alterando la cantidad, la distribución temporal y la calidad (MOPTMA 1995, IPCC, 2007; UNESCO, 2011). Si, de acuerdo con los escenarios climáticos disponibles para España, las precipitaciones anuales disminuyen ligeramente y las temperaturas aumentan, se producirá en el futuro una disminución de los recursos hídricos. Por otra parte, una mayor irregularidad

temporal de las precipitaciones, repercutirá negativamente en el régimen de las crecidas y en la regulación de los ríos (Iglesias et al., 2005). Los aspectos relacionados con la disminución de la calidad del agua pueden verse acentuados si se produce un descenso en la cantidad del recurso. Un menor volumen de agua disponible provocará el empeoramiento de la calidad de las aguas y el descenso de los niveles piezométricos en los acuíferos, lo que en zonas costeras, facilitará la intrusión marina, hecho además favorecido por el aumento del nivel del mar. Algunos procesos físico-químicos y biológicos que dependen de la temperatura del agua, como por ejemplo, el desarrollo de las algas, aumentará con la temperatura, produciendo un mayor consumo de oxígeno en su descomposición. Todo ello puede afectar a la calidad del agua en embalses que se vería afectada por la reducción de las concentraciones de oxígeno y por la disminución de aportaciones a los mismos.

Los daños causados sobre los recursos hídricos no solo dependerán de los efectos del cambio climático, sino que también se verán influidos por el manejo y los avances tecnológicos.

Los recursos hídricos en España, se presentan generalmente bajos para las épocas en que se precisan. De los 110.000 hm³ que suponen la escorrentía total anual, solo unos 10.000 discurren por los ríos en los meses de estío, donde los usos agrícolas demandan más de 24.000 hm³ (Iglesias et al., 2005). No obstante existe una gran heterogeneidad temporal de la demanda hídrica en las diversas cuencas españolas. Esta heterogeneidad temporal se agravará ante las perspectivas de la heterogénea distribución de la precipitación que se presenta con el cambio climático.

En las cuencas gallegas no se puede establecer con certeza una influencia del cambio climático en los caudales, debido a que no se dispone de series de datos adecuadas según apuntan Rial Rivas et al. (2009), si bien, estos autores, observaron que los caudales medios anuales tienden a incrementarse en las cuencas de la vertiente Atlántica, mientras que en las cuencas más interiores experimentaron un descenso.

1.5.6. IMPACTOS SOBRE OTROS SISTEMAS RELACIONADOS CON LOS RECURSOS HÍDRICOS

Dependiendo del ámbito geográfico el cambio climático puede tener diferentes manifestaciones y consecuencias, pero en términos generales se puede decir que los impactos negativos del cambio climático no solo afectan al ciclo del agua sino que diferentes campos (ecosistemas, recursos naturales, sectores productivos y salud pública) sufrirán impactos debidos a los cambios producidos en los recursos hídricos (UNESCO, 2011). Así, se esperan cambios en la circulación de los océanos, el nivel del mar, los ciclos del carbono y de otros nutrientes, la productividad de los ecosistemas naturales y de la agricultura, los pastizales y en los bosques, y en el comportamiento, abundancia y supervivencia de especies vegetales y animales, etc. Los cambios en estos sistemas en respuesta a la variación en los recursos hídricos afectarán al bienestar humano, tanto positiva como negativamente. Los impactos sobre el bienestar humano se sentirán a través de cambios en la oferta y en la demanda de agua, cambios en las oportunidades para utilizar el medio ambiente con fines de recreo y turismo, cambios en la pérdida de bienes y vidas a causa de fenómenos hidrológicos extremos, y cambios en la salud humana.

Los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos influirán en las perspectivas del desarrollo sostenible en diferentes partes del mundo y puede que den lugar a la ampliación de las desigualdades existentes, ya que como regla general los países más áridos se verán más afectados por estos cambios. En algunos entornos, los impactos del cambio climático pueden causar disturbios sociales, descenso económico y desplazamientos de población que podrían afectar a la salud humana. Los impactos sobre la salud relacionados con los desplazamientos de población resultantes de procesos de desertificación, desastres naturales o de la degradación del medio ambiente son sustanciales. En general, los impactos negativos del cambio climático en la salud serán mayores en poblaciones vulnerables de menores ingresos, predominantemente en los países tropicales y subtropicales.

Un aumento en la frecuencia y magnitud de los sucesos extremos podría tener efectos adversos en todos los sectores y regiones. La agricultura y los recursos hídricos pueden ser particularmente vulnerables a los cambios en los extremos hidrológicos y a cambios en las temperaturas. Las crecidas pueden dar lugar a la difusión de enfermedades transmitidas por el agua y por vectores, en particular en países en desarrollo. Muchos de los daños y perjuicios monetarios de los sucesos extremos tendrán repercusiones sobre una amplia gama de instituciones financieras, desde aseguradores y reaseguradores hasta inversionistas, bancos y fondos para el socorro en caso de desastre.

En el caso concreto de Galicia, en el año 2009 la Xunta de Galicia publicó los resultados del proyecto CLIGAL (Pérez Muñuzuri et al., 2009), un compendio de trabajos que cuantificaron los efectos de dicho cambio en distintos ámbitos: fenofases de diversas especies animales y vegetales (Rial Rivas y Díaz-Fierros, 2009), la hidrografía y la dinámica de las rías gallegas (Rosón et al., 2009), el cultivo de mejillón (Álvarez-Salgado et al., 2009), el turismo (Vázquez y Prada, 2009) o la fenología de la vid en la zona vinícola del Ribeiro (Cancelo, 2009), entre otros.

1.5.7. PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

1.5.7.1. MODELOS CLIMÁTICOS

Los modelos climáticos se utilizan como herramientas de investigación para estudiar y simular el clima y para fines operacionales, en particular predicciones climáticas mensuales, estacionales e interanuales.

El sistema climático no está formado solamente por la atmósfera, sino que océanos, superficie terrestre y vegetación forman parte importante de él. Existen múltiples interacciones que adaptan estas distintas componentes entre sí, de manera que el sistema evoluciona como un todo. El tiempo de respuesta de la atmósfera es bastante más rápido que los otros dos subsistemas, por lo que, en general, para la predicción meteorológica a corto y medio plazo se usan modelos

numéricos que resuelven las ecuaciones de la atmósfera pero que no consideran cambios en océanos o vegetación, por lo menos de manera acoplada. No obstante, cuando se consideran periodos de tiempo más largos, como los que se necesitan para definir el clima, se hace imprescindible el uso de modelos más complejos que simulen de forma comprensiva el sistema climático, con especial énfasis en las interacciones océano-atmósfera (de ahí que se denominen AO-GCM, (atmosphere-ocean Global circulation models). Estos modelos informáticos son la herramienta fundamental usada para explorar los cambios en el clima debidos al incremento de las emisiones de gases de invernadero de origen antropogénico.

Los modelos climáticos globales (GCMs) son una representación matemática de los procesos que tienen lugar entre los componentes de un sistema climático. Se basan en leyes físicas como la conservación de la masa y energía, constituyendo un sistema de ecuaciones diferenciales, complejo y no lineal, que se debe resolver de forma aproximada usando técnicas numéricas. Estas técnicas implican dividir tanto la atmósfera como el océano en celdas tridimensionales dentro de las que se resuelven las ecuaciones diferenciales antes mencionadas. Un tamaño típico para las dimensiones horizontales de las celdas de un GCM es 2.5° (alrededor de 250 km en latitudes medias). El tamaño de celda de los GCMs hace que muchos procesos físicos (de menor resolución) no puedan resolverse de forma explícita, por lo que es necesario introducirlos de manera aproximada empleando parametrizaciones. Para aumentar la resolución de los GCMs, se anidan a un modelo climático regional (RCM) de mayor resolución en una parte de la malla del GCM. Se considera que un modelo es regional cuando su resolución espacial en la horizontal está por debajo de los 50 km.

Los resultados de los modelos difieren de unos a otros y van a depender de aspectos tales como el número de dimensiones espaciales, el grado en que aparezcan representados los procesos físicos, o el grado de utilización de parametrizaciones empíricas que se han empleado para simular aquellos procesos que se encuentran por debajo de la escala espacial y temporal del modelo. Los modelos son evaluados de varias maneras. La principal consiste en comparar los datos climáticos simulados con los observados.

Entre los GCMs usados en el IPCC (2007) como base para las proyecciones de cambios futuros del clima se encuentran el: ECHAM5 (desarrollado por el Instituto Max Planck de Meteorología de Hamburgo, cuyos resultados en las latitudes medias del Atlántico norte son muy destacables), BCM (desarrollado por el Instituto Bjerknes de Noruega) HadCM3 (desarrollado por el Hadley Center de la Oficina Meteorológica del Reino Unido), ARPG, IPSL, CGM3, etc.

Entre los modelos regionales se pueden citar el RCA (desarrollado en el Rosby Center del Centro Meteorológico de Suecia), REMO, HIRHAM, PROMES (desarrollado por la Universidad Complutense de Madrid), RCAO, etc.

De los diversos proyectos de investigación europeos que proporcionan proyecciones climáticas regionalizadas para Europa mediante regionalización dinámica, o en otras palabras, escenarios regionales de cambio climático para España, se encuentran los proyectos PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects; Christensen, coord., 2005) y ENSEMBLES (Hewitt y Griggs, 2004). En esta tesis se han utilizado los resultados de este último.

1.5.7.2. ESCENARIOS DE EMISIONES

Un escenario de emisión se define como una representación plausible de la evolución futura de las emisiones de sustancias que podrían ser radiativamente activas (por ejemplo, gases de efecto invernadero, aerosoles), basada en un conjunto coherente de supuestos sobre las fuerzas que las determinan (por ejemplo, el desarrollo demográfico y socioeconómico, la evolución tecnológica) y las principales relaciones entre ellos. Los escenarios de concentraciones, obtenidos en base a unos escenarios de emisión, se introducen en un modelo climático para obtener proyecciones del clima.

El IPCC (2007) indica que hay un alto nivel de coincidencia y abundante evidencia para afirmar que, con las políticas actuales de mitigación del cambio

climático y con las prácticas de desarrollo sostenible que aquellas conllevan, las emisiones mundiales de GEI seguirán aumentando en los próximos decenios.

Los escenarios de emisiones publicados en el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (IEEE, 2000) del IPCC se denominan escenarios IEEE y son utilizados como datos de entrada en los modelos climáticos. Los escenarios de emisiones son suposiciones acerca de la evolución de los forzamientos climáticos en el futuro, considerando distintas hipótesis. En particular estas hipótesis se traducen en suposiciones sobre la evolución de distintos factores socio-económicos (demográficos, económicos y tecnológicos) que en última instancia afectan a las emisiones de gases de efecto invernadero. Estas hipótesis se agrupan en cuatro familias denominadas A1, A2, B1 y B2. Los escenarios IEEE no contemplan otras políticas climáticas además de las existentes. Los supuestos de emisión de gases de efecto invernadero para cada uno de los escenarios de referencia son los siguientes:

- La familia de escenarios de referencia A1 presupone un crecimiento económico mundial muy rápido, un máximo de la población mundial hacia mediados de siglo, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Se divide en tres grupos, que reflejan tres direcciones alternativas de cambio tecnológico: intensiva en combustibles fósiles (A1F1), energía de origen no fósil (A1T), y equilibrio entre las distintas fuentes (A1B).
- B1 describe un mundo convergente, con la misma población mundial que A1, pero con una evolución más rápida de las estructuras económicas hacia una economía de servicios y de información.
- B2 describe un planeta con una población intermedia y un crecimiento económico intermedio, más orientada a las soluciones locales para alcanzar la sostenibilidad económica, social y medioambiental.
- A2 describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, desarrollo económico lento, y cambio tecnológico lento.

Cada uno de los 6 grupos de referencia, A1B, A1FI, A1T, A2, B1 y B2, implica diferentes contextos globales y por lo tanto diferentes supuestos de valores de emisiones de GEI desde 2000 hasta el 2100 (Figura 1.4).

En el cuarto informe del IPCC (2007) además de estos 6 grupos de emisiones, se contemplan otros escenarios posteriores al informe de base del IPCC del año 2000. En la figura 1.4 se muestran las emisiones mundiales de GEI en ausencia de políticas climáticas adicionales, para seis escenarios testimoniales del IEEE (líneas de color), y percentil 80 de escenarios recientes publicados desde el IEEE (post-IEEE) (área sombreada en gris). Las líneas de trazos indican el abanico completo de escenarios post-IEEE. Las emisiones consideran los gases CO₂, CH₄ y N₂O y gases-F. Se puede observar que los escenarios de emisiones de referencia publicados desde el Informe Especial del IPCC sobre escenario de emisiones (IEEE, 2000), es decir los escenarios post-IEEE, producen unos valores comparables a los expuestos en el IEEE base.

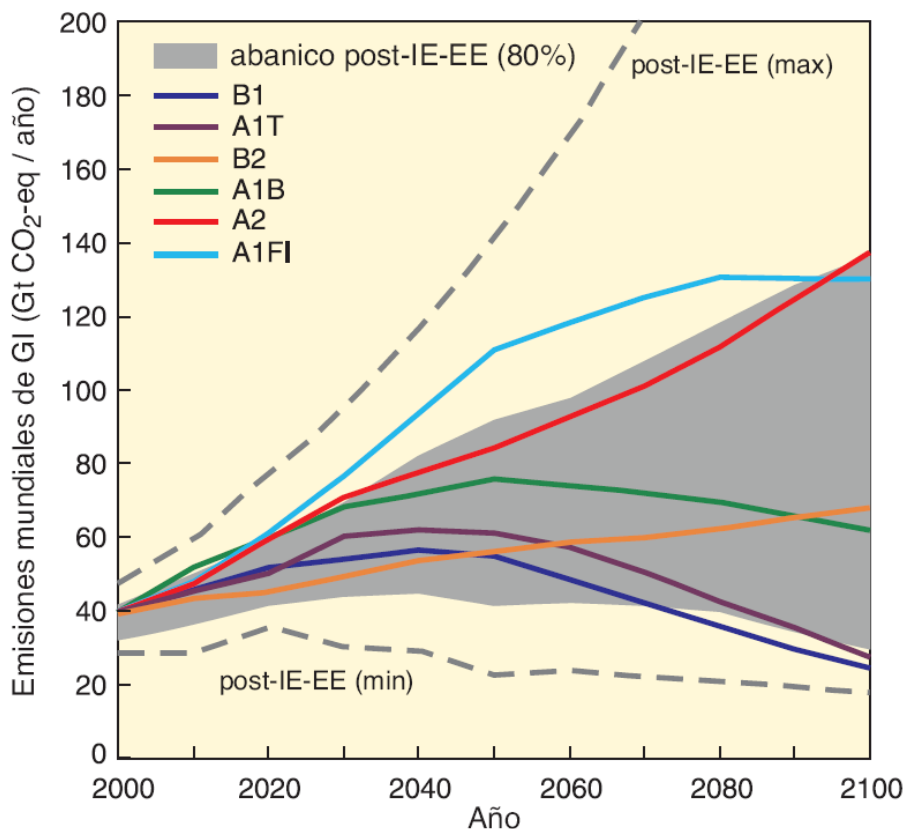


Figura 1.4. Emisiones mundiales de GEI entre 2000 y 2100, para diferentes escenarios, en ausencia de políticas climáticas adicionales (IPCC, 2007).

Parte importante en la evaluación de los impactos del cambio climático en los sistemas de recursos hídricos es la selección de escenarios. Se pueden elegir o

proponer diferentes tipos de escenarios, entre los cuales están los incrementales o sintéticos, los cuales pueden ofrecer una valiosa asistencia sobre la sensibilidad del sistema al clima futuro. Algunas veces los incrementos de estos escenarios se pueden hacer tomando como guía los resultados de las salidas de los GCMs propuestos por el IPCC en su apartado de regionalización mundial, eligiendo los correspondientes a España (opción seguida en esta tesis). Otra manera de evaluar los recursos hídricos es utilizar los escenarios de los modelos regionales ya sea el HadCM2SUL, UKMO o PROMES, de tal manera que se cuente con un amplio abanico de escenarios que permitan, en su momento valorar los resultados de cada uno de ellos y analizar los resultados para los diversos periodos estacionales con el objetivo de conocer tanto las afecciones globales como las debidas a las variaciones estacionales de la lluvia y de la temperatura y sus posibles efectos en los recursos hídricos.

1.5.7.3. PROYECCIONES DE CAMBIOS FUTUROS EN LA TEMPERATURA, PRECIPITACIÓN Y ESCORRENTÍA: SIGLO XXI

En este apartado se muestran esquemáticamente los cambios que experimentarán la temperatura, la precipitación y la escorrentía a nivel mundial durante el siglo XXI según el IPCC (2007).

Para las dos décadas próximas las proyecciones de cambios futuros del clima indican un calentamiento de aproximadamente 0,2 °C por década para una franja de escenarios de emisiones IEE. Aunque se mantuvieran constantes las concentraciones de todos los GEI y aerosoles en los niveles del año 2000, cabría esperar un calentamiento adicional de aproximadamente 0,1°C por década. A partir de esa fecha, las proyecciones de temperatura dependen cada vez más de los escenarios de emisiones (Figura 1.5). De proseguir las emisiones de GEI al ritmo actual o a un ritmo mayor, se intensificaría el calentamiento y se producirían numerosos cambios en el sistema climático mundial durante el siglo XXI, muy probablemente superiores en magnitud a los observados durante el siglo XX.

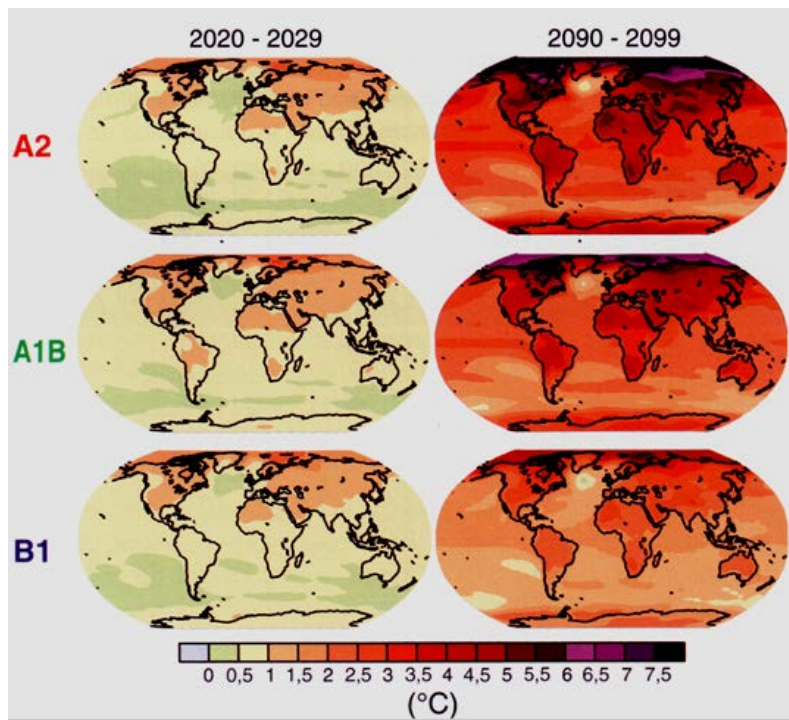
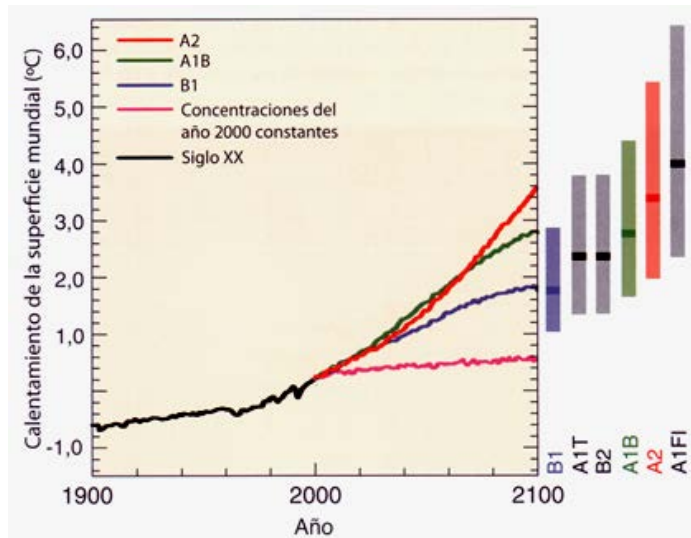


Figura 1.5. Proyecciones del calentamiento en superficie para el siglo XXI (IPCC, 2007).

Superior: Las líneas representan promedios mundiales multimodelo del calentamiento en superficie (respecto del periodo 1980-1999) para los escenarios A2, A1B y B1, representados como continuación de las simulaciones del siglo XX. La línea rosa describe un experimento cuyas concentraciones se mantuvieron constantes en valores del año 2000. Las barras de la derecha de la figura representan la estimación óptima (línea gruesa transversal interior) y el intervalo de valores probable para los seis escenarios testimoniales IEEEE en el periodo 2090-2099 respecto de 1980-1999. *Inferior:* Proyecciones del cambio de temperatura en superficie para el comienzo y final del siglo XXI, respecto del periodo 1980-1999, considerando los escenarios A2 (mapas superiores), A1B (mapas del centro) y B1 (mapas inferiores) a lo largo de los decenios 2020-2029 (izquierda) y 2090-2099 (derecha).

La figura 1.6 muestra las proyecciones multimodelo de las pautas de cambio de las precipitaciones. El IPCC (2007) considera como muy probable que aumente cuantitativamente la precipitación en latitudes altas, disminuyendo probablemente en la mayoría de las regiones terrestres subtropicales. Para el escenario A1B proyecta un descenso del 20% desde el comienzo hasta finales del siglo XXI

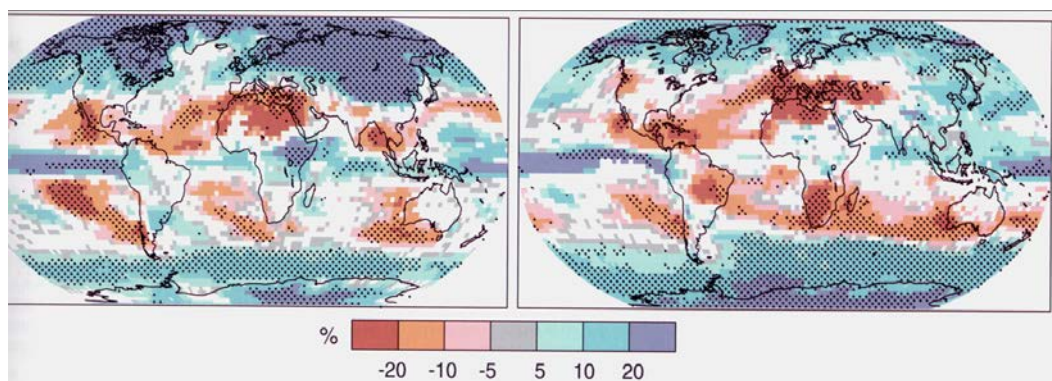


Figura 1.6. Cambios de la precipitación relativos (en valores porcentuales) para el periodo 2090-2099, respecto del periodo 1980-1999.

Los valores son promedios multimodelo basados en el escenario A1B, para los periodos diciembre-febrero (izquierda) y junio-agosto (derecha). Las áreas en blanco representan los lugares en que más de un 66% de los modelos coinciden en el signo del cambio, y las áreas punteadas representan los lugares en que más de un 90% de los modelos concuerdan en el signo del cambio.

Los cambios en la precipitación y en la temperatura inducen cambios de la escorrentía (Figura 1.7) y de la disponibilidad de agua. Con un grado de confianza alto la escorrentía aumentaría entre un 10 y un 40% de aquí a mediados de siglo en latitudes superiores y en ciertas áreas tropicales pluviales, y disminuirá entre un 10 y un 30% en regiones secas de latitudes medias y en los trópicos secos, debido a la disminución de las lluvias y a unas tasas de evapotranspiración más altas. Hay también un grado de confianza alto en que numerosas áreas semiáridas (por ejemplo la cuenca mediterránea, el oeste de Estados Unidos, el sur de África o el nordeste de Brasil) padecerán una disminución de sus recursos hídricos por efecto del cambio climático. Las áreas afectadas por sequías aumentarán en extensión, y ello podría repercutir negativamente en múltiples sectores: agricultura, suministro hídrico, producción de energía o salud. A nivel regional, la demanda de agua de riego aumentaría sustancialmente por efecto de los cambios climáticos.

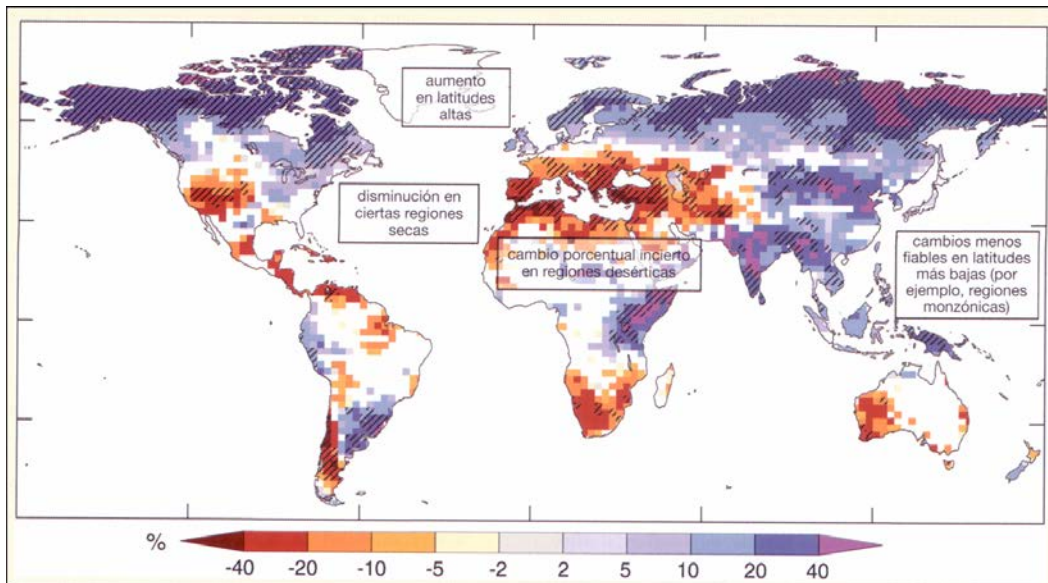


Figura 1.7. Cambios relativos de la escorrentía anual en gran escala (disponibilidad de agua, en valores porcentuales), para el periodo 2090-2099, respecto del periodo 1980-1999. Los valores representan la mediana de 12 modelos climáticos para el escenario A1B (IPCC, 2007)

Las sociedades pueden responder al cambio climático adaptándose a sus impactos y reduciendo las emisiones de GEI (mitigación), reduciendo con ello la tasa y magnitud del cambio. Un desarrollo más sostenible puede potenciar las capacidades de mitigación y de adaptación, y reducir las emisiones y la vulnerabilidad, pero su puesta en práctica podría ser dificultosa. En la actualidad son pocos los planes de fomento de la sostenibilidad que incluyen explícitamente la adaptación a los efectos del cambio climático o la promoción de una capacidad adaptativa.

EL MODELO SWAT

2. EL MODELO SWAT

Este capítulo se centra en describir las capacidades y estructura del SWAT 2009, por ser esta la versión utilizada en este trabajo. Se hace especial hincapié en aquellos aspectos relacionados con la producción de escorrentía, sedimentos y nutrientes.

2.1. CAPACIDADES DEL MODELO

El modelo SWAT ha sido desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas (Arnold et al., 1995), en la década de los años noventa, y fue generado para cuantificar y predecir el impacto de la intervención humana sobre los procesos hidrológicos y químicos en cuencas.

Desde su origen SWAT ha experimentado varias revisiones y mejorado sus capacidades, entre las que destacan:

- Está diseñado para predecir los impactos del cambio climático y la intervención humana sobre el crecimiento de la vegetación, el flujo de agua, la erosión del suelo, la exportación de nutrientes, pesticidas y bacterias.
- Es capaz de simular cuencas complejas de gran extensión espacial, con diferentes tipos de suelos, usos de la tierra y condiciones de manejo, proporcionando resultados con un alto grado de discretización espacial.
- Proporciona resultados continuos durante largos periodos de tiempo (uno o más años), lo que permite deducir patrones promedio anuales y estacionales a partir de simulaciones realizadas con condiciones climáticas variables.

Es un modelo basado en principios físicos, es decir, en lugar de integrar ecuaciones de regresión para describir la relación entre las variables de entrada y de salida, necesita datos específicos de la cuenca (clima, propiedades físicas del

suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo del suelo) y a partir de estos datos de entrada, el SWAT modela procesos físicos relacionados con el movimiento del agua y de sedimentos, crecimiento de los cultivos y ciclos de nutrientes. El hecho de que requiera más información de base que las ecuaciones de regresión, aporta mayor confianza a los resultados del modelo, incluso en su aplicación a cuencas sin monitorizar y bajo condiciones de cambio climático (Beven, 2000).

El modelo fue diseñado para utilizar datos fácilmente disponibles, como la información geográfica y series de datos climáticos diarios.

El SWAT es un modelo basado en procesos, espacialmente distribuido y continuo, que opera en intervalos de tiempo diario. En otras palabras, el modelo se basa en la descripción de procesos hidrológicos y de erosión del suelo, toma los datos de entrada de forma distribuida y proporciona resultados espacialmente distribuidos dentro de la cuenca, y realiza simulaciones continuas en el tiempo. Se fundamenta en el concepto del balance hídrico, es decir considera el agua que entra, la que se almacena y la que sale de la cuenca.

Para hacer más sencillo el uso del programa, sus creadores han diseñado una herramienta, denominada de forma genérica ArcSWAT, que en un entorno Windows, funciona como una extensión de la aplicación ESRI ArcGIS-ArcView. Sin salir del entorno GIS con ArcView, se dispone de las herramientas necesarias para la delineación de la cuenca, la definición y edición de los datos de entrada hidrológicos y agrícolas y para el funcionamiento y calibración del modelo.

El hecho de trabajar con un modelo de simulación hidrológica que reproduce todos los componentes del ciclo hidrológico con la ayuda de los sistemas de información geográfica, permite crear escenarios, tanto para condiciones presentes como futuras, determinando cómo afectará el cambio de una u otra variable en la generación de caudales y en la producción de sedimentos y descarga de nutrientes en una cuenca.

2.2. ESTRUCTURA Y COMPONENTES

El modelo está constituido por un conjunto de submodelos, los cuales se emplean para simular distintos procesos hidrológicos. La figura 2.1 muestra un esquema de los componentes, ubicados en ocho divisiones principales: hidrología, clima, sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de cultivos, nutrientes, pesticidas y manejo de cultivos. Entre éstos, uno de los más importantes es el hidrológico, dado que sirve de base para los otros submodelos.

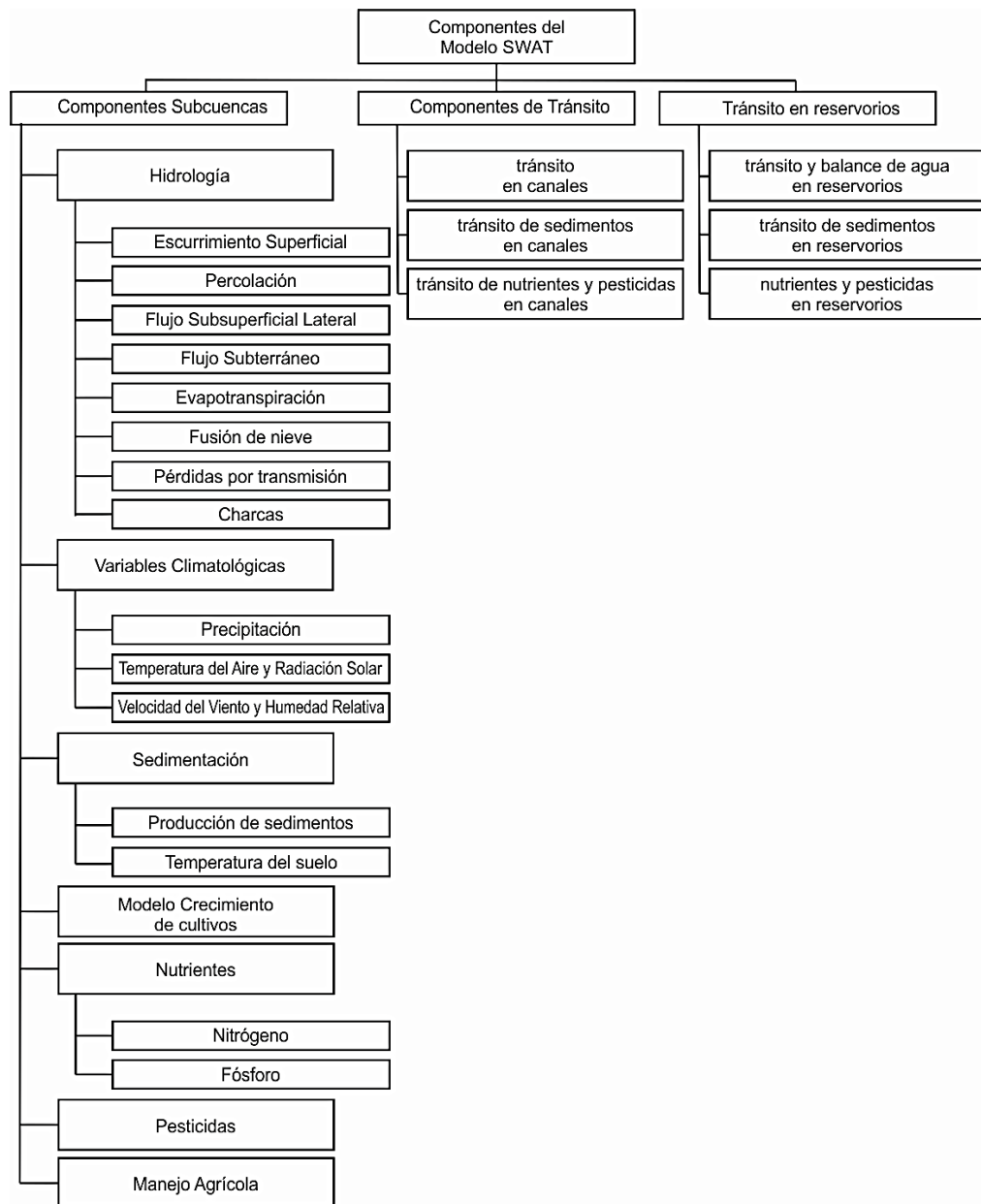


Figura 2.1. Esquema de los componentes del modelo SWAT.

En cuanto a la **heterogeneidad espacial**, el SWAT divide el espacio geográfico de estudio en pequeñas subcuencas con el fin de mejorar la resolución espacial de los resultados. Cada subcuenca, a su vez, se divide en Unidades de Respuesta Hidrológica (URHs), que son unidades territoriales caracterizadas por tener valores de pendiente, tipo de suelo y usos, similares. El modelo considera cada URH homogénea en cuanto a crecimiento de la vegetación, procesos de generación de escorrentía, erosión y carga de nutrientes. Las URHs representan porcentajes del área de la subcuenca y no se identifican espacialmente dentro de una simulación SWAT. Las URHs son útiles para discriminar las principales fuentes de agua y sedimentos dentro de cada subcuenca. El SWAT considera un único curso de agua por subcuenca.

El componente central del modelo SWAT es el cálculo diario del balance hídrico para cada subcuenca. El flujo calculado para cada URH se recoge en el canal principal de cada subcuenca y de ahí se canaliza por medio de la red de drenaje hacia la salida de la cuenca. La simulación del ciclo hidrológico en SWAT se divide en dos fases (Figura 2.2):

- a) La primera está relacionada con la generación de escorrentía superficial, sedimentos, etc., los cuales son aportados por cada una de las subcuencas al canal principal. Dicho de otro modo, controla la exportación de agua, sedimentos, nutrientes, pesticidas y bacterias desde cada una de las subcuencas al canal principal.
- b) La segunda se relaciona con la circulación del agua, sedimentos y otros compuestos a través de la red de drenaje hasta alcanzar la salida de la cuenca.

Para la **primera fase** la ecuación de balance de masas es la siguiente (Neitsch et al., 2001):

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{srop} - Q_{gw}) \quad (2.1)$$

donde:

SWt: Contenido final de agua en el suelo (mm)

SWo: Contenido inicial de agua en el día i (mm), t es el tiempo (días)

Rday: Precipitación en el día i (mm)

Qsurf: Escorrentía superficial en el día i (mm)

Ea: Evapotranspiración en el día i (mm)

Wsrop: Agua que entra en la zona no saturada del perfil del suelo en el día i (mm)

Qgw: Flujo de retorno en el día i (mm)

El balance hídrico global para toda la cuenca es el siguiente:

$$PCP = YLD + ET + (Ploss - GWQ) \quad (2.2)$$

donde:

PCP: Precipitación (mm)

YLD: Producción de agua (mm)

ET: Evapotranspiración (mm)

Ploss: Pérdidas por percolación (mm)

GWQ: Flujo de retorno (mm)

La producción de agua, por ejemplo el agua que llega en el flujo superficial, están formados por:

$$YLD = SUR Q + LAT Q + GW Q + Tloss \quad (2.3)$$

donde:

YLD = Producción de agua (mm)

SUR Q = Escorrentía superficial (mm)

LAT Q = Flujo lateral (mm)

GWQ = Flujo de retorno (mm)

Tloss = Pérdidas por transmisión (mm)

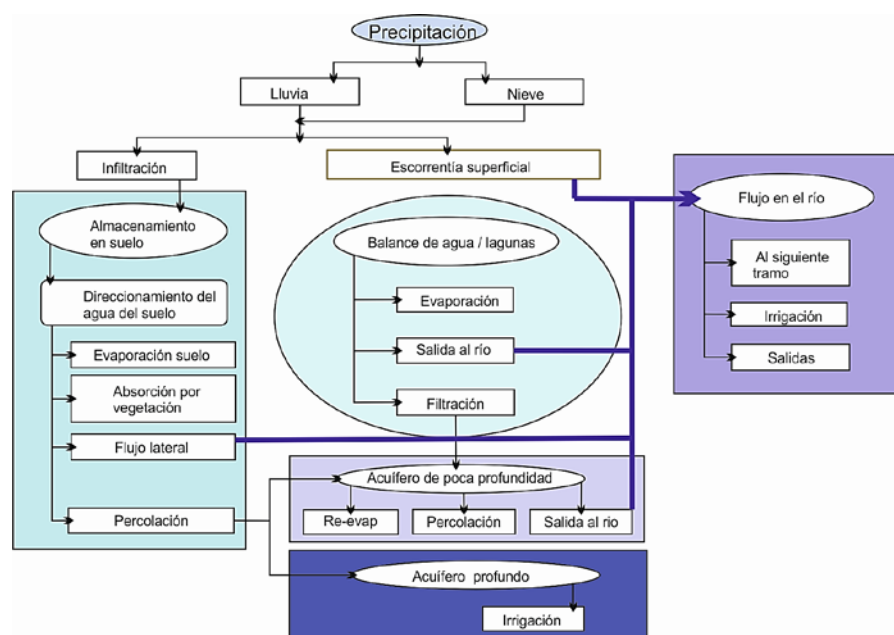


Figura 2.2. Ciclo del agua simulado por el SWAT.

El balance hídrico se calcula individualmente para cada URH y posteriormente se suman los resultados para obtener el valor de toda la cuenca. Esta forma de operar aumenta la precisión del cálculo con respecto a los modelos agregados puesto que no todos los suelos, cultivos y usos se comportan de la misma manera en términos hidrológicos.

La **escorrentía superficial** se simula de dos maneras, mediante el número de curva (NC-SCS, 1972), que separa la lluvia en escorrentía superficial e infiltración, o bien computando la infiltración por el método de Green y Ampt (Chow et al., 1998), requiriendo para este último datos subdiarios de precipitación.

El NC (ampliamente descrito en el apartado 1.3.1.1.2) se fundamenta en que la escorrentía es función de la permeabilidad del suelo, uso del suelo, prácticas agrícolas, y condiciones antecedentes de humedad del suelo. En general, cuanto mayor número de curva (rango aprox. 25 a 98) mayor escorrentía superficial.

El modelo simula el **pico de escorrentía superficial** (escorrentía máxima) a través del método racional (Lencastre y Franco, 1992), estimando la intensidad máxima de la lluvia diaria en 30 minutos observando los valores máximos registrados en 30 minutos en el área de aplicación del modelo.

La **escorrentía subsuperficial** se simula usando un modelo basado en la onda cinemática, desarrollado por Sloan y Moore (1984).

El agua de **percolación** es la fracción del agua infiltrada que logra atravesar la zona radicular, que en el SWAT comprende de 0-2 m. SWAT distribuye el agua de percolación entre un acuífero superficial libre y un acuífero profundo. A partir del acuífero somero puede alcanzar la red de drenaje (flujo de retorno), perderse por evapotranspiración (denominada “Re-evap”) o bien percolar hasta los acuíferos profundos. El SWAT asume que el agua que recarga el acuífero profundo se pierde del sistema.

El SWAT ofrece tres métodos de estimación de la **evapotranspiración potencial**: Penman-Monteith (Monteith, 1965), Hargreaves y Sammani (1985) y Priestley y Taylor (1972). La opción de Penman-Monteith se debe utilizar para los escenarios de cambio climático que dan cuenta de cambios en los niveles de CO₂ atmosférico.

El SWAT simula la **erosión y producción de sedimentos** a nivel de URH, a través de la MUSLE (descrita en el apartado 1.3.1.1.2) y de un modelo de movimiento de sedimentos a lo largo de la red de drenaje de la cuenca. La MUSLE tiene en cuenta la lluvia, la escorrentía superficial, el factor de cubierta vegetal y otros parámetros relacionados con la topografía, erosionabilidad del suelo y prácticas agrícolas.

El factor **cubierta vegetal** se calcula con el submodelo de crecimiento de la vegetación (incluye crecimiento de árboles hasta la fase adulta) que es una simplificación del modelo de crecimiento vegetal EPIC (Williams, 1995). El desarrollo fenológico de la vegetación se basa en las unidades de calor acumuladas diariamente. La producción potencial de biomasa se modela a continuación utilizando un método desarrollado por Monteith que simula el desarrollo del área foliar (según el estado fenológico), interceptación de la luz y conversión de la luz interceptada en biomasa, incluyendo las consecuencias de las concentraciones atmosféricas de CO₂ en la eficiencia de esta conversión. El submodelo también tiene en cuenta que el crecimiento de las plantas puede estar inhibido por la temperatura, el estrés hídrico y la falta de nutrientes.

Los **impactos del cambio climático** pueden ser simulados directamente en SWAT teniendo en cuenta: (1) los efectos del aumento de las concentraciones atmosféricas de CO₂ sobre el desarrollo de las plantas y la transpiración, y (2) los cambios en las variables climáticas.

El SWAT permite la **simulación de prácticas agrícolas** tales como riego, fertilización, modalidad de siembra y recolección mediante un submodelo de gestión. También simula prácticas de conservación del suelo.

La **segunda fase** del ciclo hidrológico comprende la fase de drenaje (conocida también como encauzamiento o circulación de flujos). Una vez generada la escorrentía y otros compuestos en las URHs, se suman a nivel de subcuenca y desde cada subcuenca son canalizados a través de un sistema de canales de drenaje y conducidos hasta la salida de la cuenca. SWAT simula el flujo por el cauce mediante el método de almacenamiento de tasa variable (Williams, 1969) o bien por el método de Muskingum (Neitsch et al., 2005), que son ambas variaciones del modelo de la onda cinemática.

El transporte de sedimentos, en el SWAT 2009, se simula como una función de la velocidad máxima en el canal, que es un enfoque simplificado del concepto de energía del flujo (Arnold et al., 1995) utilizado en versiones anteriores. El transporte de sedimentos en la red de drenaje es función de dos procesos: deposición de los sedimentos en suspensión y erosión del canal. La cantidad máxima de sedimentos en suspensión que pueden ser transportados por el flujo se calcula utilizando una versión simplificada del concepto de energía del flujo (Arnold et al., 1995). Si los sedimentos en suspensión exceden la capacidad de transporte de la corriente se produce sedimentación, mientras que si el canal se erosiona, los sedimentos procedentes de esa erosión se adicionan a los transportados.

2.3. DATOS DE ENTRADA Y SALIDA DEL MODELO

La versión de SWAT utilizada en esta tesis es ArcSWAT 2009.93.7b, que, como se ha mencionado, funciona como una extensión del Sistema de Información Geográfica ArcGIS con el fin de facilitar los cálculos y manipulación de datos geográficos.

Datos de entrada

Para la aplicación del SWAT en una cuenca se requiere la siguiente información:

- Modelo de Elevación Digital (MED) de la cuenca, que se utiliza para delimitar las subcuencas y la red de drenaje.
- Mapas de tipos de suelos y de usos del suelo, que sirven para delimitar URHs.
- Parámetros físicos para cada tipo de suelo, que se utilizan principalmente para el cálculo de la escorrentía superficial y subterránea.
- Parámetros biofísicos de la vegetación asociada con cada tipo de uso del suelo, que se emplean esencialmente para el submodelo de crecimiento de vegetación.
- Información sobre prácticas de manejo agrícola asociadas con los distintos usos de la tierra, que se usan para el submodelo de crecimiento de la vegetación.
- Datos meteorológicos diarios para el periodo de estudio, que se utilizan como funciones de forzamiento del ciclo hidrológico y para calcular el crecimiento de la vegetación. Las variables climáticas necesarias son:
 - Precipitación
 - Temperatura máxima y mínima
 - Radiación solar
 - Humedad relativa
 - Velocidad del viento

Los datos meteorológicos de entrada pueden ser aportados al modelo a partir de los registros medidos, o bien generados por el mismo. El SWAT incluye un generador de clima que permite obtener valores diarios de las variables atmosféricas de entrada. También sirve para completar los datos ausentes en los registros diarios y para generar series climáticas estocásticas. El modelo generador de clima está basado en el generador climático WXGEN (Sharpley y Williams, 1990).

- La lluvia se genera utilizando un modelo de cadena de Markov asimétrico o con suavizado exponencial, basado en la probabilidad de que exista lluvia un determinado día atendiendo a la ausencia o presencia de lluvia en el día anterior, es decir, en función de la relación día húmedo-día seco, el modelo determina estocásticamente si se produce o no lluvia.
- El procedimiento utilizado para generar valores diarios de temperatura máxima, temperatura mínima y radiación se basa en el

proceso de generación semanal estacionario presentado por Matalas (1967).

- La humedad relativa se genera a partir de los valores de temperatura y de las temperaturas medias del punto de rocío, utilizando una distribución triangular. Todos estos parámetros (radiación solar, temperatura y humedad relativa) se ajustan después en función de la existencia o ausencia de lluvia.
- La velocidad del viento se genera a partir de los valores medios mensuales utilizando una distribución exponencial modificada.

Para implementar el generador de clima, SWAT requiere información estadística mensual a largo plazo (por ejemplo, media y desviación estándar) para la precipitación, temperatura máxima y mínima, temperatura del punto de rocío, radiación solar y velocidad del viento.

Salidas del modelo

SWAT genera resultados tanto para el flujo superficial como para los compuestos circulantes por el cauce (sedimentos, fósforo, nitrógeno, etc.).

Para cada subcuenca, el modelo proporciona valores **diarios** para:

- Los componentes del balance hídrico: evapotranspiración, infiltración al acuífero profundo, escorrentía superficial y subsuperficial.
- Erosión del suelo dentro de la cuenca.
- Producción de biomasa vegetal y rendimiento agrícola.

El modelo también proporciona resultados de estos parámetros para cada URH dentro de cada subcuenca, así como valores de temperatura global, resultados de estrés hídrico por temperatura y de nutrientes para cada UHR.

Por último, SWAT proporciona resultados diarios de producción de agua y sedimentos para cada canal dentro de cada subcuenca.

La interfase ArcGIS permite mostrar los resultados del SWAT como tablas, gráficos y mapas.

Debido a su flexibilidad en cuanto a requerimientos de datos de entrada y posibilidades de simulación, el SWAT ha sido aplicado en diferentes partes del

mundo (EEUU, Europa, India, Nueva Zelanda, etc.), bajo diferentes condiciones de disponibilidad de información y con diferentes fines. Por mencionar algunos ejemplos, se pueden citar dos proyectos financiados por la Comunidad Económica Europea: el proyecto CHES (2001), dentro del cual se utilizó para cuantificar los efectos del cambio climático en cinco cuencas europeas, y el proyecto EUROHARP (2006) en el cual se aplicó a 17 cuencas hidrográficas europeas para estimar pérdidas de fósforo y de nitrógeno desde fuentes difusas a arroyos de agua dulce y a sistemas costeros. Esto demuestra que es particularmente apto para alcanzar los objetivos propuestos en esta Tesis.

JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

3. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

El agua es un recurso vital para los ecosistemas humanos y naturales. Las cuencas hidrográficas son unidades territoriales donde funciona la combinación de un sistema hídrico que produce agua, simultáneamente con un subsistema económico y social, activado por el hombre y la tecnología. En ellas se producen bienes y servicios agrícolas, pecuarios, forestales y recreativos demandados por la población.

La disponibilidad de agua en una región geográfica está fuertemente influenciada por las precipitaciones, la evaporación, la topografía, litología y otros factores específicos de la región, como son el uso del suelo y cobertura vegetal. Es por tal motivo que las interacciones agua-suelo-vegetación-clima deben ser comprendidas con la finalidad de entender el comportamiento hidrológico en pro de una adecuada planificación de cuencas. Las acciones de manejo de cuencas son parte de los procesos de gestión ambiental, dado que tienen por finalidad contrarrestar los efectos ambientales negativos y favorecer los positivos. Parte de estos efectos positivos, pueden ser evaluados en términos de cantidad, calidad, lugar y tiempo en que el agua es captada y escurre de una cuenca.

A grandes rasgos, un sistema hidrológico lleva a cabo dos clases de funciones, las estrictamente asociadas a su estado natural de carácter geodinámico y ecológico, y las derivadas de considerar el agua un recurso para el abastecimiento de las distintas necesidades humanas. El conocimiento de la magnitud y variabilidad del caudal a escala de cuenca de drenaje es de suma importancia para la planificación y gestión de los recursos hídricos de un territorio, tanto desde el punto de vista del abastecimiento de agua para consumo como para muchas otras aplicaciones, como son la regulación de embalses, la gestión del riego, la generación de energía hidroeléctrica, evaluación del transporte de sedimentos, uso recreativo, y para la gestión y control de ecosistemas acuáticos. Además, los datos de variabilidad del caudal pueden ser utilizados para evaluar

eventos extremos como inundaciones y sequías (Dale y Marsh, 2002; Gedalof et al., 2004). La actual perspectiva de la gestión hidrológica busca una explotación sostenible de los recursos y la preservación de los valores hidrológicos, ecológicos y socioeconómicos relacionados con el agua. Esta idea es el fundamento de los objetivos de la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE).

Es un hecho sobradamente conocido que España es el tercer país europeo con mayor presión sobre los recursos hídricos (EEA, 2003). Esto se traduce en una intensa presión sobre las funciones ambientales del agua y sobre el estado ecológico de los ecosistemas ligados a ella. La severa reducción de los caudales fluviales constituye uno de los impactos más graves y generalizados de esta situación. Esto puede tornarse eventualmente aún más complicado si se consideran los potenciales impactos hidrológicos producidos por los cambios acelerados en el clima causados por el calentamiento global.

La constatación de un cambio de tendencia en las variables que controlan el balance hídrico a través de los modelos climáticos globales, en especial el aumento de la temperatura en el planeta y la variación regional de la precipitación, implica modificaciones en el balance hídrico a escala de cuenca, y en consecuencia, en la calidad y disponibilidad de los recursos hídricos y en los procesos de erosión y transporte de sedimentos (Asselman et al., 2003, Walling, 2007). Según las predicciones de los modelos climáticos (IPCC, 2007) el cambio climático comportará un aumento de temperatura y un descenso de las precipitaciones con lo que disminuirá la cantidad de agua disponible en los ríos y en los acuíferos, afectando negativamente a la cobertura de la demanda de abastecimiento de los procesos ecológicos y de las necesidades humanas. También conllevará un incremento de la frecuencia de los fenómenos hidrológicos extremos, con fuertes sequías y avenidas. Las variaciones de temperatura y precipitación asociadas al cambio climático modificarán los patrones de comportamiento químico de determinados contaminantes, la dinámica de transporte y la evolución de los contaminantes en el medio hídrico. La disminución de la precipitación supondrá una reducción de los caudales de los ríos que comportará menos capacidad de dilución de ciertos contaminantes. El exceso de

nutrientes combinado con la escasez de caudal agrava de forma sinérgica los episodios de eutrofización y anoxia. Por otro lado, el aumento de las avenidas (en magnitud y frecuencia) incrementará el arrastre y la disolución de compuestos, facilitará su resuspensión y transporte, y aumentará su concentración en las aguas superficiales.

Desde hace décadas se piensa que la variabilidad temporal de los recursos hídricos no está relacionada solo con las fluctuaciones de temperatura y precipitación, sino también con la evolución de la cubierta vegetal y el uso del suelo. Por ejemplo, el trabajo de Beguería et al. (2003), realizado a partir de datos pertenecientes a una red de cuencas de cabecera en la cuenca del Ebro, relacionó el efecto de las oscilaciones climáticas y de los cambios de uso del suelo con modificaciones en los caudales, para los cuales observaron una reducción del 30% como consecuencia de la recuperación de las masas forestales. Estos resultados fueron posteriormente confirmados por Gallart y Llorens (2004) dentro de la misma unidad de estudio, pero analizando cuencas diferentes, señalando una tendencia decreciente en la aportación de estos ríos, más relacionada con cambios en el uso del suelo que con cambios en las precipitaciones y en la evapotranspiración. Por ello, aunque está identificada la tendencia en la variación de caudal de los ríos, puede ser difícil atribuirle al calentamiento global o a cambios y modificaciones que ocurren en la cuenca. Ello demuestra que los escenarios futuros deberían contemplar los cambios en el uso del suelo con el fin de realizar una predicción válida de los recursos hídricos.

Un amplio número de trabajos han utilizado las variables hidrológicas derivadas del registro de caudales a largo plazo para describir el régimen de los ríos españoles, con la excepción del noroeste de España (Gallart y Llorens, 2001; Ceballos et al., 2008). En esta zona, especialmente en Galicia, la mayoría de los ríos carecen de registros de caudal lo suficientemente largos como para llevar a cabo el análisis del régimen fluvial. Los estudios hidrológicos basados en la monitorización y seguimiento de cuencas fluviales son relativamente recientes en Galicia, debido fundamentalmente al escaso interés que tradicionalmente se ha prestado a los recursos hídricos, al considerar que por su abundancia, la región se

encuentra en una posición privilegiada en comparación con otras regiones españolas, en las que por otra parte, se producen más inundaciones y sequías de amplio impacto socio-económico. Esta es, sin duda, la causa principal de que las investigaciones científicas llevadas a cabo en España en este campo se hayan centrado esencialmente en el medio árido o semiárido, ó bien en espacios afectados por incendios forestales. Sin embargo, esta situación ha cambiado en los últimos años. Las inundaciones de otoño de 2006 y la prolongada sequía del verano de 2007, con daños directos en numerosas localidades gallegas, alertan sobre la vulnerabilidad de los sistemas acuáticos y de los recursos que dependen de ellos (MARM, 2008). Un ejemplo muy significativo es el de la acuicultura, un sector con una importante participación en la economía gallega y que ha sufrido fuertes pérdidas tras las citadas avenidas. Todo esto subraya la necesidad de mejorar el conocimiento de la dinámica fluvial como base para el desarrollo de modelos de gestión de cuencas, que permitan prevenir los riesgos directos asociados a estos fenómenos naturales que, ya sea a través de los efectos del cambio climático, o por una falta de control en la gestión del suelo, parecen haber aumentado en intensidad a lo largo de los últimos años, así como minimizar su impacto sobre el medio ambiente y la sostenibilidad de los recursos naturales.

En el contexto del cambio climático, cada cuenca mostrará una capacidad de respuesta a los efectos adversos lo cual definirá su vulnerabilidad frente a estos impactos. Para poder plantear estrategias apropiadas en materia de gestión del agua, primero es preciso realizar un diagnóstico previo lo más fiable posible sobre cuáles serán las condiciones hidrológicas futuras de referencia. El estudio de los caudales futuros, así como la respuesta sedimentaria de una cuenca, se pueden abordar con la aplicación de modelos hidrológicos complementados con información obtenida a partir de modelos de simulación climática, lo cual constituye el objetivo general de este trabajo.

La escasa adecuación de las observaciones climáticas e hidrológicas en Galicia (densidad y localización de las observaciones, longitud de las series y calidad de los datos) obstaculiza la detección de los efectos del cambio climático en los recursos hídricos de las cuencas (Rial Rivas et al., 2009; Raposo, 2012).

A consecuencia, posiblemente, de las dificultades que plantea la obtención de datos durante eventos de precipitación, la mayoría de los estudios realizados en Galicia se basan en registros obtenidos en condiciones de flujo base o en un número limitado de episodios de escorrentía y suelen estar restringidos a un periodo específico del año. En esta tesis se utilizan tanto datos de flujo base como los resultados de un gran número de avenidas (parte de ellas estudiadas por Rodríguez-Blanco, 2009), lo que permite disponer de una base de datos de calidad, con el fin de evaluar la aplicabilidad del modelo hidrológico SWAT en la interpretación del comportamiento hidrosedimentario de la cuenca del río Corbeira, una subcuenca del curso alto del río Mero (provincia de La Coruña).

Los *objetivos* concretos de esta tesis son calibrar y validar el modelo de simulación hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para descarga de agua y producción de sedimentos en la cuenca del río Corbeira, una pequeña cuenca agroforestal representativa del clima atlántico, con dos finalidades:

1. Con los resultados de las simulaciones se evalúa el efecto del cambio climático sobre la respuesta hidrosedimentaria de la cuenca. Concretamente, se analizan los cambios que, a medio y largo plazo, podría experimentar la descarga de agua, así como la carga de sedimentos exportados por la cuenca del río Corbeira.
2. Con la calibración y validación del modelo SWAT se persigue evaluar su capacidad de predicción en las condiciones de la zona de estudio, de manera que, posteriormente, resulte apto para simular caudales y producción de sedimentos en cuencas no aforadas de características climáticas, geomorfológicas, y de uso del suelo, similares a la estudiada. En último término, servirá para prever situaciones futuras (no solo efectos del cambio climático, si no también efectos del cambio de uso, de las prácticas de manejo, de medidas de conservación, etc.) en un mayor número de cuencas de Galicia y diseñar estrategias para paliar los posibles efectos negativos.

La metodología básicamente consistió en:

- a) Calibración del modelo, para lograr un ajuste satisfactorio entre las variables medidas (descarga de agua y sedimentos) y esas mismas variables simuladas, mediante un análisis de sensibilidad en los parámetros más sensibles del modelo.
- b) Validación del modelo, para evaluar su capacidad predictiva mediante la comparación de la descarga de agua y sedimentos medidos con los simulados.

- c) Modelación de la descarga de agua y sedimentos con series de proyecciones climáticas futuras, para estimar el impacto producido por el cambio climático en dichas variables.

Adicionalmente a los objetivos anteriores, el modelo SWAT se usa también en esta tesis para estimar la carga de nitratos en la cuenca del río Corbeira.

La elección del modelo SWAT se debe fundamentalmente a las siguientes consideraciones:

- Es un modelo de base física, distribuido, continuo, que trabaja a escala de cuenca y es capaz de analizar múltiples procesos (incluyendo hidrología, crecimiento de la vegetación y producción de sedimentos) requiriendo relativamente pocos datos de entrada.
- Está diseñado para predecir los impactos del cambio climático y la intervención humana sobre el flujo de agua, la erosión del suelo y la exportación de nutrientes, entre otros.
- El SWAT es una interfase que trabaja sobre la plataforma de un SIG, que permite organizar datos geográficos de entrada, los cuales son procesados bajo un modelo de balance hídrico y permite crear escenarios tanto para condiciones presentes como futuras, determinando cómo afectará el cambio de una u otra variable en la producción de caudales, sedimentos y nutrientes en una cuenca determinada.
- Los cálculos y procesos de computación del modelo pueden ser llevados a cabo por equipos informáticos habituales.

Sin embargo, una de sus principales debilidades es que muchos parámetros aportados por el modelo tienen una base empírica y no siempre representan las condiciones de aplicación del modelo, por lo que es necesario valorar su aplicabilidad a cada caso. Esto se solventa realizando la calibración y validación con datos locales.

Se ha elegido la cuenca del río Corbeira por varios motivos:

- Puede considerarse representativa del medio rural gallego, en cuanto a que posee baja densidad de población y ausencia de actividad industrial. Al mismo tiempo, es representativa del modo de ocupación de los suelos en esta región, caracterizándose por su carácter agroforestal, con un uso claramente mezclado del territorio y repartido entre cultivo, pradera y arbolado.

- Presenta suficiente homogeneidad, en cuanto a las características físicas, para hacer posible la evaluación del efecto de ciertos factores (bioclimáticos, hidrometeorológicos) sobre el comportamiento de las variables objeto de estudio.
- Para el estudio de los aspectos hidrológicos, resultaba interesante la elección de una cuenca con una red hidrológica organizada con un colector principal permanente que permitiera su monitorización.
- Su cercanía al centro de trabajo, fácil accesibilidad y reducidas dimensiones, facilitan el control de los equipos instrumentales allí instalados, evitando pérdida de datos, así como la identificación de los procesos que ocurren dentro de la cuenca.
- Permite dar continuidad a los estudios iniciados por el grupo de investigación en el año 2005, dedicados a conocer la respuesta hidrosedimentaria y el efecto de la escorrentía sobre la dinámica de sedimentos y fósforo en esta misma cuenca. Estos estudios fueron objeto de una tesis doctoral (Rodríguez-Blanco, 2009), la cual reportó un considerable número de datos de caudal y de exportación de sedimentos, que sumados a los medidos posteriormente (2008-2010), computan un periodo de tiempo suficientemente amplio, como para llevar a cabo una adecuada calibración y validación del modelo. Por otra parte, el aprovechamiento de la infraestructura y los conocimientos adquiridos sobre esta cuenca contribuyeron a su elección.

Finalmente, se debe tener en consideración que la cuenca seleccionada para llevar a cabo este estudio se encuentra aguas arriba del embalse de Cecebre, principal fuente de abastecimiento de agua potable para la ciudad de La Coruña y áreas metropolitanas. Esto concede una especial relevancia a las conclusiones que puedan extraerse de esta tesis, por su posible aplicación para la predicción de las entradas de sedimentos al embalse y el impacto de estos aportes en los tratamientos de potabilización del agua. Por otra parte, las posibles modificaciones de caudal deberán de ser tenidas en cuenta a efectos de prever las capacidades necesarias de embalse. Si los horizontes de futuro comportan una reducción de los recursos en las aportaciones esperadas y/o una mayor dificultad para su aprovechamiento, llevaría a prever capacidades superiores de embalse, para satisfacer la demanda con criterios de mantener la garantía. Finalmente, indicar que el embalse de Cecebre es un ecosistema que está incluido en la Red Natura 2000 de la UE como espacio a proteger, por lo que las modificaciones que

ocurran en los recursos hídricos situados aguas arriba repercutirán en dicho ecosistema.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CUENCA

4. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CUENCA

El conocimiento del medio físico constituye la base para la aplicación de modelos hidrológicos basados en procesos físicos. La caracterización de la cuenca del río Corbeira ha sido ampliamente abordada en un estudio previo (Rodríguez-Blanco, 2009). Por tal motivo, en este capítulo se presenta un resumen de las características físicas de la cuenca que resultan determinantes desde el punto de vista de la aplicación del modelo SWAT.

4.1. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio es la cuenca hidrográfica del río Corbeira, una pequeña cuenca de la cabecera del río Mero, situada dentro de la provincia de La Coruña. El río Corbeira nace en el término municipal de Cesuras y desemboca en el río Mero por su margen derecha en el municipio de Abegondo. Está localizada a unos 30 km al sureste de la ciudad de La Coruña, en la confluencia de los términos municipales de Cesuras, Oza dos Ríos y Abegondo. En la figura 4.1 se muestra la localización del área de estudio dentro de la Comunidad Autónoma de Galicia y en detalle su ubicación en la cuenca del Mero.



Figura 4.1. Localización del área de estudio.

4.2. CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS

En la figura 4.2 se presenta el modelo de elevación digital del terreno de la cuenca y sus alrededores. El punto más alto corresponde al alto de Leiros (474 m), en el término de Sta María de Dordaña, y el más bajo corresponde a la propia desembocadura del río Corbeira con el Mero (60 m), siendo la altura media de la cuenca de 267 m. La parte más meridional cuenta con las mayores altitudes, 344 y 435 m, que separan la cuenca del río Corbeira de la del río Mandeo. Por el oeste, se encuentra aislada de la del río Mourellos (otro pequeño afluente de la margen derecha del río Mero) por el Coto de Cabanas (359 m), Monte Vello (350 m), los Montes de Zaucín (265) y ya en la parte más baja por Rebordelos.

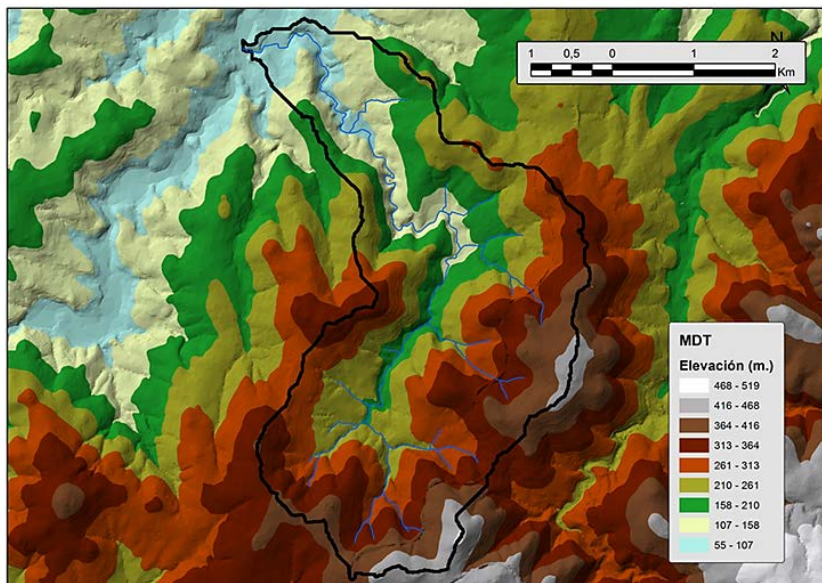


Figura 4.2. Modelo de elevación digital de la cuenca del río Corbeira.

La cuenca muestra forma alargada con una longitud máxima de 9.74 km y un valor medio de pendiente del 19%, aunque en más del 73% del área supera el 13% y aproximadamente el 25% de la superficie presenta pendientes escarpadas (>25%). La morfología de la cuenca, figura 4.3, está caracterizada por un relieve accidentado, especialmente en las laderas que flanquean al río por la margen izquierda, en la parte media-baja de la cuenca. En la parte media-alta de la cuenca se observan dos zonas de pendientes escarpadas a ambos lados del río perfectamente separadas por un trecho de menores pendientes (6-15%).

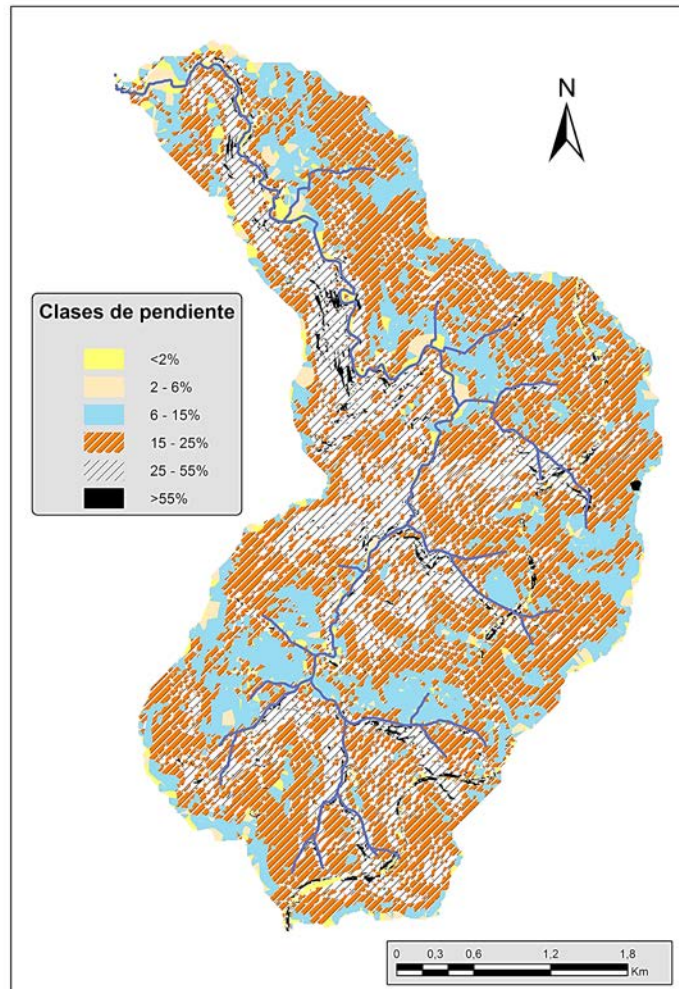


Figura 4.3. Mapa de clases de pendientes, según la FAO, en la cuenca del río Corbeira.

La longitud del *cauce principal*, definida en base a criterios topográficos según los cuales el cauce principal es aquel cuya cabecera alcanza la cota más elevada, es de 10 km y la sinuosidad de 1.3, lo que lo sitúa dentro del tipo *sinuoso* de acuerdo con la terminología de Morisawa (1985). Presenta un perfil cóncavo, con acusada pendiente en la parte alta (14% de pendiente media) mientras que aguas abajo se caracteriza por su uniformidad y baja pendiente, siendo el gradiente medio de pendiente del 2.9%, lo que indica que las aguas que circulan por esta cuenca no están sometidas a grandes velocidades.

La *red de drenaje* es de tipo dendrítico (figura 4.4), de acuerdo con la tipología de redes establecida por Howard (1967), y está constituida por corrientes de agua de corto recorrido y régimen permanente, que en su mayoría se sitúan en

la margen derecha del cauce. Siguiendo la clasificación de Strahler (1964) la red de drenaje es de orden 3, aunque la mayoría de las corrientes son de orden 1 (figura 4.4).

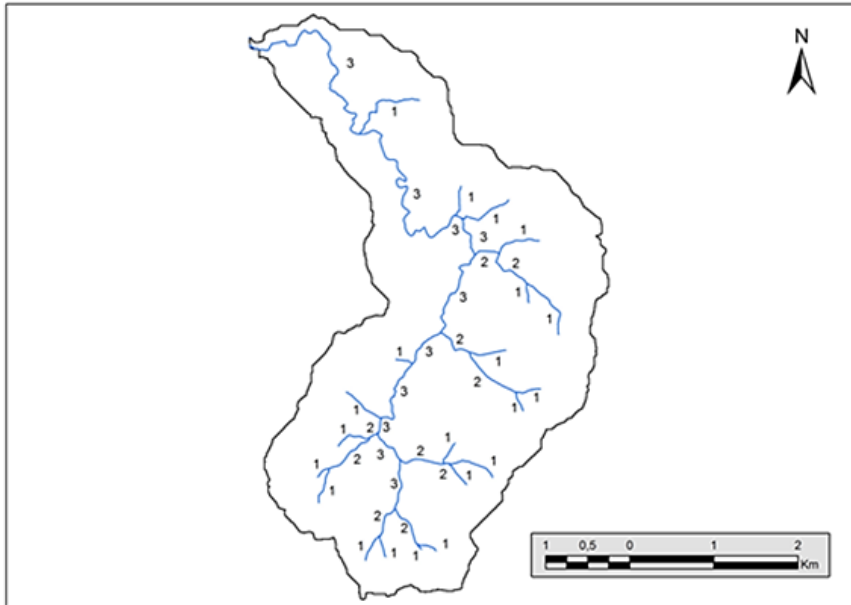


Figura 4.4. Codificación de las corrientes fluviales del río Corbeira según la clasificación de Strahler.
Se designan con 1 los cauces de primer orden, con 2 los de segundo y así sucesivamente.

La *densidad de drenaje* que constituye, en cierto modo, un reflejo de los factores de control de la producción de agua y sedimento de una cuenca (López Bermúdez et al., 1988) es de 1.38 km/km², lo que según Strahler (1964) indica una baja densidad de drenaje y una textura gruesa.

4.3. MARCO GEOLÓGICO

Desde el punto de vista geológico, la cuenca se encuentra inmersa en su totalidad dentro del “Complejo de Órdenes”. En su conjunto, el Complejo de Órdenes es una estructura alóctona, que cabalga sobre los materiales de Dominio Esquistoso de Galicia Central y Occidental y ocupa una amplia extensión de la provincia de A Coruña, aproximadamente 1900 km². Está integrado por una serie de Unidades que, de acuerdo con la subdivisión efectuada por Martínez-Catalán

et al. (1984) son: Unidad de Santiago de Compostela, Unidad de Vila de Cruces, Unidad de Sierra Careón-Bazar, Unidad de Sobrado-Melide y Unidad de Betanzos Arzúa, sobre la que se encuentra el área de estudio.

La Unidad de Betanzos-Arzúa ocupa la parte central del Complejo, y su extensión es muy superior a la del resto de Unidades juntas. Los tipos petrológicos más comunes dentro de esta Unidad son las filitas y esquistos (IGME, 1981), lo que confiere una cierta uniformidad al sustrato en la cuenca (figura 4.5). La paragénesis mineral más frecuente es la constituida por moscovita, biotita y cuarzo. Los accesorios suelen ser clorita, plagioclasas, anfíboles, sillimanita, etc.



Figura 4.5. Esquistos en fase avanzada de alteración (especialmente b) en la cuenca del río Corbeira.

4.4. TIPOS DE SUELOS

A causa de la homogeneidad del material geológico de la cuenca, los suelos presentan poca variabilidad (figura 4.6). Los predominantes son los *Umbrisoles húmicos* y *Umbrisoles endolépticos*, representando entre ambos un 74% de la extensión de la cuenca. Estos suelos, con un perfil poco desarrollado (AC o AR) y un epipedión úmbrico, se sitúan preferentemente en zonas de pendiente acusada y su uso es forestal. En orden de importancia, en cuanto a extensión se refiere, le siguen los *Cambisoles ántricos* y *Umbrisoles ántricos* (conjuntamente ocupan el 25% de la superficie total de la cuenca). Estos suelos, cuyo perfil característico es de tipo ABC, aparecen esencialmente en zonas de poca pendiente y coinciden con

áreas agrícolas, presentando por ello evidencias de influencia humana, debido a las prácticas de labranza, tales como pérdida de color y de materia orgánica.

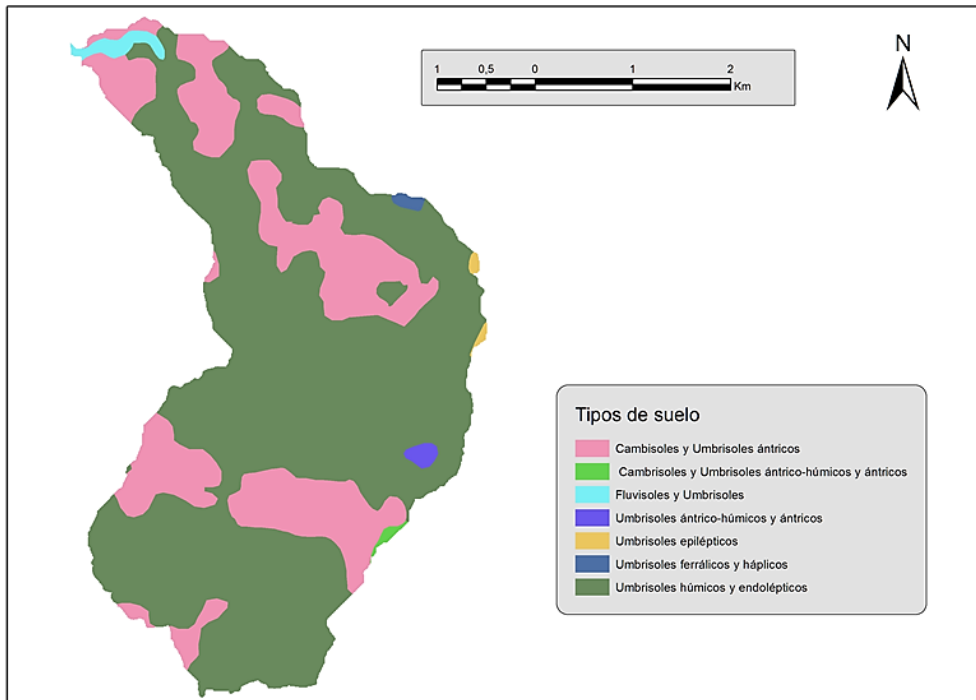


Figura 4.6. Tipos de suelos en la cuenca según la clasificación FAO (1998).

Por último, y asociados a las llanuras aluviales próximas al cierre de la cuenca se encuentran los Fluvisoles, que son suelos jóvenes, cuya composición depende en gran medida de los materiales transportados por el río. Están dedicados fundamentalmente a praderas y pastos.

En términos generales, el horizonte A de los suelos de la cuenca se caracteriza por presentar pH ácido (media: 4.5 en forestales - 5.4 en suelos de prado), textura franco limosa, y estar bien provisto de materia orgánica, con un valor medio que oscila entre el 5.3% de los suelos de cultivo al 8.5% de los suelos forestales. El contenido medio de nitrógeno total es elevado, oscila entre 0.26% y 0.47%, correspondiendo el valor más alto a los de prado, mientras que el contenido de fósforo asimilable, es siempre más elevado en los suelos de cultivo (media: 69 mg kg⁻¹, máximo: 122 mg kg⁻¹).

4.5. USOS DEL SUELO Y VEGETACIÓN

Se diferenciaron cuatro *usos* que corresponden a bosque, cultivo, pradera y zonas impermeables. Como se puede observar en la figura 4.7, la cuenca del río Corbeira es un sistema mayoritariamente forestal. La superficie dedicada a bosque en el conjunto de la cuenca (65%) resulta muy superior a la superficie agraria útil (SAU: 29.8%), constituyendo la producción de madera el principal aprovechamiento de la misma, tal como sucede en el resto de la comunidad gallega. En relación con las especies forestales, existe un predominio del eucalipto sobre el pino, y de éstos dos sobre las formaciones de robles y castaños, que aparecen escasamente representadas en el área de estudio.

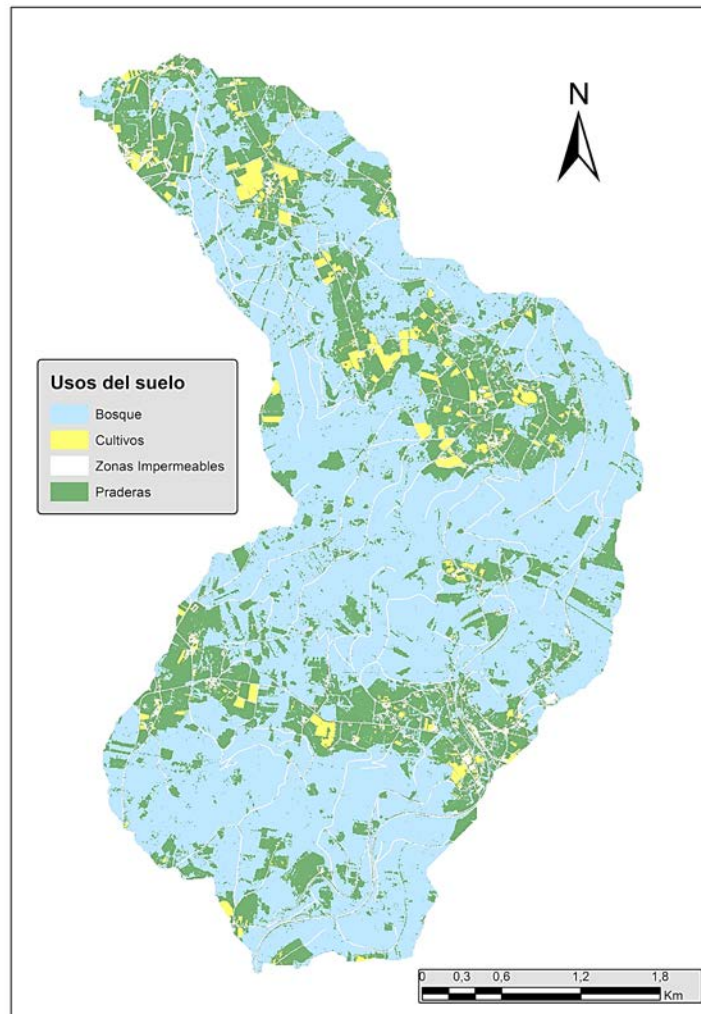


Figura 4.7. Distribución de los usos del suelo en la cuenca.

Por otra parte, hay que indicar que la cuenca del río Corbeira, al igual que la inmensa mayoría de las cuencas de ríos gallegos, presenta una densa vegetación de ribera, formada esencialmente por *Alnus glutinosa*, *Betula alba* y *Salix pp.* La vegetación de ribera ejerce un papel fundamental en el control de la erosión, como regulador de los efectos de las avenidas (dispersa y amortigua flujos y sedimentos) y como filtro verde (favorece la depuración del agua).

En lo referente a la superficie agraria útil, que representa aproximadamente el 30% de la superficie total del área de estudio, destaca de forma clara la superficie destinada a prados y praderas naturales (83% de SAU), situándose estas últimas en áreas más o menos húmedas, principalmente en las zonas de inundación. Las agrupaciones vegetales en estos prados y praderas son exclusivamente herbáceas, bien como resultado de la siembra o bien como vegetación espontánea, y se encuentran dirigidas a la producción de forraje para el consumo en verde, seco o ensilado. Los terrenos de cultivo comprenden el 3.8% de la superficie de la cuenca y se encuentran esencialmente destinados a cultivos forrajeros como el maíz y a cereal de invierno. Otros cultivos como las patatas, los nabos, las hortalizas o los frutales quedan relegados a pequeñas huertas familiares orientadas al autoconsumo.

Las zonas impermeables suponen un 4.8% del área de estudio y están representadas esencialmente por las infraestructuras viarias (carreteras y caminos forestales), que se distribuyen por toda la cuenca cruzando el cauce principal y sus afluentes en numerosos puntos.

El conocimiento de la *distribución* de los usos del suelo es tan importante como disponer del porcentaje de usos, pues de ella dependerá, entre otros aspectos, la ubicación de las potenciales áreas fuente de escorrentía, sedimento y nutrientes, su conectividad con el arroyo, el punto de descarga en el río, así como el momento en que éstos materiales alcanzan la estación de muestreo (Steege et al., 2001; Jordan-Meille y Dorioz, 2004; Monaghan et al., 2007; Deasy et al., 2008; Rodríguez-Blanco, 2013a).

En la cuenca, los densos bosques de eucaliptos y pinos ocupan zonas de pendientes escarpadas, por lo que los procesos de escorrentía y erosión mostrarán probablemente menor intensidad de lo que cabría esperar con otro uso del suelo, excepto en épocas de reforestación, donde las labores de corta y preparación del terreno para las nuevas plantaciones dejan la superficie del suelo al descubierto y por tanto con gran riesgo de erosión y de aporte de sedimentos al cauce fluvial, especialmente en las áreas en las que dichas plantaciones alcanzan la orilla del río, que es lo habitual.

En cuanto a la situación de las zonas agrícolas, se pueden diferenciar dos áreas bien diferenciadas (figura 4.7), una se encuentra ubicada en la parte alta de la cuenca, donde las pendientes son moderadamente escarpadas, con algunos terrenos de cultivo cercanos a la red de drenaje y la mayor carga ganadera del área de estudio, lo que entraña un gran riesgo de erosión y de arrastre de sedimentos y otros compuestos al río. En la otra zona, localizada en la margen derecha del río, en la parte media-baja de la cuenca, se lleva a cabo la actividad agrícola más extensiva de la cuenca y es en ella donde se hallan las mayores extensiones de terrenos de cultivo, algunos con buena conectividad con la red de drenaje.

Otra característica del uso del suelo de la cuenca del río Corbeira es el mosaico que muestran las áreas agrícolas, encontrándose la mayoría de los terrenos de cultivo bordeados por praderas e incluso, en algunos casos, por pequeños muros de piedra, característico del minifundismo de Galicia. Es evidente que esto dificulta la conectividad de los terrenos de cultivo con la red de drenaje, lo que se traduce en una disminución del potencial efecto contaminante en las aguas superficiales.

Por último, las zonas impermeables, aunque con escasa representación en esta cuenca juegan un importante papel en la generación de escorrentía superficial y además pueden suponer un excelente nexo de unión entre las áreas productoras de sedimentos y nutrientes, por ejemplo entre las parcelas de cultivo y los cauces de agua, tal como señalaron Gruszowski et al. (2003) y Sheridan et al. (2007) en cuencas rurales y forestales.

En la figura 4.8 se ilustran diversos aspectos de la cuenca que han sido comentados en las líneas anteriores.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 4.8. Aspectos generales de la cuenca.

- a) Terreno forestal en ladera con pendiente acusada incluyendo reforestación con eucaliptos.
- b) Mosaico de terrenos de cultivo (con laboreo en dirección de la pendiente) con praderas y monte.
- c) Suelo profundo de perfil ABC con repoblación de eucaliptos.
- d) Escorrentía acumulada en las rodadas de un camino forestal.
- e) Superficie impermeable (pista) con escorrentía superficial.
- f) Cauce principal del río (con abundante vegetación de ribera) durante un episodio de escorrentía

4.6. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

El área de estudio exhibe las típicas características climáticas de la España húmeda, es decir, inviernos suaves, veranos frescos, moderadas temperaturas, humedad y nubosidad abundante, así como precipitaciones frecuentes.

En cuanto a las precipitaciones, el valor medio para la serie 1983-2010 alcanza un valor de 1073 mm. Las lluvias se producen a lo largo de todo el año, si bien se concentran en los meses de otoño e invierno, siendo octubre, noviembre y diciembre los meses más lluviosos y julio y agosto los más secos (figura 4.9). En general, se trata de precipitaciones de larga duración que provocan elevado volumen de lluvia pero que no suelen alcanzar alta intensidad, aunque ésta puede variar sustancialmente en función del tipo de frente al que se encuentren asociadas.

Estudios efectuados en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Galicia (Gómez Viñas et al., 1996) han señalado que las precipitaciones de origen ciclónico, es decir, aquellas asociadas a las superficies de contacto entre las masas de aire de temperatura y humedad diferentes, son las responsables del 85-90% de las precipitaciones que se registran en Galicia, fundamentalmente entre los meses de octubre y marzo. Las precipitaciones de origen convectivo, precipitaciones causadas por el calentamiento de aire próximo al suelo que asciende y se enfría adiabáticamente produciéndose la condensación, no superan el 10% de la precipitación total. Las precipitaciones puramente orográficas, es decir, aquellas ocasionadas por el ascenso de una masa de aire forzado por una barrera montañosa, son poco significativas dado que las montañas gallegas no son suficientemente elevadas. Por último, las precipitaciones debidas a la mezcla turbulenta, conocidas con el nombre de orvallo, muy características del noroeste de Galicia, no resultan significativas (5%), siendo las responsables de la existencia de multitud de días con lluvia débil y uniforme (constituida exclusivamente por pequeñas gotas de lluvia que caen con baja velocidad y muy próximas unas a otras) que poco a poco humedece el suelo.

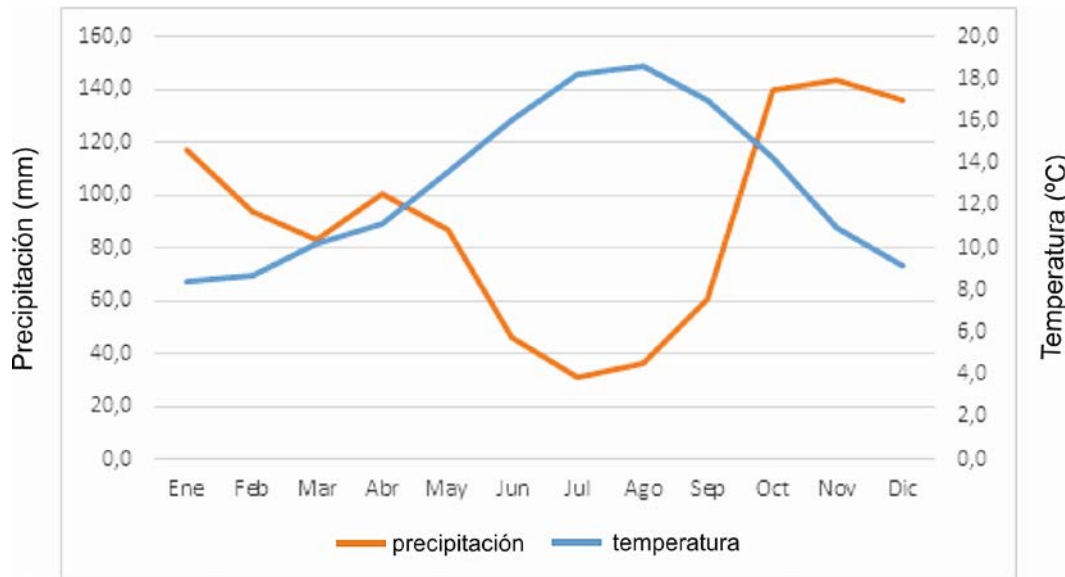


Figura 4.9. Diagrama climático para la serie 1983-2010.

La temperatura del área de estudio para la serie 1983-2010 se caracteriza por su suavidad, con una media anual de 13 °C y una amplitud térmica de 10 °C. En lo que respecta a la evolución mensual de las temperaturas a lo largo del año (figura 4.9), los valores más elevados se obtienen en el mes de julio (18.6 °C) mientras los más bajos en enero (8.4 °C), al igual que sucede en la mayor parte del hemisferio norte.

MATERIAL Y MÉTODOS

5. MATERIAL Y MÉTODOS

En esta sección se describe el proceso de obtención de datos para aplicar el modelo SWAT en la cuenca del río Corbeira así como la metodología utilizada para predecir los posibles impactos del cambio climático

El periodo de obtención de datos en la cuenca comprende desde octubre de 2005 a septiembre de 2010. El desarrollo del estudio se ajustó al diagrama de flujo que se presenta en la figura 5.1. En base a ello se estructura este capítulo en cuatro bloques:

- El primero comprende la fase cartográfica, en la cual se describe el proceso de generación de mapas matriciales para cada una de las variables que intervienen en la delimitación de las URHs en el SWAT, así como el modo de obtención de los parámetros referentes a las características fisiográficas, propiedades físico-químicas de los suelos, vegetación y prácticas de manejo.
- En el segundo se describe sucintamente la obtención de datos climáticos y de caudal, así como los protocolos de muestreo de aguas y de análisis de sedimentos y nitratos, encaminados a la determinación de la carga de ambos compuestos.
- El tercero se centra en describir los métodos usados en la evaluación del modelo (calibración y validación).
- El cuarto se dedica a la elaboración de escenarios de cambio y a describir el procedimiento utilizado en la simulación del cambio climático.

En este trabajo los términos producción de agua y descarga de agua se utilizan indistintamente para expresar el flujo de agua en el río (mm). Los términos producción y carga de sedimentos, así como producción y carga de nitratos se utilizan indistintamente para expresar la masa de sedimentos o nitratos que sale de la cuenca. El término exportación de sedimentos y exportación de nitratos se refiere a la cantidad de sedimentos o nitratos que sale de la cuenca por unidad de superficie.

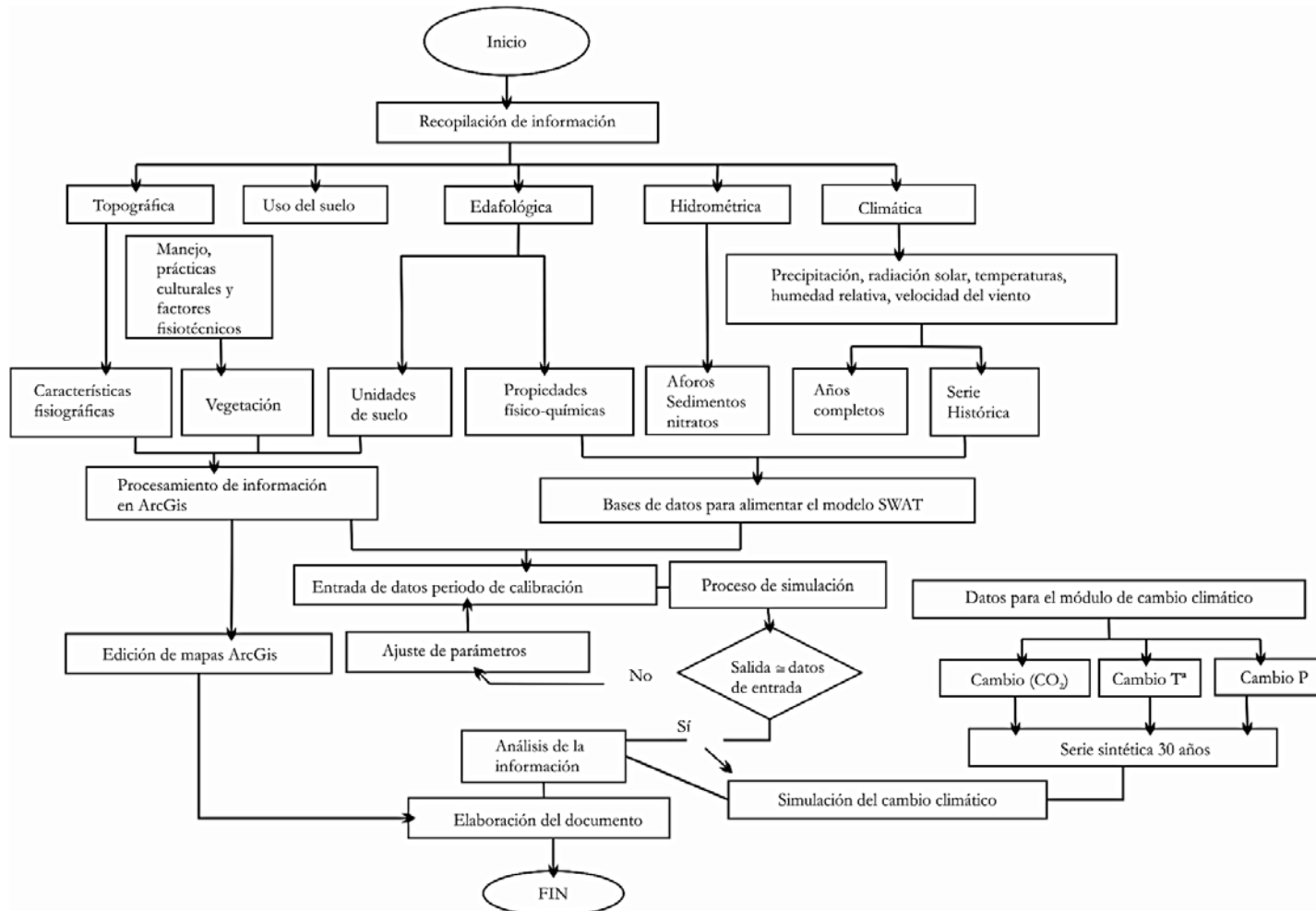


Figura 5.1. Diagrama de flujo metodológico para el SWAT.

5.1. ELABORACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA DE LA CUENCA

5.1.1. MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL

El Modelo de Elevación Digital (MED) es el elemento base a partir del cual se generan todos los demás. Con el MED, mapa de suelos y mapa de usos del suelo se generan las URHs. Un MED se puede representar, principalmente, mediante dos modelos de estructuras de datos: un modelo raster (matriz de alturas) o un modelo vectorial, de contornos, de perfiles o de triángulos TIN (red de triángulos irregulares). Ambos están basados en el empleo de puntos para la representación de la información que constituye el MED. El formato raster, es el más adecuado para la integración de las elevaciones en un SIG ya que permite la utilización de las diversas herramientas del programa para la obtención de nuevos mapas.

El MED se generó a partir de las curvas de nivel del mapa topográfico digital de la zona a escala 1:5.000, proporcionado por la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la UDC. El proceso fue seguido de un intenso trabajo de verificación, utilizando el software de diseño Autocad, revisando lecturas erróneas y eliminando discontinuidades y faltas de concordancia entre datos. Este trabajo concluyó con la obtención de 35 archivos de datos en formato Autocad (.dwg).

A partir de la cartografía digitalizada, en formato de Autocad, del área de estudio, se construyeron los siguientes archivos shape (.shp): tres archivos de polilíneas con las curvas de nivel, perfil de las corrientes principales y viales, un archivo de puntos con los puntos de cota y un archivo de polígonos con las edificaciones. Empleando herramientas SIG, en concreto ESRI ARCGIS ArcInfo 9.3 y sus extensiones, fundamentalmente, 3D Analyst y herramientas de conversión, se creó a partir de los archivos de puntos y polilíneas un raster con celda de 65.38 m que constituye el modelo de elevación. También se calcularon los parámetros morfométricos básicos, puntuales y lineales, junto con el área de la cuenca, pendientes y red de drenaje, además de desplegar en cada caso las

representaciones correspondientes. La figura 4.2 muestra un MED en formato TIN construido a partir de este raster.

5.1.2. MAPA DE SUELOS Y PROPIEDADES

Para la representación cartográfica de los tipos de suelos de la cuenca (figura 4.6) se han utilizado las hojas 45 (Betanzos), 46 (Oza dos Ríos) y 70 (Órdenes) del mapa de suelos a escala 1:50.000, elaborado por Calvo de Anta y Macías (2002, 2005) siguiendo el esquema FAO (1998), y publicado por la Consellería de Medio Ambiente de la Xunta de Galicia. Se obtuvieron 7 unidades cartográficas de suelos (figura 4.6) que de acuerdo con la clasificación FAO (2006) se engloban en Umbrisoles, Cambisoles y Fluvisoles.

Para cada tipo de suelo, el modelo requiere datos de propiedades físicas y químicas de cada horizonte (contenido de materia orgánica, porcentajes de arena, limo y arcilla, densidad aparente, conductividad hidráulica, capacidad de agua disponible, etc.). Estos datos se obtuvieron de los estudios previos efectuados en la cuenca (Rodríguez-Blanco, 2009) y en zonas limítrofes del área de los Esquistos de Órdenes (Calvo de Anta et al., 1992; Taboada-Castro et al., 1999) o mediante el uso de funciones de pedotransferencia (Rawls et al., 1982; Saxton et al., 1986; Martínez-Cortizas et al., 1994; Ferrer-Julà et al., 2004).

5.1.3. MAPA DE USOS DEL SUELO Y PRÁCTICAS DE MANEJO

El mapa de usos del suelo (figura 4.7) se ha obtenido a partir del procesamiento digital con el software ERMapper de imágenes de satélite Landsat y Landsat-SPOT y fotografías aéreas (vuelo del año 2004), proporcionadas por la Xunta de Galicia (Sistema de Información Territorial de Galicia) con una resolución de 10 m y su posterior validación en campo.

El objetivo del *procesamiento de imágenes* aplicado a las ciencias de la tierra es el de realzar los datos geográficos en un formato digital para hacerlos más

significativos para el usuario, extraer información cuantitativa y resolver problemas. Una imagen digital es almacenada como un arreglo bidimensional (retícula) de pequeñas áreas llamadas píxeles, cada uno de los cuales corresponde espacialmente a un área de la superficie terrestre. Este arreglo o retícula es también llamado *raster* a consecuencia de lo cual los datos de imágenes son a menudo llamados datos raster. El dato raster está ordenado en filas horizontales denominadas *líneas* y columnas verticales llamadas *muestras*. Cada pixel en la imagen raster está representado por un *número digital* o (ND). Esta imagen de ND's puede representar diferentes tipos de datos dependiendo de la fuente. Para datos satelitales como los procedentes de LANDSAT y SPOT, los ND's representan la intensidad de energía reflejada en longitudes de onda visible, infrarroja y otras. Aplicando transformaciones matemáticas, algoritmos, a los números digitales, determinados programas como ERMapper, pueden resaltar datos de la imagen y extraer información sutil que sería imposible obtener utilizando técnicas tradicionales de interpretación manual.

El uso de este software permitió la clasificación del territorio, es decir, se agruparon estadísticamente valores de datos de imagen en categorías temáticas o clases de rasgos distintivos para obtener superficies de cultivo, praderas, bosque y superficies improductivas (figura 4.7). Las representaciones raster de estos tipos de cubierta se convirtieron posteriormente a polígonos vectoriales para exportar a sistemas SIG

Los valores de los parámetros característicos de la vegetación se han extraído de la base de datos del SWAT, excepto los referentes a las masas de eucalipto, que se obtuvieron de la bibliografía (por ejemplo, Nunes et al., 2008; Rodríguez-Suárez et al., 2010). Las plantaciones forestales y praderas se encontraban en fase de crecimiento antes de iniciar la simulación. Por ese motivo, los valores iniciales del índice de área foliar (LAI_INIT) y peso seco de biomasa inicial (BIO_INIT) se ajustaron en base a datos bibliográficos (Darvishzadeh et al., 2008; Rodríguez-Suárez et al., 2010). También se ajustó el coeficiente de rugosidad de Manning (OV_N) y el almacenamiento máximo de agua en el dosel (CANMX). Los valores del coeficiente de Manning se derivaron del manual del SWAT (Neitsch

et al., 2005), mientras que los valores de interceptación de la cobertura vegetal se obtuvieron de Alves et al. (2001) y Crawford y Linsley (1996).

El modelo simula el crecimiento vegetal en base a unidades de calor. Sin embargo, en este estudio esta opción se cambió por la de calendario, por lo que fue necesario introducir fechas de siembra, fertilización y cosecha. Dicha información se ha obtenido mediante investigación de campo y entrevistas a los agricultores de la cuenca.

5.1.4. DELIMITACIÓN DE URHS

Como se ha indicado anteriormente cada URH, es una combinación única de uso y tipo de suelo en la cuenca, a cuya escala se modelan los procesos del paisaje. El modelo considera cada URH homogénea, dotada con procesos similares en cuanto a crecimiento de la vegetación, generación de escorrentía y erosión del suelo.

En este estudio se han superpuesto las capas de uso de suelo (figura 4.7),



tipo de suelo (figura 4.6) y pendientes (figura 4.3) para crear las diferentes URHs. Para hacer manejable su número, se ha utilizado un umbral de operación del 3% para el uso del suelo, del 20 % para el tipo de suelo y se han empleado tres clases de pendiente, 0-13%, 13-25% y >25%, reduciendo el número de URHs a 12 (figura 5.2)

Figura 5.2. Unidades de respuesta hidrológica

5.2. DATOS HIDROMETEOROLÓGICOS, PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS Y NITRATOS

5.2.1. DATOS METEOROLÓGICOS

Para llevar a cabo la calibración y validación del modelo se emplearon valores diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento. Estas variables se tomaron de la estación meteorológica de Mabegondo, perteneciente a la Consellería de Medio Ambiente, Territorio e Infraestructuras ya que se trata de la estación más próxima a la zona de estudio y está situada en una posición geográfica comparable a la de la cuenca. De esta estación también se ha obtenido la serie de precipitación y temperaturas desde 1983 hasta 2010, a partir de la cual se efectuó la caracterización climática de la cuenca.

Debido a la reducida longitud de las series de datos de velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar de la estación de Mabegondo, para la obtención del generador climático se utilizaron datos de la estación de Alvedro (perteneciente a la Agencia Estatal de Meteorología), la cual se encuentra a 20 km del área de estudio y dispone de datos desde 1974, aunque para la elaboración del generador solo se utilizaron los datos referidos al periodo 1981-2010 (periodo de referencia), los cuales guardan buena correspondencia con los datos climáticos de la estación de Mabegondo. Los parámetros necesarios para la creación del generador climático se especifican en la tabla 6.1.

Para las simulaciones de cambio climático se consideraron las proyecciones de los campos de temperatura y precipitación obtenidas por los modelos del proyecto ENSEMBLES (Hewitt y Griggs, 2004) para la estación de Alvedro.

Entre los tres métodos incorporados en el SWAT para el cálculo de la evapotranspiración potencial de referencia, se eligió la ecuación Penman-Monteith (Allen et al., 1989), por ser el que usa un mayor número de parámetros

físicos (radiación, temperatura del aire, humedad del aire y velocidad del viento).

La fórmula propuesta por Penman-Monteith es la siguiente:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (5.1)$$

Donde: λET es el flujo de calor latente ($\text{MJ}/\text{m}^2\text{día}$), ET es tasa de evapotranspiración ($\text{mm}/\text{día}$), Δ representa la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$), R_n es la radiación neta ($\text{MJ}/\text{m}^2\text{día}$), G es el flujo de calor en el suelo ($\text{MJ}/\text{m}^2\text{día}$), ρ_a es la densidad media del aire a presión constante (kg/m^3), c_p es el calor específico del aire ($\text{MJ}/\text{kg } ^\circ\text{C}$), $(e_s - e_a)$ representa el déficit de presión de vapor del aire (kPa), γ es la constant psicrométrica ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$) y r_s y r_a son las resistencias superficial (total) y aerodinámica (s/m).

5.2.2. DATOS DE CAUDAL Y SEPARACIÓN DE FLUJOS

Para la obtención de los datos de caudal del río Corbeira, se ha instalado en el cierre de la cuenca una estación de aforo con sección fluvial natural, dotada con un sensor de presión modelo ISCO 720 acoplado a un muestreador automático modelo 6720 de la misma marca (figura 5.3).



Figura 5.3. Estación de aforo. a) Situación del sensor de presión. b) Muestreador automático modelo ISCO 6720.

El sensor mide en continuo el nivel de la lámina agua proporcionando datos cada 10 minutos. La estación de aforo cuenta también con una escala fija, que permite advertir posibles errores en las mediciones del sensor. Los datos de nivel se transformaron en caudal a partir de una curva de gasto (relación nivel-caudal). Para la obtención de la curva de gasto se efectuaron aforos bajo amplias condiciones de nivel. El caudal para establecer la curva de gasto se determinó por el método del área-velocidad, por ser el procedimiento recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1980a), que consistió en medir la velocidad de la lámina de agua (con molinete) a distintas profundidades y en diferentes puntos de la sección del río establecida a tal efecto (cierre de la cuenca). Una vez conocido el caudal se procedió a definir la relación nivel-caudal que tiene como fundamento la siguiente ecuación.

$$Q = K * (H - H_0)^n \quad (5.2)$$

Donde Q es el caudal en m^3/s , H_0 la altura de la escala hidrométrica a la cual $Q=0$, H es la altura de la escala hidrométrica para el caudal que se quiere conocer y n y K son constantes propias de la expresión analítica.

El valor de las constantes n y K ha sido obtenido a partir de los pares de datos nivel-caudal, en tanto que el valor de H_0 fue determinado por el método del tanteo propuesto por la WMO (1980b), que consiste en optimizar la ecuación con distintos valores de H_0 . La ecuación resultante, que va a definir el caudal en la estación de aforo de la cuenca H_0 del río Corbeira, se muestra a continuación:

$$Q = 1,185 * (H - 0,1)^{1,083} \quad (5.3)$$

Haciendo uso de la curva de gasto se convirtieron los datos de nivel en caudal, lo que permite disponer de datos de caudal diezminutales.

La representación gráfica del caudal respecto al tiempo se conoce como *hidrograma* y su análisis ayuda a interpretar el comportamiento hidrológico de una cuenca. Para *separar el flujo base del flujo total* dentro del hidrograma se ha utilizado la técnica del filtro digital (Arnold et al., 1995), cuya ecuación es como sigue:

$$q_t = \beta q_{t-1} + (1 + \beta) / 2 * (Q_t - Q_{t-1}) \quad (5.4)$$

Donde, q_t es la esorrentía directa filtrada en el tiempo t (m^3/s); q_{t-1} es la esorrentía directa en el tiempo $t-1$ (m^3/s); β es un parámetro del filtro; Q_t es caudal total en el tiempo t (m^3/s); y Q_{t-1} es el caudal total en el tiempo $t-1$ (m^3/s).

El flujo base, b_t , se calcula mediante la ecuación:

$$b_t = Q_t - q_t \quad (5.5)$$

5.2.3. CARGAS DE SEDIMENTOS Y NITRATOS

Como paso previo a la determinación de las cargas de sedimentos y de nitratos en el río se procedió a la toma de muestras de agua en la salida de la cuenca seguido de su análisis en el laboratorio, tal como se detalla a continuación.

5.2.3.1. MUESTREO DE AGUAS

A lo largo de los años hidrológicos (2005/06-2009/10) se efectuaron muestreos del agua del río en el cierre de la cuenca, tanto en condiciones de flujo base como durante episodios de esorrentía, con el fin de determinar las cargas de sólidos en suspensión y de nitratos.

Durante dicho periodo se han recogido muestras, manualmente, con intervalos de muestreo de 10 y 15 días, y de modo más intensivo durante episodios de esorrentía, para lo cual se hizo uso del muestreador automático, modelo ISCO 6712, con capacidad para el almacenamiento de 24 botellas de polietileno de 1 litro (figura 5.3). Se ha procurado seguir adecuadamente la evolución temporal de los eventos de esorrentía, de modo que fuera posible contar en todos ellos con muestras del ascenso, el pico y el descenso del caudal, lo cual requirió programaciones periódicas del muestreador, que se realizaron en virtud de las previsiones meteorológicas locales.

5.2.3.2. ANÁLISIS DE SEDIMENTOS Y NITRATOS

Sobre la totalidad de las muestras recogidas se han analizado un elevado número de parámetros. No obstante, en este trabajo sólo se han utilizado las determinaciones de sólidos en suspensión y nitratos.

Los nitratos se ha determinado mediante electroforesis capilar y los sólidos en suspensión se han obtenido mediante el método 2540-b del Standard Methods (APHA, 1998), siguiendo un procedimiento gravimétrico, que consiste en hacer pasar 100 ml de muestra adecuadamente homogeneizada a través de un filtro de 0,45 μm previamente lavado y seco. El residuo retenido se seca a 105 $^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas hasta peso constante. Para asegurar la constancia de peso de los filtros se llevan una hora más a la estufa y se pesan de nuevo, repitiendo este procedimiento tantas veces como sea necesario. El aumento del peso del filtro representa la concentración de sólidos en suspensión.

5.2.3.3. CÁLCULO DE LA CARGA

La carga de sedimentos y de nitratos se ha calculado multiplicando la descarga acumulada entre cada par de muestras consecutivas por la concentración resultante de promediar las concentraciones instantáneas de ambas muestras, según la siguiente expresión:

$$Carga = \sum_{i=1}^n AQ_i (C_{i-1} + C_i) / 2 \quad (5.6)$$

Donde AQ_i es la descarga acumulada desde la última muestra que se ha tomado, C_i es la concentración instantánea, y n es el número de muestras.

5.3. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL MODELO

5.3.1. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se denomina análisis de sensibilidad al procedimiento seguido para evaluar “la tasa de cambio en las salidas de un modelo con respecto a los cambios en las

entradas del modelo” (Moriassi et al., 2007). Dicho de otra manera, el análisis de sensibilidad identifica a aquellos parámetros incluidos en la formulación del modelo que tienen una influencia significativa en los resultados de las simulaciones con respecto a las observaciones reales.

El análisis de sensibilidad de los parámetros es fundamental para obtener una respuesta a cuestiones como:

- Dónde focalizar los esfuerzos en la recogida de datos.
- Cuál es el grado de precisión que se debe alcanzar en la estimación de los parámetros.
- Cuál es la importancia relativa de los diversos parámetros.

Para el análisis de sensibilidad se aplicó el módulo que para tal efecto tiene el modelo SWAT, en el que se combina un muestreo basado en el método del “Latin Hypercube” (van Griensven, 2006), que a diferencia del método de Monte-Carlo convencional realiza un muestreo estratificado entre el rango de posibles valores de cada parámetro, y la simulación OAT (One-factor-At-a-Time) (van Griensven, 2006), que asegura que los cambios en la salida de cada simulación del modelo puedan ser atribuidos, de modo inequívoco, a los cambios realizados en la variable de entrada en cada simulación (van Griensven, 2006). El Latin Hypercube selecciona para cada parámetro, valores representativos que se analizan uno a uno, mediante simulaciones sucesivas del modelo, determinando su grado de sensibilidad.

La herramienta de análisis de sensibilidad en ArcSWAT tiene la capacidad de llevar a cabo dos tipos de análisis. El primero, utiliza sólo los datos modelados para identificar el impacto de los parámetros. El segundo, emplea los datos medidos para proporcionar una estimación entre las series medidas y modeladas.

El primer análisis puede ayudar a identificar los parámetros que mejoran un proceso particular o característico del modelo, mientras que el segundo identifica los parámetros que están afectados por las características de la cuenca de estudio y aquellos a los que el modelo es más sensible (Veith y Ghebremichael, 2009).

5.3.2. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

Los modelos paramétricos contienen parámetros específicos de las cuencas que deben ser calibrados. La calibración de un modelo tiene por objeto determinar que parámetros de entrada necesitan ser ajustados para obtener mejores resultados.

La calibración sólo se puede realizar si se dispone de datos medidos. Todos los métodos de calibración tienen en común que tratan de ajustar los valores simulados con los medidos mediante el cambio de valores en los parámetros de entrada, utilizando métodos de prueba/error o métodos de calibración automáticos.

La calibración de un modelo como el SWAT consiste en realizar un test de los parámetros de salida (caudal, sedimentos, nutrientes, etc.) comparando los resultados simulados con los observados.

En este trabajo, el ajuste de parámetros se realizó de acuerdo con lo propuesto en el manual del programa SWAT, el cual señala los parámetros de entrada que afectan de forma significativa a las salidas del modelo. En muchos casos, el ajuste entre los parámetros observados y simulados, obtenidos durante la validación, es menos satisfactorio que el obtenido en la calibración, pero es más representativo de la exactitud de las predicciones efectuadas con el modelo.

El periodo comprendido entre marzo de 2001 y octubre de 2005 se usó para la iniciación (calentamiento) del modelo, mientras que el periodo comprendido entre los años hidrológicos 2005/06-2007/08 se usó para la calibración del caudal, sedimentos y nitratos en la cuenca del Corbeira, empleando para ello los datos de caudal, sólidos en suspensión y nitratos obtenidos en la salida de la cuenca durante dicho periodo.

La capacidad de un modelo hidrológico para simular adecuadamente el caudal de un río y la producción de sedimentos y nutrientes depende en gran medida de la precisión en la calibración de los parámetros (Xu et al., 2009). Los

parámetros pueden ser ajustados manualmente o automáticamente. En este estudio la calibración se realizó manualmente, basándonos en el conocimiento de las características físicas de la cuenca, en los parámetros más sensibles señalados en la bibliografía (p.e., Bärlund et al., 2007; Xu et al., 2009) y en las técnicas de calibración indicadas en el manual del usuario del SWAT.

La calibración permite utilizar el modelo para simular cambios dentro de la cuenca. Cuando se dispone de información de muchas cuencas calibradas, se pueden regionalizar los parámetros con el fin de utilizar los modelos en cuencas sin datos.

A la calibración del modelo siguió la validación, realizada para los años hidrológicos 2008/09 y 2009/10. La elección de estos años está condicionada por la disponibilidad de datos.

La validación de los modelos consiste en ejecutar los mismos para cuencas con datos y verificar su comportamiento. La validación permite comprobar la bondad del modelo y establecer un rango de utilización. Por otra parte, la verificación de los modelos permite realizar ajustes en las metodologías utilizadas en la simulación de procesos.

5.3.3. EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE RESULTADOS

La similitud entre los resultados simulados y medidos se evaluó empleando diferentes índices estadísticos. Siguiendo las directrices estadísticas establecidas por Moriasi et al. (2007), la evaluación estadística de los resultados del modelo se llevó a cabo haciendo uso del coeficiente de determinación, del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe, y del porcentaje de desviación de los valores observados.

El *coeficiente de determinación* (R^2) es el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson y describe la proporción de varianza en los datos observados que puede ser explicada por el modelo. El R^2 varía entre 0,0 y 1,0,

indicando 1 una excelente relación entre los valores medidos y simulados. Un alto y significativo valor del coeficiente, sin embargo, no implica que el modelo esté funcionando bien, sino meramente que el modelo está produciendo resultados con un alto grado de precisión y con la tendencia correcta. A menos que los valores simulados y observados tengan una relación 1:1, las predicciones del modelo no son al cien por cien adecuadas.

Idealmente, la ecuación de regresión para la relación debería tener una pendiente de 1 y pasar por el cero. Un modelo solo puede ser tan bueno como los datos que se introduzcan en él. Si parte de los datos de entrada contienen errores del 10% o más, parece poco realista esperar que el modelo proporcione predicciones con el 5% o menos. Tampoco es razonable esperar un modelo con mejor ajuste que la variabilidad natural que se produce en hidrología y en los procesos erosivos.

El *coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS)* (Nash y Sutcliffe, 1978) es uno de los índices más frecuentemente empleado para la evaluación de modelos hidrológicos. Se calcula de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (5.7)$$

Donde O_i es el valor observado, P_i es el valor predicho (simulado) y \bar{O} es la media de todos los valores medidos.

NS varía desde valores infinitos negativos hasta 1, indicando el 1 una perfecta concordancia entre los valores simulados y observados. Generalmente, se señala que el modelo es perfecto cuando **NS** es superior a 0.75, satisfactorio cuando los valores de **NS** oscilan entre 0.36 y 0.75, e insatisfactorio cuando **NS** es menor que 0.36 (Krause et al., 2005). De todos modos, uno no debe esperar valores que excedan de 0.70, especialmente en el caso de la modelación de erosión. Dado que en este método las diferencias entre los valores observados y simulado se elevan al cuadrado, el efecto de valores bajos (p.e. flujo base) es despreciable. Además, el NS no es sensible a una sobre o subestimación

sistemática del modelo, especialmente durante periodos de flujo bajo (Krause et al., 2005).

Otro estadístico usado es la *desviación de los valores observados (BIAS)*, que indica la tendencia media de los datos simulados con respecto a los observados (Gupta et al., 1999).

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (5.8)$$

El valor óptimo de este estadístico es cero, un valor negativo es indicativo de una sobrestimación de los valores observados de caudal, mientras que un valor positivo señala subestimación.

5.4. ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

El análisis del impacto del cambio climático se centra en predecir el potencial efecto que, cambios en las concentraciones de CO₂, cambios en la temperatura, y cambios en la precipitación, ocasionarán sobre la descarga de agua, la producción de sedimentos y nitratos en la cuenca del río Corbeira.

Para ello, se efectuaron dos tipos de simulaciones. El primero analiza el efecto causado por cambios en uno de los parámetros, ya sea precipitación, temperatura o concentración de CO₂. El segundo tipo, engloba las simulaciones en las que se evalúan las modificaciones causadas por cambios simultáneos en todos los parámetros mencionados.

Para llevar a cabo esta tarea se realizaron los siguientes pasos:

- Una vez calibrado el SWAT y con el fin de representar las condiciones de control (escenario control), se ejecutó el modelo utilizando las series meteorológicas producidas por el generador climático para el periodo de referencia 1981-2010. A continuación, se verificó el grado de correspondencia entre los resultados simulados, empleando el generador climático, y los resultados simulados utilizando los datos meteorológicos observados, todo ello con la finalidad de comprobar

la utilidad del generador climático para estimar descarga de agua, producción de sedimentos y nitratos en la cuenca de estudio.

- Posteriormente, se crearon los diferentes escenarios climáticos a partir de la información proporcionada por los modelos regionales del proyecto ENSEMBLES, usando el valor de las anomalías para modificar el generador climático. Por ejemplo, si el escenario considera que la precipitación en el mes de junio para el periodo 2031-2060 será un 6% menor que la del periodo de referencia (1981-2010), la precipitación de dicho mes en el generador climático se reducirá en un 6%.
- Finalmente, se compararon los resultados de la simulación del escenario control (datos originados por el generador climático para el periodo 1981-2010) con los resultados de la simulación de los escenarios climáticos con el fin de cuantificar los cambios generados por el cambio climático en la descarga de agua y en la producción de sedimentos y nitratos.

Para generar las bases de datos estadísticos (generador climático) de los años 2031-2060 y 2069-2098 se utilizó la información climática proporcionada por los modelos del proyecto ENSEMBLES, uno de cuyos objetivos fue desarrollar un conjunto de predicciones de cambio climático para el futuro teniendo en cuenta los últimos desarrollos de modelos tanto de circulación general (GCMs) como modelos regionales (RCMs). En este trabajo sólo se consideran diferentes RCMs anidados a diferentes GCMs cuya resolución es de 25 km (tabla 5.1). Todas las ejecuciones de estos modelos se realizaron bajo el escenario A1B de cambio climático. El proyecto ENSEMBLES ha seleccionado este escenario de emisiones porque su principal objetivo consistía en proporcionar proyecciones a medio plazo (2010-2050), periodo para el que las proyecciones basadas en distintos escenarios de emisión no varían de manera crítica. El escenario A1B supone un crecimiento económico muy rápido, con una población mundial que alcanza un máximo a mediados de siglo y que después desciende, una rápida disponibilidad de tecnologías más eficientes y con menor consumo energético y además una rápida convergencia entre distintas regiones del mundo, facilitada por las mejores comunicaciones debidas a la extensión de las redes. La política energética supuesta en este escenario adopta un equilibrio entre todos los tipos de fuentes de energía, esto es, no se dependerá excesivamente de un tipo de fuente de

energía, en el supuesto de que todas las fuentes de suministro de energía y todas las tecnologías de uso final experimenten mejoras similares.

Tabla 5.1. Resumen de modelos del proyecto ENSEMBLES considerados para este estudio.

| Institución | Modelo climático | | Periodo |
|---|------------------|------------|-----------|
| | Global | Regional | |
| ETHZ (Escuela Politécnica Federal de Zurich), Suiza | HadCM3Q0 | CLM | 1951-2099 |
| DMI (Instituto Meteorológico Danés), Dinamarca | ECHAM5-r3 | DMIHIRHAM5 | 1951-2099 |
| DMI (Instituto Meteorológico Danés), Dinamarca | Arpege | DMIHIRHAM5 | 1951-2100 |
| DMI (Instituto Meteorológico Danés), Dinamarca | BCM | DMIHIRHAM5 | 1958-2096 |
| Rosby Centre (Instituto de Meteorología e Hidrología Sueco), Suecia | HadCM3Q16 | RCA3 | 1951-2099 |
| KNMI (Instituto Meteorológico Real de los Países Bajos), Países Bajos | ECHAM5-r3 | RACMO2 | 1950-2100 |
| SMHI (Instituto de Meteorología e Hidrología Sueco), Suecia | BCM | RCA | 1951-2099 |
| SMHI (Instituto de Meteorología e Hidrología Sueco), Suecia | ECHAM5-r3 | RCA | 1951-2100 |
| SMHI (Instituto de Meteorología e Hidrología Sueco), Suecia | HadCM3Q3 | RCA | 1951-2099 |
| ICTP (Centro Internacional de Física Teórica), Italia | ECHAM5-r3 | RegCM3 | 1951-2100 |
| MPIM (Instituto de Meteorología Max Planck), Alemania | ECHAM5-r3 | REMO | 1951-2100 |
| CNRM (MeteoFrancia), Francia | Arpege | RM5.1 | 1950-2100 |

A las proyecciones del ENSEMBLES se les extrajo la información de las anomalías climáticas, éstas corresponden a las variaciones del clima respecto al clima actual. Los modelos solo generan anomalías para temperatura y precipitación, por lo que la información de la velocidad del viento y temperatura del rocío del generador climático no se modificó, dejando los mismos valores en todos los escenarios. Las anomalías para la precipitación se usaron para alterar tanto la frecuencia como la intensidad de las precipitaciones, pues los cambios producidos en la cantidad de precipitación registrada en una región pueden deberse tanto al número de días lluviosos como a la cantidad de precipitación registrada en los días lluviosos. Esta modificación se realizó por ajuste de la probabilidad de un día lluvioso seguido de otro día lluvioso en el mes y de la probabilidad de un día lluvioso seguido de un día seco, variables incluidas en el generador climático. Es evidente, que según se realice la modificación de la precipitación, se van a obtener distintos resultados, es decir si se varía únicamente la intensidad o si se modifica la frecuencia de la precipitación permaneciendo la intensidad constante dará lugar a diferentes cambios hidrológicos.

Como se indicó anteriormente, se realizaron dos tipos de simulaciones. En el primer caso se evaluó el impacto de las condiciones climáticas considerando escenarios con variaciones en una sola variable (precipitación, temperatura o concentración de CO₂). Dichos escenarios se refieren a las proyecciones medias anuales de los distintos modelos del proyecto ENSEMBLES para la zona de estudio, así como a los pronósticos anuales más desfavorables. Los escenarios de cambios en la concentración de CO₂ representan incrementos de 1,5 y 2 veces la concentración de CO₂ actual. Dicha concentración se estableció en 330 ppm, por ser este el valor considerado por defecto en el modelo SWAT. Asimismo se asumió que las concentraciones de CO₂ seleccionadas (550 y 660 ppm) representan adecuadamente las condiciones futuras para mediados y finales de siglo XXI bajo el escenario A1B (figura 5.4). También se evaluó el efecto que tienen en los recursos hídricos y en la carga de sedimentos y nitratos los tres escenarios siguientes de cambio para la precipitación: cambio en la intensidad de la precipitación, cambio en la frecuencia de la precipitación (sin variar la intensidad)

y cambios a partes iguales entre los dos parámetros. El cambio en la intensidad de la precipitación se efectuó mediante la reducción de la cantidad de precipitación manteniendo el número de días de lluvia constante, mientras que la alteración de la frecuencia de las precipitaciones se simuló reduciendo tanto la cantidad de precipitación como el número de días de lluvias en una cantidad proporcional.

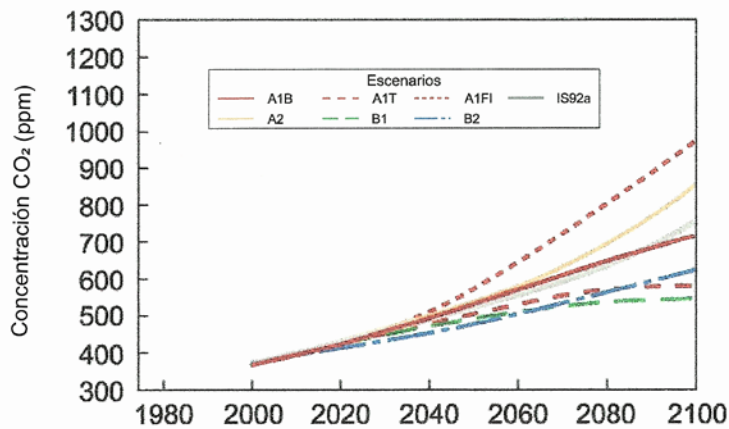


Figura 5.4. Evolución de la concentración de CO₂ a lo largo del siglo XXI según distintos escenarios (Houghton et al. 2001).

En el segundo tipo de simulaciones, se evaluó el impacto de los cambios mensuales medios y máximos proyectados para los parámetros climáticos (temperatura y precipitación) por los modelos del proyecto ENSEMBLES.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. COMPORTAMIENTO CLIMÁTICO

Como se ha indicado anteriormente, el SWAT requiere datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento. En este apartado se describe el comportamiento de las principales variables climáticas del periodo de simulación (2005/06-209/10), en el que los tres primeros años se utilizaron para la calibración y los dos últimos para la validación.

6.1.1. PRECIPITACIÓN

La precipitación es la variable climática de entrada más importante para el modelo pues es imprescindible para el módulo hidrológico que es el que predice el comportamiento hidrológico, y a su vez, este módulo sirve de sustento para todos los demás, por lo que es evidente que la precipitación juega un papel destacado en el resto de módulos como por ejemplo en el de sedimentos y en el de nutrientes.

La figura 6.1 muestra la serie de precipitaciones anuales para el periodo 1983/84-2009/10 junto con la precipitación media anual, que es de 1073 mm. Se observa que existe una elevada variabilidad interanual de las precipitaciones, perceptible también durante los cinco años de aplicación del SWAT (2005/06-2009/10), en los que osciló entre 1054,8 mm del año 2007/08 y 1397,2 mm del año 2006/07, alcanzando un valor medio de 1244,3 mm.

Esta variabilidad permite realizar la calibración del SWAT (2005/06-2007/08) usando un año seco (2007/08), un año húmedo (2006/07) y un año medio, es decir una amplia gama de eventos hidrológicos (Gan et al., 1997), lo que posibilita activar todos los procesos constitutivos del modelo y, en consecuencia,

obtener una calibración más ajustada a las condiciones propias del área de estudio.

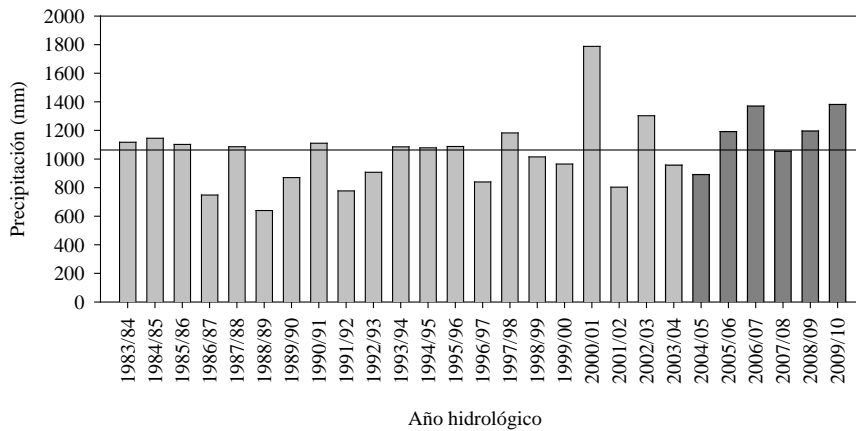


Figura 6.1. Evolución temporal de las precipitaciones anuales en el área de estudio. La línea horizontal representa el valor medio de la serie. El color más oscuro señala el periodo de estudio.

En lo que se refiere a la distribución estacional de las precipitaciones durante el periodo 1983/84-2009/10, las precipitaciones más abundantes se registraron en otoño (octubre, noviembre y diciembre), totalizando una media de 413 mm, el equivalente al 39% de la precipitación media anual (figura 6.2). La estación más seca corresponde al verano (julio, agosto y septiembre) con un valor medio de 126,5 mm, representando el 12% de la precipitación media anual. También se observó una distribución estacional similar tanto para el periodo de calibración como para el de validación del modelo (figura 6.2), a pesar de existir, como se mencionó anteriormente, diferencias interanuales en cuanto a precipitación.

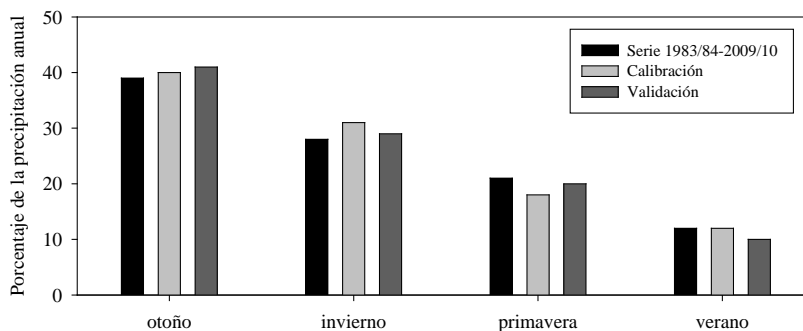


Figura 6.2. Distribución estacional de la precipitación para toda la serie de datos y para el periodo de calibración y validación.

6.1.2. TEMPERATURA

La temperatura tiene una especial relevancia en un número elevado de procesos físicos, químicos y biológicos. La producción vegetal es enormemente dependiente de la temperatura, como también lo es la descomposición de la materia orgánica y la mineralización.

La temperatura media anual de la cuenca es de 13 °C, con una oscilación térmica para el periodo de referencia (1983/84-2009/10) comprendida entre 8,8 y 14,4 °C. Las temperaturas medias más bajas ocurren durante los meses de invierno y las más altas en los de verano (figura 6.3). El periodo de simulación presentó el mismo patrón mensual, siendo diciembre (8,2 °C) el mes más frío durante el periodo de calibración y febrero (7,7 °C) durante el de validación. Por el contrario, las temperaturas medias más altas del periodo de calibración se obtuvieron en julio (18,7 °C), en tanto que en el de validación coincidieron con agosto (18,9 °C). Durante el periodo de simulación las temperaturas medias diarias oscilaron entre 1,3 °C de la época invernal y 27 °C de la época estival. Las temperaturas llegaron a alcanzar valores máximos próximos a los 36 °C y mínimos del orden de -4 °C.

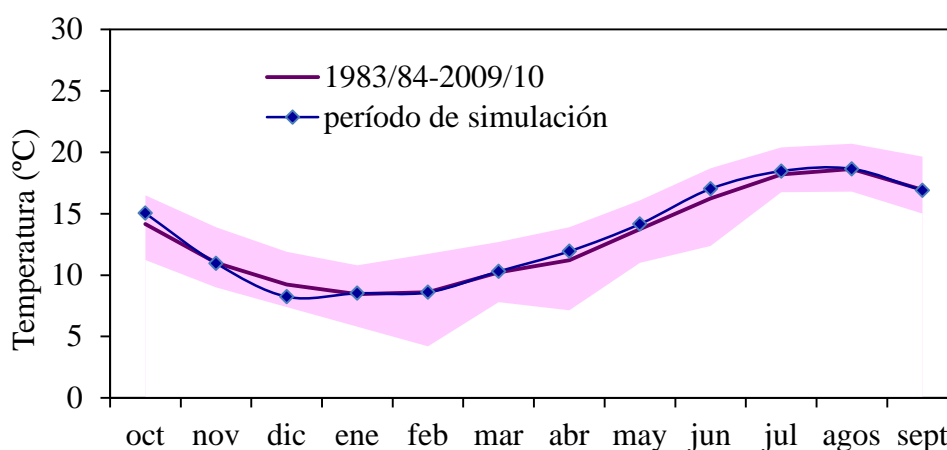


Figura 6.3. Patrón estacional de la temperatura del aire en el área de estudio.

La banda sombreada muestra la oscilación térmica mensual de la serie de datos (1983/84-2009/10).

6.1.3. RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar ejerce un importante control en el movimiento del agua durante la fase terrestre del ciclo hidrológico, pues aporta la energía necesaria para la evapotranspiración.

La radiación global diaria media es inferior a 15 MJ/m^2 . Mensualmente, la radiación solar sigue un patrón similar al de la temperatura. Los máximos se alcanzan en junio y julio, con más de 20 MJ/m^2 , mientras que los mínimos se concentran en los meses de diciembre y enero, con valores del orden de 5 MJ/m^2 día (figura 6.4).

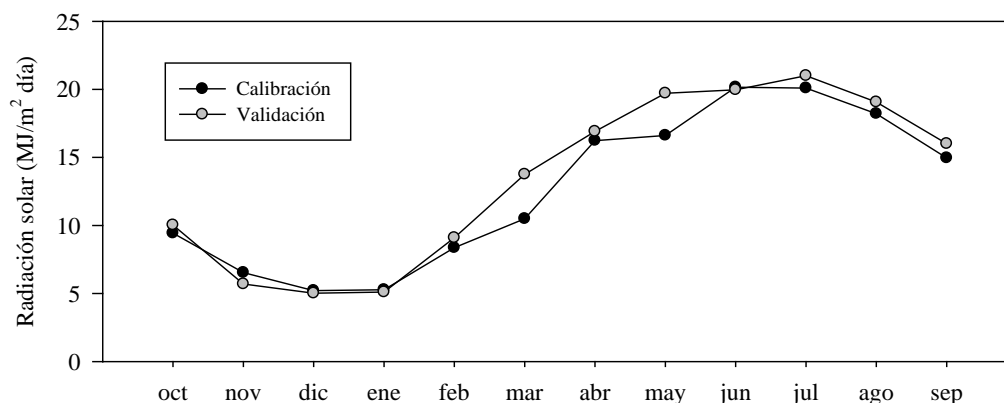


Figura 6.4. Radiación diaria media mensual en el área de estudio para el periodo de calibración y validación.

6.1.4. VELOCIDAD DEL VIENTO

El modelo SWAT sólo requiere datos de velocidad del viento cuando se emplea la ecuación de Penman-Monteith en la estimación de la evapotranspiración potencial y de la transpiración. Éste ha sido el método empleado en este trabajo para el cálculo de la evapotranspiración, y por ello se muestran los datos referidos a la velocidad del viento.

La velocidad del viento no presentó acusadas diferencias durante el periodo de simulación, oscilando los valores medios mensuales entre $1,4$ y $2,8 \text{ m/s}$

en el periodo de calibración y entre 1,5 y 2,5 m/s en el periodo de validación. En general, los mayores valores medios se registraron durante los meses de invierno, mientras que los menores se obtuvieron en la estación estival o al inicio del otoño (figura 6.5).

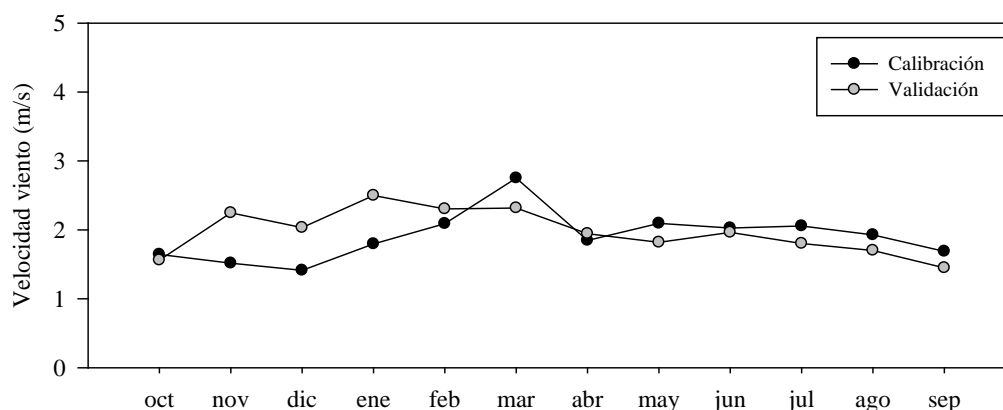


Figura 6.5. Velocidad del viento media mensual en el área de estudio durante el periodo de calibración y validación.

6.1.5. HUMEDAD RELATIVA

El modelo SWAT emplea la humedad relativa en la estimación de la evapotranspiración potencial y la transpiración por medio de la ecuación de Penman-Monteith.

El área de estudio presenta una humedad relativa media anual del 83% durante el periodo de simulación. En relación con el comportamiento estacional, se verificó que, tanto en el periodo de calibración como en el de validación, los mayores valores se obtuvieron en otoño, mientras que los menores se registraron en verano (figura 6.6). Esto guarda relación con el comportamiento de la precipitación y temperatura en el área de estudio. Así mismo, se pudo comprobar que los valores resultan ligeramente inferiores en el periodo de validación que en el de calibración.

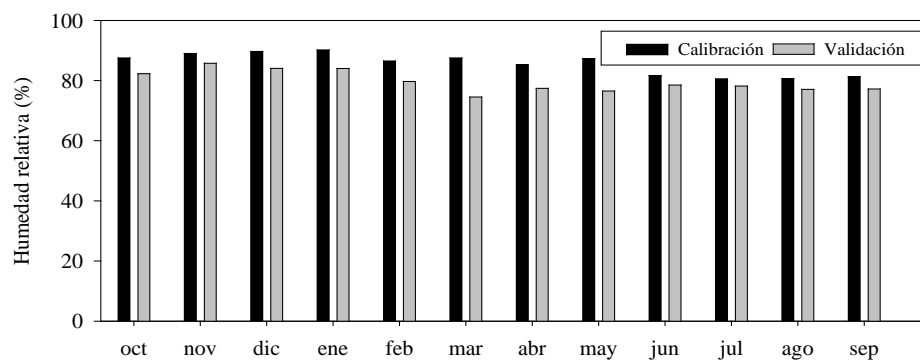


Figura 6.6. Humedad relativa media mensual en el área de estudio durante el periodo de calibración y validación.

Además de los archivos de datos con los valores diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa del aire de la cuenca, el modelo requiere una serie larga de datos climáticos para crear el generador climático (tabla 6.1). Este sirve para generar series sintéticas de datos, o bien, para rellenar posibles lagunas en las series de datos diarios.

6.2. ANÁLISIS DE LOS DATOS HIDROSEDIMENTARIOS Y DE NITRATOS DE LA CUENCA

En este apartado se analizan los datos hidrológicos, la exportación de sedimentos y la exportación de nitratos de la cuenca del río Corbeira durante el periodo 2005/06-2009/10 con el fin de obtener una primera aproximación, previa a las simulaciones, del comportamiento hidrosedimentario de la cuenca, así como de la dinámica de los nitratos.

6.2.1. DESCARGA DE AGUA, SEDIMENTOS Y NITRATOS

En la tabla 6.2 se muestran los resultados de la descarga anual de agua, sedimentos y nitratos en la cuenca, así como los valores de precipitación para el periodo señalado.

Tabla 6.1. Datos utilizados para crear el generador climático del SWAT.

| Variable | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agosto | Stbre. | Octubre | Nvbre. | Dcbre. |
|----------|--------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|---------|--------|--------|
| Pcpmm | 116,92 | 101,70 | 85,77 | 98,24 | 82,12 | 43,56 | 33,43 | 36,10 | 68,40 | 136,15 | 146,74 | 148,42 |
| Pcpstd | 6,60 | 6,38 | 6,34 | 5,45 | 5,43 | 3,88 | 3,65 | 3,95 | 5,85 | 8,52 | 7,98 | 8,15 |
| Pcpskw | 2,63 | 2,70 | 7,33 | 7,33 | 4,01 | 4,31 | 6,74 | 7,80 | 3,82 | 3,16 | 2,45 | 2,73 |
| Pr_w1 | 0,42 | 0,41 | 0,38 | 0,42 | 0,39 | 0,25 | 0,22 | 0,23 | 0,27 | 0,40 | 0,45 | 0,43 |
| Pr_w2 | 0,67 | 0,66 | 0,63 | 0,67 | 0,64 | 0,50 | 0,47 | 0,48 | 0,52 | 0,65 | 0,70 | 0,68 |
| Pcpd | 17,47 | 15,47 | 15,67 | 16,80 | 16,17 | 9,87 | 9,17 | 9,63 | 10,83 | 16,70 | 17,93 | 17,90 |
| Rainhmx | 9,31 | 9,06 | 22,42 | 8,15 | 9,91 | 7,40 | 10,26 | 13,40 | 8,96 | 13,93 | 14,46 | 13,34 |
| Tpmx | 13,14 | 13,80 | 15,76 | 16,55 | 18,65 | 21,47 | 23,11 | 23,75 | 22,59 | 19,17 | 15,78 | 13,78 |
| Tpmm | 5,38 | 5,21 | 6,57 | 7,72 | 10,08 | 12,66 | 14,36 | 14,48 | 12,92 | 10,59 | 7,91 | 6,09 |
| Tmpstdmx | 2,46 | 2,83 | 3,29 | 3,62 | 3,65 | 3,62 | 3,07 | 2,82 | 3,10 | 3,00 | 2,84 | 2,46 |
| Tmpstdmn | 4,01 | 3,79 | 3,44 | 2,77 | 2,57 | 2,41 | 2,18 | 2,42 | 2,78 | 3,22 | 3,71 | 4,18 |
| Solarav | 4,79 | 6,95 | 10,09 | 13,18 | 14,96 | 16,05 | 15,71 | 14,33 | 11,84 | 7,77 | 5,15 | 4,13 |
| Dewpt | 6,58 | 6,17 | 7,26 | 8,23 | 10,54 | 13,13 | 14,80 | 15,03 | 13,72 | 11,77 | 9,24 | 7,31 |
| Wndav | 2,60 | 2,64 | 2,84 | 2,91 | 2,73 | 2,61 | 2,50 | 2,32 | 2,22 | 2,38 | 2,38 | 2,52 |

Pcpmm: precipitación media mensual (mm); **Pcpstd:** desviación estándar de la precipitación diaria del mes (mm); **Pcpskw:** coeficiente de la precipitación diaria; **Pr_w1:** probabilidad de que, en el mes, exista un día lluvioso seguido de uno seco; **Pr_w2:** probabilidad de que, en el mes, exista un día lluvioso seguido de otro lluvioso; **Pcpd:** media de días con precipitación en el mes; **Rainhmx:** precipitación máxima mensual en 30 minutos(mm); **Tpmx:** media mensual de las temperaturas máximas diarias (°C); **Tpmm:** media mensual de las temperaturas mínimas diarias (°C); **Tmpstdmx:** desviación estándar mensual de las temperaturas máximas diarias (°C); **Tmpstdmn:** desviación estándar mensual de las temperaturas mínimas diarias (°C); **Solarav:** media mensual de la radiación solar diaria (MJ/m² día); **Dewpt:** temperatura media mensual del punto de rocío (°C); **Wndav:** velocidad del viento media mensual (m/s); **Hmd:** humedad relativa media mensual.

Tabla 6.2. Descarga de agua, exportación de sedimentos, nitratos y precipitación en la cuenca del Corbeira.

(Entre paréntesis figura el porcentaje referido a eventos de escorrentía).

| Año hidrológico | Flujo total (mm) | Flujo base (mm) | Exportación de sedimento (t/km²) | Exportación de nitratos (t N-NO₃/km²) | Precipitación (mm) |
|------------------------|-------------------------|------------------------|--|--|---------------------------|
| 2005/06 | 449,4 | 319,0 | 8,6 (68%) | 0,56 (41%) | 1191,6 |
| 2006/07 | 412,3 | 301,7 | 10,9 (80%) | 0,53 (43%) | 1397,2 |
| 2007/08 | 239,9 | 156,1 | 5,1 (77%) | 0,28 (36%) | 1054,8 |
| 2008/09 | 421,5 | 330,1 | 11,6 (72%) | 0,50 (35%) | 1196,2 |
| 2009/10 | 539,1 | 335,4 | 18,7 (75%) | 0,68 (40%) | 1381,6 |

Se observa una gran variabilidad interanual en la descarga de agua la cual tiende a ser mayor que la de la precipitación, reflejando una relación no lineal entre ambos parámetros, en concordancia con lo descrito por numerosos autores en cuencas de clima templado húmedo y, especialmente, en áreas mediterráneas (Hewlett et al., 1967; Kirkby et al., 2002; Harder et al., 2007; Latrón et al., 2008). Este rango de variación de la descarga de agua y precipitación da la oportunidad de comparar los resultados del modelo SWAT con un amplio abanico de condiciones de escorrentía, entre las cuales se incluyen las relativas a años secos, que podrían representar condiciones climáticas de mayor aridez, correspondientes a algunas predicciones de cambio climático para esta región.

La cuenca del río Corbeira genera poca escorrentía, siendo el valor medio del coeficiente de escorrentía (flujo total/precipitación) del 33%, un valor similar al obtenido por Palleiro et al. (2013) en la cabecera del río Mero. Esta cifra es relativamente baja, sobre todo al compararla con los valores mostrados en la bibliografía para cuencas agroforestales bajo clima templado húmedo (65%: Varela, 2002; 50-75%: Zabaleta et al., 2007). Por otra parte, los datos de la tabla 6.2 muestran que el flujo base es, por término medio, el responsable del 73% del volumen de agua, oscilando entre el 60% del año 2009/10 y el 80% del año 2008/09.

En el periodo comprendido entre octubre de 2005 y septiembre de 2010, la producción de sedimentos alcanzó 883 t, lo que representa una exportación media de 11 t/km² año. Esta tasa es relativamente baja en relación con las obtenidas en otras cuencas forestales y de uso mixto en áreas de clima templado húmedo (Uriarte, 1998; Zabaleta et al., 2007) aproximándose, sin embargo, a las referidas en otras cuencas gallegas (Pérez et al., 2000; Rial et al., 2003). Debe tenerse en cuenta, no obstante, que las tasas de exportación en estas últimas cuencas han sido determinadas fundamentalmente a partir de datos semanales y, por tanto, pueden encontrarse, en gran medida, subestimadas.

La exportación de sedimentos muestra una acusada variabilidad anual ligada a la respuesta hidrológica de la cuenca (tabla 6.2). Así, la mayor cantidad de sedimento exportado tuvo lugar en el año 2009/10 (18,7 t/km²), coincidiendo con el año en el que la respuesta hidrológica fue mayor (539,1 mm). La cantidad más baja se registró en el año 2007/08 (5,1 t/km²), un año en el que la respuesta hidrológica fue muy baja (239,9 mm). Esta variación interanual permitirá comparar los resultados simulados con un rango de producción de sedimentos. Debe notarse, que la exportación de sedimentos durante los años elegidos para la calibración (2005/06-2007/08) es sustancialmente inferior a la de los años usados para la validación (2007/08-2009/10), esto es 8,25 t/km² frente a 15,1 t/km², lo que podría plantear problemas a la hora de validar el modelo.

En la cuenca del río Corbeira el transporte de sedimentos tiene lugar en un corto periodo de tiempo (figura 6.7). De hecho, en el transcurso del periodo de simulación el 50% de la producción de sedimentos (Tss 50%) se registró en tan sólo el 4% del tiempo, mientras que para la descarga del 50% del volumen de agua (Tw 50%) fue necesario el 24% del tiempo. Esto refleja la mayor movilidad de los sedimentos en relación con la descarga de agua bajo las condiciones imperantes en el noroeste de España, un hecho frecuentemente constatado en otras cuencas de clima templado húmedo (Meybeck et al., 2003; Moatar y Meybeck, 2007). Atendiendo al esquema de clasificación desarrollado por Meybeck et al. (2003) para Tss 50% (un indicador clave de la dinámica del transporte de sedimentos

respecto del tiempo), la cuenca del río Corbeira se situaría en el rango medio (3,4-8%), lo que denota una variabilidad media.

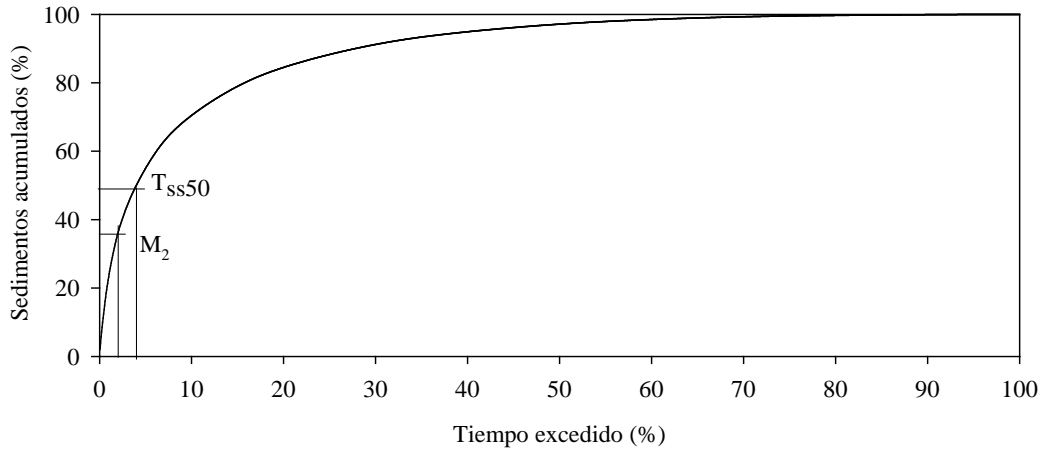


Figura 6.7. Curva de duración de los sedimentos en la cuenca.

T_{ss50}: 50% de la producción de sedimentos, M₂: porcentaje de sedimentos transportados en el 2% del tiempo.

Otro indicador importante, representativo de la dinámica del transporte de sedimentos, es el porcentaje transportado durante el 2% del tiempo (es decir, los 18 días con mayor exportación de sedimentos en los 5 años de simulación). Del orden del 36% de los sedimentos se transportaron en un 2% del tiempo, lo que pone de relieve la importancia de establecer estrategias de muestreo adecuadas para evitar la pérdida de sedimentos pues de no efectuarse éste en los días de mayor carga de sedimentos se subestimaría la tasa de exportación, constituyendo una de las grandes limitaciones en el campo de la modelación (Robertson, 2003; Ullrich y Volk, 2010).

La exportación de sedimentos está frecuentemente condicionada por los episodios de escorrentía (Lecce et al., 2006; Lana-Renault et al., 2009; Ordenka et al., 2012). En la cuenca del Corbeira, más del 70% de la exportación de sedimentos tuvo lugar durante episodios de escorrentía (tabla 6.2), aun cuando éstos sólo aportaron un 30% del volumen de agua. De esto se deduce que los eventos de escorrentía deben de tenerse en cuenta a la hora de calibrar el modelo con el fin de obtener una buena correspondencia entre la tasa de sedimentos simulados y observados.

En lo que respecta a los nitratos (tabla 6.2), la exportación varió entre 0,28 y 0,68 t/km² año, unas tasas relativamente bajas en relación con las cifras referidas para otras cuencas con uso mixto del suelo (Owens et al., 1991; Álvarez-Cobelas et al., 2008), lo cual es comprensible a causa de la baja actividad agrícola que registra la cuenca. Se constata una elevada variabilidad entre años ligada al flujo del arroyo. Así, los valores más bajos se obtuvieron en el año 2007/08, es decir en el año más seco del periodo de simulación, mientras que las cifras más elevadas correspondieron al año 2009/10, en el que se registró la mayor producción de agua.

El transporte de nitratos, a diferencia de los sedimentos, tiene lugar preferentemente en flujo base (tabla 6.2), tal como señala habitualmente en la bibliografía (Macrae et al., 2007).

6.2.2. EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL CAUDAL, PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS Y NITRATOS

En lo que se refiere a la evolución a lo largo del año, tanto la precipitación como el caudal mostraron un claro comportamiento estacional (figura 6.8). Al inicio de la estación húmeda (octubre) todavía comienza la recarga de los suelos y, consecuentemente, el caudal es notablemente inferior al de otros meses con precipitaciones similares. Los picos de caudal se producen en diciembre y en febrero, debido probablemente a las condiciones húmedas de los suelos. A partir de marzo y abril el agua del suelo sigue drenando lentamente al río, manteniendo el flujo durante la estación seca (verano), momento en el que registran los caudales mínimos a causa de la reducción en la cantidad de lluvia (146 mm de promedio de junio a septiembre), así como a la elevada evapotranspiración potencial (50% de la evapotranspiración anual).

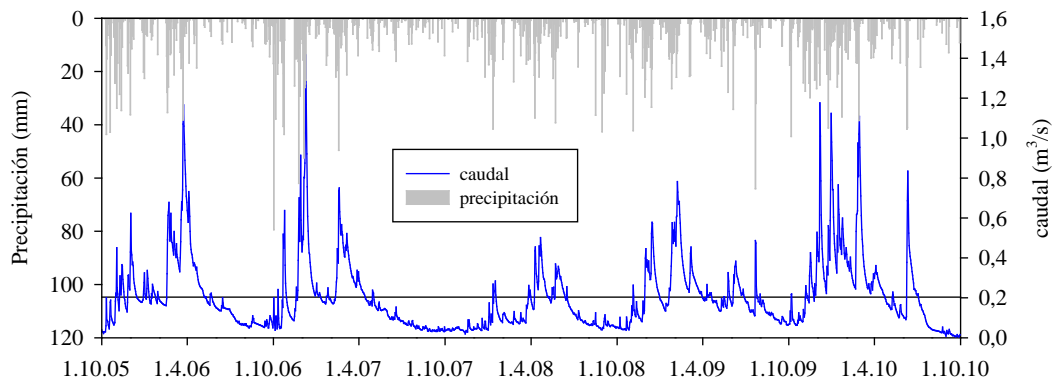


Figura 6.8. Variación diaria de la precipitación y del caudal en la cuenca.
La línea horizontal representa el caudal medio diario.

Los resultados anteriores muestran que la evapotranspiración y la recarga de agua del suelo son procesos de suma importancia en la dinámica hidrológica de la cuenca (Rodríguez-Blanco et al., 2012), por lo que deben estar bien reflejados en el modelo para conseguir una buena simulación del caudal.

A escala de evento, también es posible percibir que el flujo base, considerado como indicador de las condiciones previas de humedad del suelo (Beven, 2001), juega un papel destacado en la generación de escorrentía en la cuenca (figura 6.9), al igual que ha sido constatado en otras cuencas de clima templado (Hewlett et al., 1967; Macrae et al., 2010; Zabaleta et al., 2012; Palleiro et al., 2013).

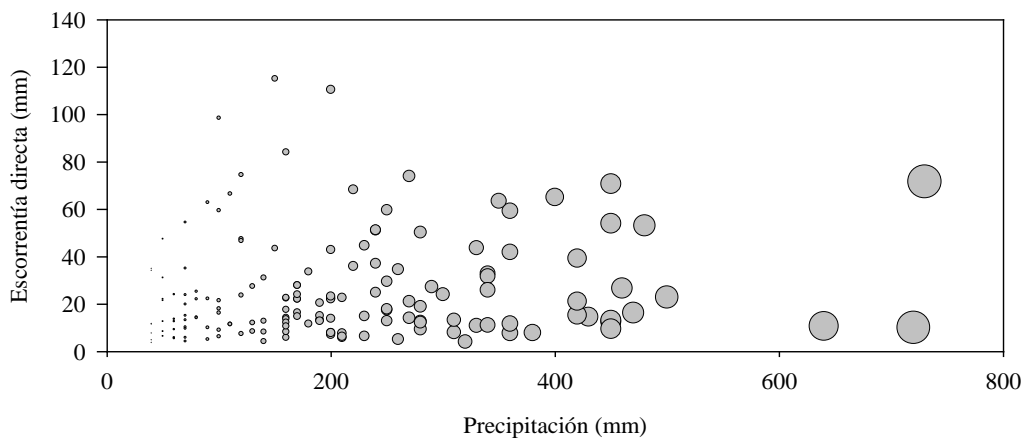


Figura 6.9. Relación entre la precipitación y escorrentía del evento.
El tamaño de símbolo representa el caudal al inicio del evento.

La dinámica del transporte de sedimentos en la cuenca está esencialmente condicionado por su comportamiento hidrológico, como se ha demostrado en trabajos previos (Rodríguez-Blanco et al., 2010a, b). Por lo general, la mayor producción de sedimentos tiene lugar en otoño e invierno (figura 6.10), coincidiendo con el periodo de mayor cantidad de precipitación y número de eventos lluviosos, así como con el mayor porcentaje de suelos de cultivo carentes de vegetación. No obstante, no hay que olvidar que la exportación de sedimentos suele estar condicionada a la existencia de eventos intensos, que aunque generalmente se producen en otoño-invierno, no son exclusivos de estas épocas del año. Por ejemplo, en el verano de 2009, dos eventos de alta intensidad (60 mm en 12 horas) causaron una elevada pérdida de sedimentos en la cuenca derivada de las infraestructuras viarias (figura 6.11), ya que las obras de ensanchamiento de viales y limpieza de cunetas, en algunas zonas de la cuenca, produjeron una gran cantidad de sedimentos fácilmente disponibles para ser transportados (figura 6.11). Las intensas lluvias registradas durante estos episodios, unido a la buena conectividad de estas superficies y el arroyo, facilitaron el rápido aporte de sedimentos al cauce. De hecho, tan sólo 5 horas después del inicio del evento las concentraciones de sedimentos se habían incrementado un 500%, alcanzando concentraciones máximas de 970 mg/l y, por tanto, constituyendo un riesgo para la calidad de las aguas (>50 mg/l: Huntley, 2001).

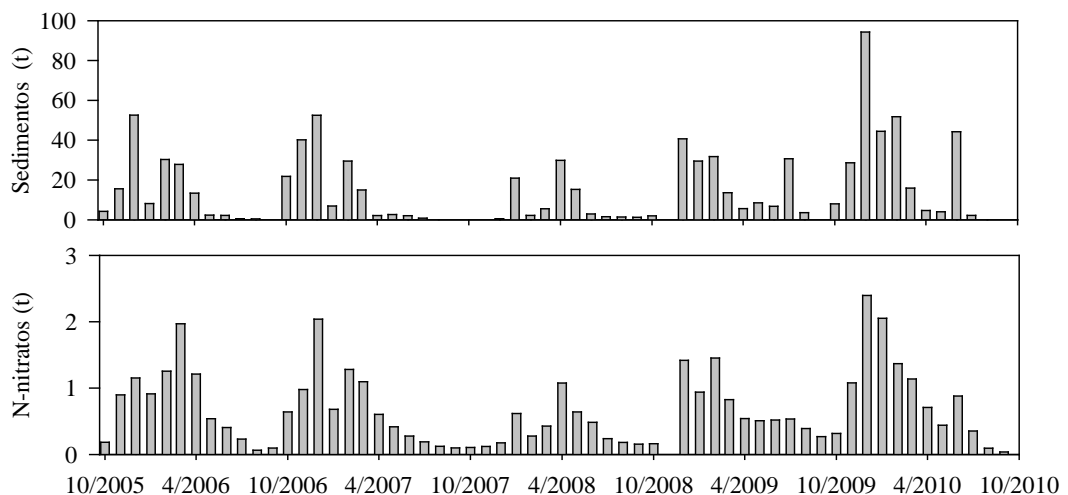


Figura 6.10. Producción mensual de sedimentos y nitratos (N-NO₃) en la cuenca.



Figura 6.11. Las infraestructuras viarias como fuente de sedimentos a) Trabajos de desmonte. b) Aporte de sedimentos desde un vial próximo al cierre de la cuenca.

La erosión de los suelos de cultivo constituye otra fuente importante de sedimentos en la cuenca (Rodríguez-Blanco et al., 2010c) (figura 6.12). La buena conectividad de algunas parcelas de cultivo con el arroyo favoreció el aporte directo de sedimentos a la red de drenaje, dañando la calidad de las aguas. Así, en el invierno de 2008 el aporte de sedimentos desde un área de cultivo situada en las inmediaciones del arroyo, en la cabecera de la cuenca, provocó que las concentraciones de sedimentos en la salida de la cuenca alcanzaran concentraciones de 1313 mg/l (Rodríguez-Blanco et al., 2013a), constituyendo un riesgo para la calidad de las aguas (>50 mg/l: Huntley, 2001) e incluso para la población de salmónidos (>1000 mg/l: Heaney et al., 2001).



Figura 6.12. Áreas fuente de sedimentos en la cuenca del Corbeira. Parcelas de cultivo en las que se han formado surcos y cárcavas efímeras y que dada su conexión con la red de drenaje aportan directamente sedimentos al cauce.

En numerosas ocasiones, por el contrario, se ha constatado que el suelo erosionado no alcanza el arroyo sino que permanece en el interior de la parcela, por ejemplo acumulado al final de surcos y cárcavas efímeras. En otros casos, los

sedimentos abandonan la parcela y se depositan en parcelas contiguas con densa vegetación (figura 6.13) o en cunetas. Por lo tanto, cuando las continuidades y discontinuidades son elementos fundamentales del paisaje, deberían de tenerse en cuenta para comprender y modelar los procesos de erosión a escala de cuenca.



Figura 6.13. Fotografía mostrando la retención de sedimentos en una pradera.

El transporte de nitratos también muestra una clara estacionalidad, con los mayores registros durante el invierno y principio de primavera (figura 6.10). Esto puede ser debido, en parte, a la mayor tasa de aplicación de fertilizantes nitrogenados a los suelos agrícolas durante el periodo húmedo, lo que unido a la menor absorción biótica de nitrógeno durante la fase latente de la vegetación, favorece las pérdidas de nitratos desde los suelos a las aguas (Campbell et al., 2004). Además, como se indicó anteriormente, el otoño es la estación más lluviosa pero los flujos más elevados frecuentemente tienen lugar en invierno y primavera cuando el almacenamiento de agua en el suelo es alto, facilitando el movimiento de los nitratos a través del perfil del suelo. Por el contrario, en verano el transporte se reduce a causa de la limitada respuesta hidrológica de la cuenca, a la escasa aplicación de fertilizantes en los suelos agrícolas y a la mayor productividad de la vegetación.

Todo lo anterior resalta la necesidad de simular adecuadamente el ciclo de los cultivos con el fin de estimar objetivamente la pérdida de sedimentos y nutrientes desde distintas zonas de la cuenca. En definitiva, una adecuada simulación del crecimiento de la vegetación resulta clave para el adecuado funcionamiento de otros módulos del SWAT, como por ejemplo para los de hidrología, exportación de sedimentos y nutrientes, pues influirá, entre otros muchos aspectos, en la cantidad de agua interceptada por el dosel, en el consumo de agua y nutrientes del suelo, en la protección del suelo frente a la erosión, etc.

6.3. APLICACIÓN Y EVALUACIÓN DEL MODELO SWAT

6.3.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

La calibración de un modelo es una tarea ardua sujeta a la influencia de multitud de parámetros. Por este motivo se ha realizado un análisis de sensibilidad con el fin de identificar aquellos parámetros que ejercen una mayor influencia en la salida del SWAT. Este análisis se efectuó de forma automática por el método LH-OAT (van Griensven et al., 2006), para los siguientes módulos: hidrológico, transporte de sedimentos y nutrientes.

6.3.1.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA EL MÓDULO HIDROLÓGICO

En la tabla 6.3 se muestran los parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad de los tres módulos con su correspondiente rango. Los límites de cada parámetro se han mantenido dentro de su rango por defecto, excepto para GW_DELAY (retraso del flujo subterráneo), GW_REVAP (coeficiente que controla la tasa de transferencia de agua evaporada desde el acuífero somero), GWQMN (profundidad límite de agua en el acuífero somero requerida para que ocurra el flujo de retorno) y REVAPMN (profundidad mínima de agua en el acuífero somero para que ocurra REVAP), cuyo valor mínimo se modificó desde su valor original negativo a 0, pues dichos parámetros no permiten valores negativos.

Tabla 6.3. Parámetros y rango de los parámetros usados en el análisis de sensibilidad (se incluyen parámetros usados en los tres módulos).

| Nombre | Min | Max | Descripción | Proceso |
|----------------------|--------|------|---|------------------|
| ALPHA BF | 0 | 1 | Constante de recesión del flujo de retorno | Agua subterránea |
| BIOMIX | 0 | 1 | Eficiencia biológica de mezcla | Suelo |
| BLAI | 0 | 1 | Máximo índice de área foliar | Cultivo |
| CAMNX | 0 | 10 | Almacenamiento máximo del dosel (mm) | Escorrentía |
| CH_COV | -0,001 | 1 | Factor de cobertura del canal | Erosión |
| CH_EROD ^a | -0,05 | 0,6 | Factor de erosionabilidad del canal | Erosión |
| CH_K ₂ | -0,01 | 150 | Conductividad hidráulica efectiva en el cauce principal (mm/h) | Canal |
| CH_N ₂ | 0,01 | 0,5 | Valor N Manning para el cauce principal | Canal |
| CN2 | 25 | 98 | Número de curva inicial para la condición de humedad II | Escorrentía |
| EPCO | 0 | 1 | Factor de compensación de consumo de la planta | Evaporación |
| ESCO | 0 | 1 | Factor de compensación de la evaporación del suelo | Evaporación |
| GW_DELAY | 0 | 50 | Retraso del flujo subterráneo | Agua subterránea |
| GW_REVAP | 0,02 | 0,2 | Coefficiente que controla la tasa de transferencia de agua del acuífero somero | Agua subterránea |
| GWNO ₃ | 0 | 10 | Concentración de nitratos en el agua subterráneas (mg/L) | Agua subterránea |
| GWQMN | 0 | 5000 | Profundidad límite de agua en el acuífero somero requerida para que ocurra el flujo de retorno (mm) | Suelo |
| NPERCO | 0 | 1 | Coefficiente de percolación de nitrógeno | Suelo |
| RCHRG_DP | 0 | 1 | Fración de percolación al acuífero profundo | Agua subterránea |
| REVAPMN | 0 | 500 | Profundidad límite de agua en el acuífero somero para que ocurra revap (mm) | Agua subterránea |
| SFTMP | 0 | 5 | Temperatura a la cual la precipitación está en forma de nieve | Nieve |
| SLOPE | 0,0001 | 0,6 | Pendiente media adoptada para todas las URHs en una subcuenca (m/m) | Geomorfología |

Resultados y discusión

Tabla 6.3. (Continuación) Parámetros y rango de los parámetros usados en el análisis de sensibilidad (se incluyen parámetros usados en los tres módulos).

| Nombre | Mín | Max | Descripción | Proceso |
|---------------------|--------|-------|--|---------------|
| SLSUBBSN | 10 | 150 | Pendiente media de la subcuenca | Geomorfología |
| SMFMN | 0 | 10 | Tasa mínima de fusión de la nieve durante el año | Nieve |
| SMFMX | 0 | 10 | Tasa máxima de fusión de la nieve durante el año | Nieve |
| SMTMP | 0 | 5 | Temperatura base de fusión de la nieve | Nieve |
| SOL_ALB | 0 | 0,1 | Albedo del suelo húmedo | Evaporación |
| SOL_AWC | 0 | 1 | Capacidad disponible de agua (mm/mm) | Suelo |
| SOL_K | 0 | 100 | Conductividad hidráulica saturada (mm/h) | Suelo |
| SOL_NO ₃ | 0 | 5 | Concentración inicial de NO ₃ (mg/L) en el horizonte del suelo | Suelo |
| SOL_ORGN | 0 | 10000 | Concentración inicial de nitrógeno orgánico (mg/L) en el horizonte del suelo | Suelo |
| SOL_Z | 0 | 3000 | Profundidad del suelo (mm) | Suelo |
| SPCON | 0,0001 | 0,01 | Parámetro lineal para el cálculo del movimiento de los sedimentos en el canal | Canal |
| SPEXP | 1 | 1,5 | Parámetro exponencial para el cálculo del movimiento de los sedimentos en el canal | Canal |
| SURLAG | 1 | 10 | Coefficiente de retraso de la escorrentía superficial | Escorrentía |
| TIMP | 0,01 | 1 | Gradiente de temperatura | Nieve |
| TLAPS | 0 | 50 | Factor de retraso de la temperatura (°C/km) | Geomorfología |
| USLE_C | 0 | 25 | Factor referente a la cubierta vegetal (C) en la ecuación USLE | Erosión |
| USLE_P | 0,1 | 1 | Factor referente a las practicas (P) en la ecuación USLE | Erosión |

Tabla 6.4. Parámetros más sensibles para la calibración hidrológica del SWAT en la cuenca del río Corbeira.

| Parámetro | | Con datos medidos | | | Sin datos medidos | | |
|-------------------|---|-------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|------------------------|---------------------------|
| Nombre | descripción | Rango | Índice de sensibilidad | Categoría de sensibilidad | Rango | Índice de sensibilidad | Categoría de sensibilidad |
| AWC | Capacidad disponible de agua (mm/mm) | 1 | 0,697 | Muy importante | 3 | 0,974 | Importante |
| GWQMN | Profundidad mínima de agua en el acuífero somero requerida para que ocurra el flujo de retorno (mm) | 2 | 0,435 | Importante | 2 | 1,550 | |
| ESCO | Factor de compensación de la evaporación del suelo | 3 | 0,268 | | 5 | 0,740 | |
| RCHRG_DP | Fración de percolación al acuífero profundo | 4 | 0,219 | | 6 | 0,721 | |
| SOL_K | Conductividad hidráulica saturada (mm/h) | 5 | 0,176 | | 7 | 0,619 | |
| SLOPE | Pendiente media adoptada para todas las URHs en una subcuenca (m/m) | 6 | 0,174 | | 8 | 0,331 | Ligeramente importante |
| CAMNX | Almacenamiento máximo del dosel (mm) | 7 | 0,093 | 14 | 0,132 | | |
| BLAI | Índice máximo de área foliar | 8 | 0,074 | 10 | 0,278 | | |
| CN2 | Número de curva inicial para la condición de humedad II | 9 | 0,058 | 9 | 0,296 | | |
| SOL_Z | Profundidad del suelo (mm) | 10 | 0,052 | 16 | 0,090 | | |
| REVAPMN | Profundidad límite de agua en el acuífero somero para que ocurra revap (mm) | 11 | 0,051 | 12 | 0,18 | | |
| CH_K ₂ | Conductividad hidráulica efectiva en el cauce principal (mm/h) | 12 | 0,017 | 4 | 0,80 | Importante | |
| ALPHA_BF | Constante de recesión del flujo de retorno | 13 | 0,006 | 1 | 2,04 | Muy importante | |
| SURLAG | Coefficiente de retraso de la escorrentía superficial | 14 | 0,005 | 15 | 0,111 | Ligeramente importante | |
| EPCO | Factor de compensación de consumo de la planta | 15 | 0,005 | 17 | 0,285 | | |
| GWDELAY | Retraso del flujo subterráneo | 16 | 0,004 | 13 | 0,153 | | |

Tabla 6.4. (Continuación) Parámetros más sensibles para la calibración hidrológica del SWAT en la cuenca del río Corbeira.

| Parámetro | | Con datos medidos | | | Sin datos medidos | | |
|-------------------|--|-------------------|------------------------|---------------------------|-------------------|------------------------|---------------------------|
| Nombre | descripción | Rango | Índice de sensibilidad | Categoría de sensibilidad | Rango | Índice de sensibilidad | Categoría de sensibilidad |
| SOL_ALB | Albedo del suelo húmedo | 17 | 0,001 | Ligeramente importante | 19 | 0,003 | Ligeramente importante |
| BIOMIX | Eficiencia biológica de mezcla | 18 | 0,001 | | 20 | 0,001 | |
| CH_N ₂ | Valor N Manning para el cauce principal | 19 | 0,000 | | 11 | 0,226 | |
| GW_REVAP | Coefficiente que controla la tasa de transferencia de agua del acuífero somero | 28 | 0,000 | No importante | 28 | 0,000 | No importante |
| SFTMP | Temperatura de la nevada | 28 | 0,000 | | 28 | 0,000 | |
| SLSUBBSN | Pendiente media de la subcuenca | 28 | 0,000 | | 18 | 0,003 | Ligeramente importante |
| SMFMN | Tasa mínima de fusión de la nieve durante el año | 28 | 0,000 | | 28 | 0,000 | No importante |
| SMFMX | Tasa máxima de fusión de la nieve durante el año | 28 | 0,000 | | 28 | 0,000 | |
| SMTMP | Temperatura base de fusión de la nieve | 28 | 0,000 | | 28 | 0,000 | |
| TIMP | Gradiente de temperatura | 28 | 0,000 | | 28 | 0,000 | |
| TLAPS | Factor de retraso de la temperatura (°C/km) | 28 | 0,000 | | 28 | 0,000 | |

En la tabla 6.4 y en la figura 6.14 se muestra el ranking y el índice de sensibilidad de los parámetros más sensibles a la calibración hidrológica. Siguiendo a van Griensven et al. (2006), se caracterizan como variables muy importantes las clasificadas con el rango global 1; como importantes, las que se encuentran en el rango de 2-6; ligeramente importantes, las incluidas en el rango 7-19 y no importantes, las de rango 28. En primer lugar se comprueba la existencia de notables diferencias entre los dos tipos de análisis realizados, es decir, en función de si se tienen en cuenta o no los datos observados. La diferencia principal es la destacada sensibilidad del modelo al parámetro ALFA_BF (constante de recesión del flujo de retorno) cuando se prescinde de los datos observados. En la figura 6.14, también se aprecia que la sensibilidad del SWAT a SOLK es mayor cuando se tienen en cuenta los datos observados que cuando no se consideran.

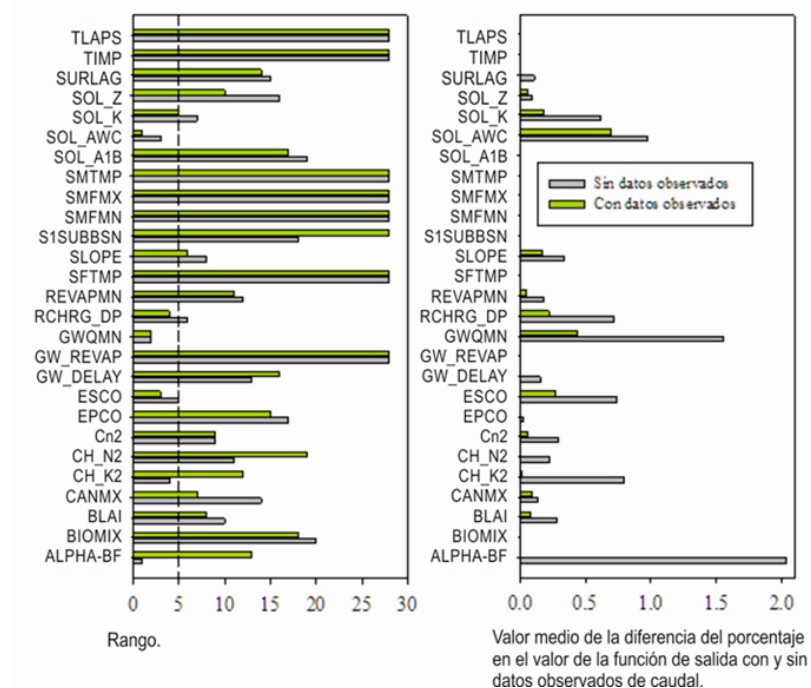


Figura 6.14. Sensibilidad de los parámetros del modelo SWAT relacionados con la hidrología en la cuenca del río Corbeira.

Al referirnos a los resultados del análisis de sensibilidad considerando los datos observados, el AWC se identifica como un parámetro muy importante. GWQMN, ESCO, RCHRG_DP, SOL_K y SLOPE son parámetros importantes, con un rango entre 2 y 6. Parámetros como CANMX, BLAI, CN2, SOL_Z, REVAPMN, CH_K2,

ALPHA_BF, SURLAG, EPCO, GWDELAY, SOL_ALB, BIOMIX, CH_N₂ se identifican como poco importantes y los restantes, GW_REVAP, SFTMP, SLSUBBSN, SMFMN, SMFNX, SMFMX, SMTMP, TIMP y TLAPS, como no influyentes en la salida del modelo (tabla 6.4).

A continuación se definen brevemente los parámetros más sensibles en la aplicación del modelo SWAT en la cuenca del Corbeira.

El *SOL_AWC* se define como la disponibilidad de un suelo para almacenar agua, y depende de las características de los suelos, de ahí que varíe con la profundidad. Este parámetro afecta tanto a la escorrentía superficial como al flujo subterráneo. Un incremento en los valores del AWC supone un descenso en el agua que alcanza el arroyo, debido al incremento de agua almacenada en el suelo.

El *GWQMN* representa el umbral de agua en el acuífero somero requerido para que ocurra flujo de retorno. Con valores elevados del GWQMN una parte considerable del flujo base es retardado y almacenado en el suelo. Por el contrario, con valores bajos de este parámetro el SWAT produce más flujo base. El efecto de este parámetro en el flujo base afectará consecuentemente al flujo del río.

El *ESCO* es un coeficiente empleado para modificar la profundidad del perfil del suelo a la cual existe evaporación (Neitsch et al., 2002). El cambio en los valores del factor de compensación de la demanda evaporativa afecta a todos los componentes del balance hídrico. Un descenso en los valores de ESCO trae parejo un descenso en el agua del río, lo cual puede suponer que la cantidad de agua disponible para evapotranspiración es mayor.

El *RCHRG_DP* representa la fracción del agua que percola desde el acuífero somero hacia el acuífero profundo. El agua que alcanza el acuífero profundo no se tiene en cuenta para calcular el balance hídrico y, por tanto, se considera como agua perdida del sistema. Un aumento en los valores de RCHRG_DP origina un descenso en el flujo base y, por consiguiente, en el arroyo.

La *SOL_K* se refiere a la conductividad hidráulica saturada, que afecta sensiblemente a la escorrentía superficial y al flujo base. Un incremento en los

valores de SOL_K causa un incremento en los valores del flujo del arroyo, incrementando el flujo lateral y disminuyendo el flujo superficial.

El parámetro *SLOPE* hace referencia a la pendiente de las URHs.

Los resultados anteriores ponen de manifiesto que, en la cuenca de estudio, los parámetros que controlan la disponibilidad del agua del suelo y el flujo subterráneo son las variables más sensibles del modelo. Similares resultados han sido obtenidos en estudios previos llevados a cabo en cuencas fuertemente condicionadas por las aguas subterráneas (Schmalz y Fohrer, 2009; Kiesel et al., 2010). Los parámetros a los cuales el modelo resulta sensible en este trabajo concuerda con los de otros autores (Arnold et al., 2000; Spruill et al., 2000; White y Chaubey, 2005; Holvoet et al., 2005; van Griensven et al., 2006 y Kannan et al., 2007), excepto para el CN2 (tabla 6.5). En este caso el balance de agua no es muy sensible a los valores adoptados por el CN2. Esto puede ser debido a dos factores: uno es que el rango asumido para analizar la sensibilidad del NC es bajo ($NC \pm 2$) en comparación con otros estudios, y otro, es la disposición explícita del SWAT para actualizar el valor del NC para cada día de la simulación (el SWAT proporciona un valor del NC diario), basándose en el contenido de agua disponible en el suelo. Por lo tanto, un cambio en el valor del NC inicial no afectará en gran medida a los componentes del balance hídrico. Por último, indicar que en la calibración hidrológica del modelo no intervienen los parámetros relacionados con la nieve, lo cual era previsible dado que en la cuenca no ocurren fenómenos de este tipo.

Tabla 6.5. Relación de los parámetros hidrológicos más sensibles del SWAT obtenidos en algunos estudios.

| Autor | País | Parámetros |
|----------------------------|----------------|--|
| Spruill et al., 2000 | Estados Unidos | SOL_K, ALPHA_BF |
| Arnold et al., 2000 | Estados Unidos | CN2, SOL_AWC, ESCO |
| Holvoet et al., 2005 | Bélgica | CN2, SURLAG, RCHRG_DP, GWQMN |
| White y Chaubey, 2005 | Estados Unidos | CN2, ESCO, SOL_AWC, |
| Van Griensven et al., 2006 | Estados Unidos | CN2, GWQMN, ALPHA_BF, SOL_AWC, SOL_Z, SMFMX, ESCO, CANMX |
| Kannan et al., 2007 | Reino Unido | AWC, SOL_K, ESCO, GWQMN CN2 |

6.3.1.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA EL MÓDULO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

En la tabla 6.6 se muestran los parámetros del modelo que ejercen influencia en el transporte de sedimentos y el efecto que producen sus respectivos ajustes.

Tabla 6.6. Parámetros que influyen en el transporte de sedimentos y efecto de sus respectivos ajustes.

| Aumento de la producción de sedimentos en la fase terrestre | Aumento de la degradación | Disminución de la deposición |
|---|---------------------------|------------------------------|
| ADJ_PKR (+) | SPCON (+) | SPCON (+) |
| LAT_SED (+) | PRF (+) | PRF (+) |
| FILTERW (-) | SPEXP (+) | SPEXP (+) |
| USLE_K (+) | CH_EROD (+) | |
| USLE_P (+) | CH_COV (+) | |
| USLE_C (+) | | |

- ADJ_PKR: factor de ajuste de la tasa de pico para el aporte de sedimento en la subcuenca.
- LAT_SED: concentración de sedimentos en el flujo lateral (mg/L).
- FILTERW: longitud de las bandas verdes (m).
- USLE_K: factor K de erosionabilidad del suelo en la USLE.
- USLE_P: factor P de prácticas de manejo de la USLE.
- USLE_C: valor mínimo del factor C de cobertura vegetal de la USLE.
- SPCON: parámetro lineal para el cálculo del movimiento de los sedimentos en el canal.
- PRF: factor de ajuste de la tasa de pico para el aporte de sedimentos en el canal principal.
- SPEXP: parámetro exponencial para el movimiento de sedimentos en el canal.
- CH_EROD: factor de erosionabilidad del canal.
- CH_COV: factor de cobertura vegetal del canal.

Los parámetros más sensibles del módulo específico de transporte de sedimentos son la cantidad de sedimento que puede entrar en el canal (SPCON) y el factor de cobertura vegetal (C) de la USLE. El factor N de Manning del canal (expresa la resistencia experimentada por el flujo) es otro parámetro al que resulta

sensible el modelo, puesto que interfiere en el tiempo de concentración e indirectamente en el pico de caudal en el cauce. Arabi et al. (2007), en la cuenca de Maumee (Estados Unidos) también constataron que los parámetros más sensibles para estimar sedimentos son los relacionados con los procesos que tienen lugar en el canal, especialmente aquellos que dependen de la N de Manning y del SPCON. Por el contrario, la producción de sedimentos es poco sensible a cambios en los parámetros relacionados con la cobertura del canal (CH-COV) y a la erosionabilidad del cauce (CH_EROD). Como se indicó en la sección de caracterización, el cauce principal del río Corbeira está protegido, en su mayor parte, por una densa vegetación de ribera (figura 6.15), lo que dificulta tanto la entrada de sedimentos al río como la erosión del canal. Los terrenos de cultivo y las praderas (son fuente de sedimentos cuando están en fase de renovación) sólo se localizan en las inmediaciones del cauce en algunas áreas de la cuenca, existiendo en estos casos una buena conectividad con el río, lo que facilita el aporte de sedimentos desde estas áreas.



Figura. 6.15. Vegetación de ribera en los márgenes del cauce principal del río Corbeira.

6.3.1.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA EL MÓDULO DE NUTRIENTES

Finalmente, se realizó el análisis de sensibilidad para el módulo de transporte de nutrientes, atendiendo únicamente a los resultados de los nitratos. En la tabla 6.7 se muestra una lista de parámetros del modelo que influyen en la carga de nitratos y el efecto generado tras sus respectivos ajustes. La carga de

nitratos en la cuenca es altamente sensible a los parámetros relativos al flujo. Resultados similares fueron obtenidos por van Griensven et al. (2006). También se comprueba que la producción de nitratos en el flujo subterráneo es muy sensible al parámetro NPERCO mientras que dicha variable no afecta tanto a los nitratos exportados en el flujo lateral. Por otra parte, el parámetro FRT_SURFACE (fracción de fertilizante aplicado en los primeros 10 mm de la superficie del suelo) no ejerce influencia en la carga de nitratos.

Tabla 6.7. Parámetros que influyen en el transporte de nitratos y efecto de sus respectivos ajustes.

| Disminución de la percolación y reducción de la concentración de nitratos en el acuífero | Aumento de los nitratos asociados a la escorrentía superficial | Aumento de las concentraciones finales de nitratos en el canal |
|--|--|--|
| NPERCO (-) | FRT_SURFACE (+) | BC1 (+) |
| SHALLST_N (-) | | BC2 (+) |
| | | BC3 (+) |
| | | Al1 (+) |
| | | SOL_NO ₃ (+) |

- NPERCO: coeficiente de percolación de nitratos.
- SHALLST_N: concentración inicial de nitratos en el acuífero somero (ppm).
- FRT_SURFACE: fracción de fertilizante aplicado a los primeros 10 mm del suelo.
- BC1: tasa de oxidación biológica de amonio para nitrito en el canal a 20 °C (día-1).
- BC2: tasa de oxidación biológica de nitrito para nitrito en el canal a 20 °C (día-1).
- BC3: tasa de hidrólisis de N orgánico para amonio en el canal a 20 °C (día-1).
- Al1: fracción de biomasa de las algas que es nitrógeno (mgN mg alg⁻¹).
- SOL_NO₃: concentración inicial de nitratos en la capa superficial del suelo.

6.3.2. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO SWAT

6.3.2.1. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN HIDROLÓGICA

La calibración y la validación hidrológica del SWAT se realizó teniendo en cuenta los *datos diarios* de caudal, medidos en la estación de aforo de la cuenca, desde octubre de 2005 hasta septiembre de 2008 y desde octubre de 2008 a septiembre de 2010, respectivamente. La tabla 6.8 muestra el coeficiente de determinación (R^2), la desviación (BIAS), el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (NS), así como la media y el rango observado para el periodo de calibración y validación. Estos estadísticos, indicativos del grado de adecuación del modelo a los datos observados, muestran que los resultados simulados son buenos con respecto a los observados de acuerdo con los criterios de evaluación del modelo establecidos por Motovilov et al. (1999), Morgan y Quinton (2001) y Moriasi et al. (2007), que califican de buena la simulación cuando R^2 es superior a 0,75 y el índice de eficiencia superior a 0,5.

Los valores de los estadísticos del periodo de validación superan ligeramente a los del periodo de calibración, indicando un bajo nivel de sobreparametrización. La causa de estas diferencias puede encontrarse en las distintas condiciones hidrológicas de los años usados en estos análisis, ya que, en general, los modelos hidrológicos tienen menor capacidad para simular condiciones extremas que condiciones normales, y en nuestro caso el periodo de calibración comprende condiciones más extremas desde el punto de vista hidrológico que el periodo de validación, es decir, de los 5 años analizados (3 para calibración y 2 para validación) tanto el año hidrológico más húmedo (2006/07) como el más seco (2007/08) forman parte del periodo de calibración. Los datos de la tabla 6.8 también muestran que el desvío (BIAS) es pequeño cuando se compara con la media y con el rango del caudal observado, indicando una ligera sobreestimación en los caudales simulados.

Los valores de los estadísticos de adecuación del modelo se encuentran dentro del rango de valores frecuentemente reportados en la bibliografía para cuencas de clima templado húmedo. Así, Kannan et al. (2003) obtuvieron un valor del NS de 0,60 para la cuenca del Colworth localizada en UK, en otros casos, Holvoet et al. (2005) y Oeurng et al. (2011) encontraron valores del NS de 0,53. En Galicia, Raposo (2012) obtuvo coeficientes de NS comprendidos entre 0,65 y 0,82 al aplicar el modelo SWAT a 4 cuencas. No obstante, hay que indicar que los resultados anteriores se refieren a cuencas de mayor tamaño, en donde a priori, cabe esperar una mejor adecuación del modelo.

Tabla 6.8. Estadísticos de calibración y validación de los datos diarios de caudal.

| Parámetros | Calibración | Validación |
|---|------------------|------------------|
| R ² | 0,80 | 0,84 |
| BIAS (m ³ /s) | -0,001 | -0,008 |
| NS | 0,80 | 0,83 |
| Media y rango observado (m ³ /s) | 0,18 (0,02-1,42) | 0,24 (0,02-1,20) |

La figura 6.16 recoge los valores observados y simulados para la etapa de calibración y de validación. Se observa que el modelo reproduce satisfactoriamente la magnitud de los caudales y sus cambios de tendencia a lo largo del tiempo. Sin embargo, sobreestima los picos de caudal durante algunos eventos. Esto es especialmente relevante en la estación húmeda, y más evidente al inicio de la misma (por ejemplo en octubre de 2006). Este efecto se ha atribuido a diferentes causas, a la ausencia de un periodo de iniciación (*warm-up/calentamiento*) en los procesos de simulación del SWAT, a causa de un corto periodo de medidas (Xue et al., 2009), a la subestimación de la evapotranspiración y a la sobreestimación del contenido de agua en el suelo (Benaman et al., 2005). La cuenca del Corbeira presenta una respuesta hidrológica limitada durante los primeros días de la estación lluviosa, a causa de que una parte sustancial del agua de lluvia se consume en la recarga del suelo (Rodríguez-Blanco et al., 2012). Por lo tanto, la sobreestimación del caudal al inicio de la estación lluviosa puede deberse al método de estimación de la escorrentía superficial (número de curva). Dicho

método asume una única relación entre la precipitación y la escorrentía para la misma condición de humedad antecedente. Sin embargo, en esta cuenca, la relación escorrentía/precipitación incrementa con la humedad antecedente (como se ha indicado anteriormente) y, consecuentemente, el comportamiento hidrológico difiere en función de la cantidad de agua almacenada en los suelos. Por ejemplo, en octubre de 2006, se produjo un evento de lluvia de gran magnitud (98,4 mm) pero con baja escorrentía, debido a que la mayor parte de la lluvia pasó a recargar el suelo.

Durante el periodo de simulación también se encontraron algunas discrepancias durante el verano, pues el modelo subestima el caudal y predice una curva de recesión mayor que la observada.

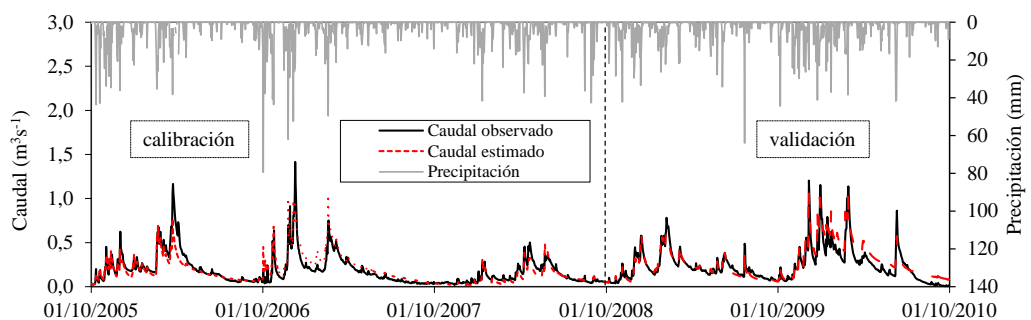


Figura 6.16. Caudal observado y estimado durante el periodo de calibración (octubre 2005 - septiembre 2008) y validación (octubre 2008 - septiembre 2010).

En algunas ocasiones, el pico de caudal simulado por el SWAT anticipa la respuesta de la cuenca, como sucede por ejemplo el 24 de noviembre de 2006 y el 5 de diciembre de 2006. Problemas similares han sido observados en otros estudios que utilizaron el SWAT (Bosch et al., 2004). Esto se debe a que en dichos días, las lluvias más fuertes se produjeron en las últimas horas del día y, aunque la cuenca del Corbeira tiene un tiempo de concentración pequeño (4,5 horas), la lluvia que cae al final del día genera picos de caudal al día siguiente. Sin embargo, el SWAT no tiene en cuenta la intensidad y la distribución de la precipitación y lleva a cabo todos sus cálculos en el intervalo fijo de un día, para cualquier tipo de proceso, ya sea escorrentía, flujo subterráneo o erosión.

En otros casos, el modelo no capturó picos de caudal, tales como los ocurridos el 15 de junio de 2006 y el 1 de agosto de 2009. Por el contrario, el modelo simuló picos de caudal no observados a la salida de la cuenca (ejemplo 30 de agosto de 2008). Estas discrepancias se atribuyen a la falta de concordancia puntual entre los datos de precipitación usados en la simulación hidrológica (procedentes de series de precipitación de Mabegondo) y los registrados en la cuenca, ya que esos picos corresponden a tormentas de verano, es decir, se deben a fenómenos meteorológicos de naturaleza local. La falta de representatividad de las estaciones meteorológicas empleadas en las simulaciones es una de las grandes limitaciones en las simulaciones hidrológicas (Bouraoui et al., 2002; Betrie et al., 2011).

La concordancia entre datos de caudal observados y simulados, no garantiza que las fracciones de volumen de agua debidas a escorrentía superficial, al flujo lateral y al flujo base sean las reales, pues el resultado de la simulación no es más que una combinación de parámetros, por lo que, diferentes combinaciones podrían proporcionar resultados similares (Beven, 1993; White y Chaubey, 2005). En este trabajo se utilizó el programa “base flow filter” (Arnold et al., 1995) para separar el flujo base del flujo del arroyo. El programa proporciona 3 valores distintos del flujo base, el primero denota el valor más alto, el tercero el más bajo y el segundo representa la media de ambos, siendo este último el que se consideró para esta cuenca. La figura 6.17 muestra la *separación de flujos* proporcionada por el SWAT, donde se pone de manifiesto el predominio del flujo base (68 % del flujo total) en la hidrología de la cuenca y la escasa importancia del flujo superficial. Numerosos estudios han mostrado que en cuencas bien vegetadas bajo clima templado húmedo, la escorrentía superficial es un fenómeno poco frecuente que sólo tiene lugar en áreas impermeables o bajo determinadas circunstancias y el flujo del arroyo es frecuentemente de origen basal (Hewlett y Hibbert, 1967; Jordan, 1994; Palleiro et al., 2013). Un seguimiento del caudal durante tres años hidrológicos (2004/05-2006/07) en la cuenca del Corbeira reveló que el flujo base supone el 75% del flujo total (Rodríguez-Blanco et al., 2012). Se observa, por tanto, que los resultados estimados por el SWAT (68%) se aproximan a los referidos por

dichos autores, mostrando que el SWAT es capaz de diferenciar los distintos tipos de flujo que ocurren en este sistema.

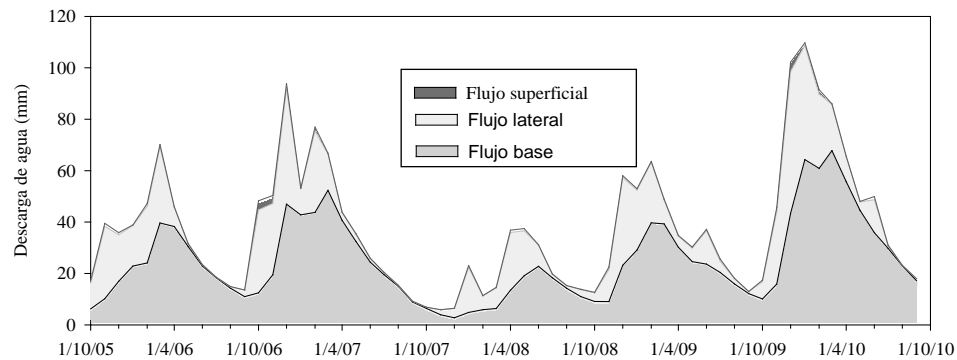


Figura 6.17. Diferentes tipos de flujo simulados por el SWAT.

Un parámetro de gran importancia en las simulaciones hidrológicas es el contenido de agua del suelo. El modelo SWAT calcula el balance diario de agua del suelo, actualizando diariamente la cantidad de agua almacenada en cada horizonte del suelo para cada URH, aunque los datos de salida proporcionados por el modelo se refieren al conjunto del perfil del suelo, no a cada horizonte.

Se sabe que la dinámica del contenido de agua del suelo constituye un elemento clave en el comportamiento hidrológico y sedimentológico de una cuenca, pues afecta tanto a los procesos hidrológicos, especialmente a la infiltración y a la evapotranspiración (Castillo et al., 2000) como a la erosión (Seeger et al., 2004). En la cuenca del Corbeira, el contenido de agua del suelo presenta un destacado contraste estacional (figura 6.18). El hecho de que la precipitación en esta zona sea abundante no es un inconveniente para que durante los meses estivales el contenido de agua del suelo descienda marcadamente, aunque sin alcanzar el déficit hídrico. Son varios los factores que están implicados en este comportamiento. Durante el verano se reduce la cantidad de precipitación en relación a otras estaciones (146 mm de promedio de junio a septiembre) y se eleva la evapotranspiración potencial (ETP), pues de los 647 mm de ETP media anual, 335 mm (el 50%) se registraron en esos cuatro meses.

La figura 6.18, en la que se compara el contenido de agua del suelo simulado por el SWAT con el calculado por el método MAFF (se utilizó este método de cálculo por carecer de datos medidos en la cuenca), revela tendencias similares entre ambos métodos de estimación. Por lo tanto, los resultados proporcionados por el SWAT podrían ser utilizados en futuros estudios para mejorar el conocimiento del funcionamiento hidrológico de la cuenca, pues, como se indicó anteriormente, hasta la fecha no se dispone de datos experimentales de esta propiedad de los suelos en la cuenca del Corbeira.

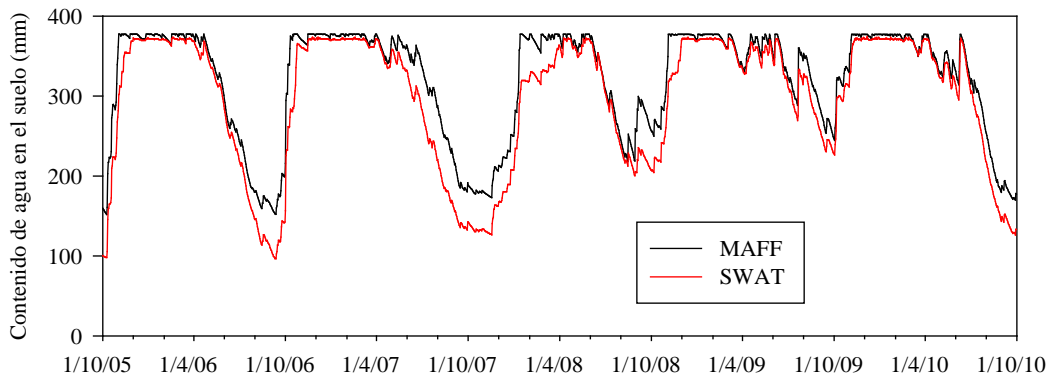


Figura 6.18. Comparación del contenido diario de agua del suelo calculado por el método MAFF y simulado por el SWAT.

6.3.2.2. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

La calibración y la validación de la producción de sedimentos se realizó a *escala mensual*. Los resultados de los estadísticos (tabla 6.9) revelan que el SWAT simula adecuadamente el comportamiento mensual de los sedimentos en la cuenca del río Corbeira, tanto en el periodo de calibración como en el de validación, siendo este último el que presenta valores más elevados de todos los estadísticos. También se aprecia que la desviación respecto a la media y al rango de los valores observados es relativamente pequeña, de lo que se deduce que el SWAT sobrestima ligeramente la producción de sedimentos.

Tabla 6.9. Estadísticos de la calibración y validación de los datos mensuales de sedimentos.

| Parámetro | Calibración | Validación |
|-----------------------------|--------------------|--------------------|
| R ² | 0,67 | 0,84 |
| BIAS (t) | -0,68 | -2,40 |
| NS | 0,48 | 0,50 |
| Media y rango observado (t) | 11,50 (0,20-52,60) | 20,20 (0,01-94,30) |

Los valores de los estadísticos muestran peores resultados que los del caudal (tabla 6.8), debido probablemente a que el SWAT calcula la descarga de sedimentos usando los datos de salida del módulo hidrológico, de modo que las desviaciones en la simulación de caudal se agregan al módulo de sedimentos, hecho señalado también por Phomcha et al. (2011), entre otros. En esta cuenca, las peores simulaciones de sedimentos ocurrieron en el intervalo más húmedo del año hidrológico 2006/07. Este año, caracterizado por ser extremadamente húmedo, ya creó algunos problemas en la estimación del flujo, circunstancia que apoya la idea anteriormente mencionada.

La estimación de la producción de sedimentos presentó ciertas dificultades para determinados meses (figura 6.19). Por ejemplo, en enero de 2008 el modelo estima una producción de sedimentos muy baja. Sin embargo, Rodríguez-Blanco et al. (2013a) encontraron que la mayor parte de la carga de sedimentos transportada en enero en esta cuenca procede de un evento de gran magnitud. Estos hechos indican que el SWAT no simula adecuadamente un alto transporte de sedimentos durante eventos de escorrentía.

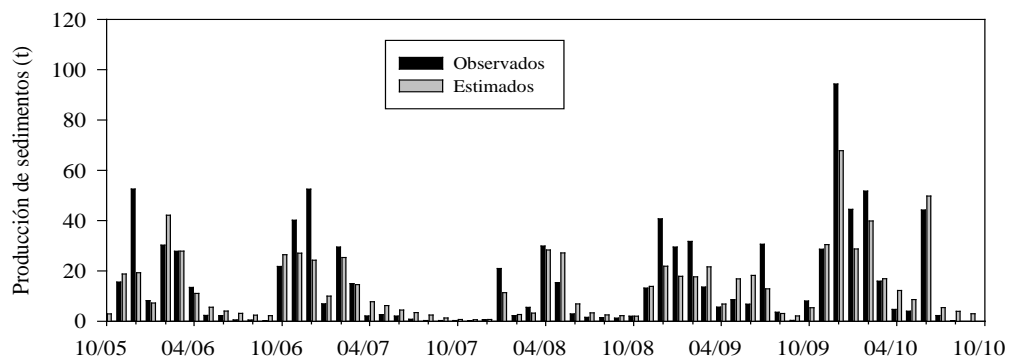


Figura 6.19. Valores mensuales observados y estimados de producción de sedimentos.

Para modelar con mayor precisión el comportamiento de los sedimentos sería conveniente realizar las simulaciones a una escala de tiempo inferior a la diaria dado que el tiempo de respuesta de la cuenca es corto (< 5 horas). En la figura 6.20 se muestra la evolución de los contenidos de sedimentos durante una serie de eventos representativos en términos de caudal y concentración de sedimentos. Se aprecia que las concentraciones de sedimentos pasan de 5 a 850 mg L^{-1} en menos de 3 horas, y una vez alcanzado el pico descienden rápidamente a sus valores iniciales (menos de 12 horas). El modelo SWAT, que trabaja a *escala diaria*, no puede reproducir apropiadamente este comportamiento (figura 6.21). Aun así, los resultados de los estadísticos (tabla 6.10), de acuerdo con los criterios propuestos por Moriasi et al. (2007) indican que la simulación es adecuada, especialmente en el periodo de validación, alcanzando valores más elevados que los frecuentemente encontrados en la bibliografía en cuencas de mayor tamaño (Santhi et al., 2001; Oeurng et al., 2011), donde las oscilaciones en las concentraciones de sedimentos suelen ser menos acusadas y, a priori, se esperarían mejores resultados.

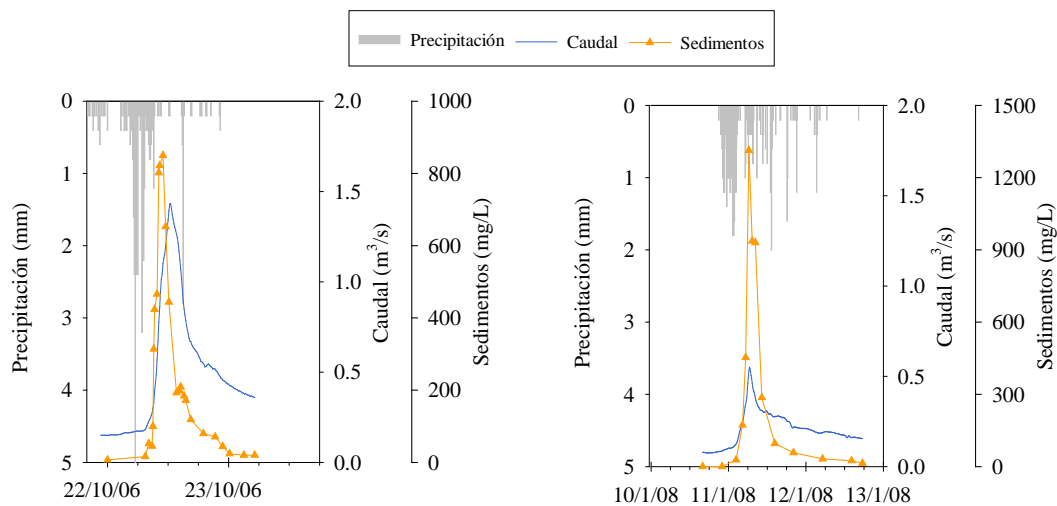


Figura 6.20. Evolución temporal de las concentraciones de sedimentos durante eventos de escorrentía.

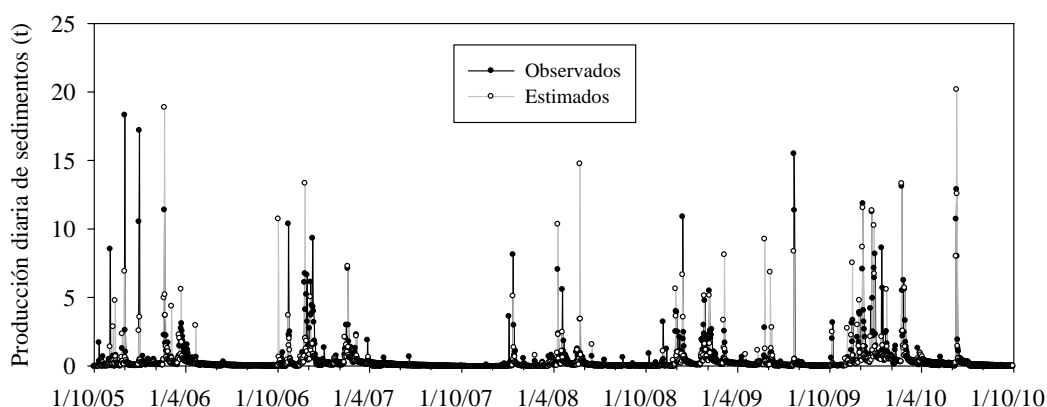


Figura 6.21. Valores observados y estimados de producción diaria de sedimentos.

Tabla 6.10. Estadísticos de la calibración y validación de los datos diarios de producción de sedimentos

| Parámetro | Calibración | Validación |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|
| R^2 | 0,34 | 0,62 |
| BIAS (t) | -0,028 | -0,195 |
| NS | 0,26 | 0,59 |
| Rango y media observada (t) | 0,38 (0,00-18,34) | 0,66 (0,00-15,55) |

Las dificultades en el uso del modelo SWAT para estimar el transporte de sedimentos también se plantearon en otros lugares. Por ejemplo, Benaman et al. (2005) usando datos de eventos en la cuenca Cannonsville (New York), concluyeron que el modelo tiende a subestimar la producción en eventos con cargas elevadas de sedimentos. Tolson y Shoemaker (2007) también constataron una subestimación de los valores pico, aunque las tendencias mensuales se reprodujeron adecuadamente.

El módulo de erosión empleado en el modelo, es decir, la MUSLE, ha sido ampliamente criticado, entre otras muchas causas por ser un modelo empírico (Boardman et al., 2006; Panagopoulos et al., 2011, Phomcha et al., 2011). Además, el SWAT considera que todo el suelo erosionado por escorrentía alcanza directamente el arroyo, es decir, no tiene en cuenta los procesos de deposición de

sedimentos dentro de la cuenca. Estos fenómenos, sin embargo, son importantes en la cuenca del río Corbeira (Rodríguez-Blanco et al., 2013a). Por ejemplo, estos autores constataron que durante el invierno de 2008 sólo un 22% del suelo erosionado en los terrenos de cultivo alcanzó la red de drenaje, en este caso los sedimentos quedaron retenidos en las mismas parcelas que los generaron o en parcelas contiguas con densa vegetación e incluso en las cunetas. Estos mismos autores encontraron que la deposición de sedimentos pierde importancia especialmente cuando existe una buena conectividad entre el área fuente de sedimentos con el cauce.

Por otra parte, el SWAT, como la mayoría de los modelos determinísticos, no simula sucesos inesperados, tales como la entrada de ganado o maquinaria en el cauce, lo que ocasiona un fuerte incremento de la carga de sedimentos en el río.

En términos generales se puede indicar que la producción de sedimentos predicha por el modelo se aproxima bastante bien a los datos medidos (figura 6.22). El modelo SWAT predijo una producción media de 170 t/año (10,5 t/ km² año) para las condiciones existentes. Este resultado es comparable con la *exportación* media *anual* observada a la salida de la cuenca (11 t/ km² año), sugiriendo que para simulaciones a largo plazo el modelo predice satisfactoriamente la exportación de sedimentos de la cuenca objeto de estudio.

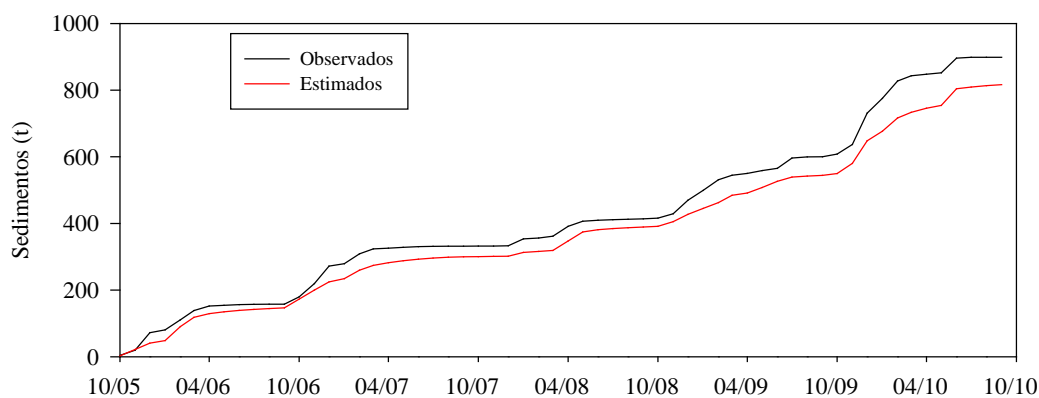


Figura 6.22. Sedimentos estimados acumulados frente a los sedimentos observados.

Dado que el modelo predice con bastante fiabilidad la exportación de sedimentos en la cuenca del río Corbeira durante largos periodos de tiempo, se puede pensar en utilizar dichos resultados para estimar pérdidas de fósforo en dicha cuenca, puesto que este elemento se transporta mayoritariamente en forma particulada y mantiene fuertes correlaciones con las concentraciones de sólidos en suspensión (Rodríguez-Blanco et al., 2013b, c). Los datos de la figura 6.23 muestran que la exportación de fósforo particulado, obtenida a partir de la producción de sedimentos simulada, y de la relación existente entre los valores anuales de fósforo particulado y los sedimentos medidos, reproduce la tendencia de la exportación de fósforo particulado medido. Sin embargo, los valores observados son superiores a los estimados, especialmente durante el año 2005/06, en el que la exportación de fósforo particulado excedió los valores del año hidrológico 2006/07, aun cuando la carga de sedimentos fue sustancialmente inferior (Rodríguez-Blanco et al., 2013a). Esto puede deberse a variaciones en la relación fósforo particulado/sedimentos, relacionadas con la naturaleza y el tamaño de los sedimentos.

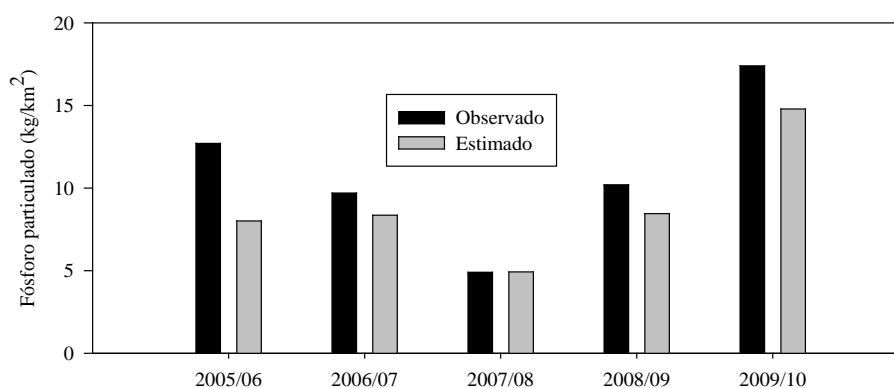


Figura 6.23. Fósforo particulado observado y estimado.

Con los resultados de las simulaciones de los periodos de calibración y validación, se pueden *identificar las áreas o URHs* donde la erosión del suelo fue más intensa, lo cual es de suma importancia a la hora de diseñar planes de manejo de la cuenca. La identificación de las zonas vulnerables a la pérdida de sedimentos o nutrientes es generalmente un tema complejo, ya que requiere considerar información topográfica, meteorológica e información sobre el tipo, uso y manejo

del suelo. EL SWAT considera el impacto de todos estos factores y resume sus influencias generando mapas extraordinariamente útiles que, aunque no permiten estimar el aporte de sedimentos y nutrientes a los cuerpos de agua, al menos proporcionan una visión de la erosión generada en distintas zonas de la cuenca.

Las tasas de producción de sedimentos oscilaron entre valores próximos a 0 y 3,09 t/ha año (figura 6.24). Estas tasas son relativamente bajas en comparación con otras áreas de clima templado húmedo (Govers, 1991; Valcárcel et al., 2003; Casalí et al., 2008; Taboada-Castro et al., 2010), lo que concuerda con la baja actividad agrícola y la escasa escorrentía superficial registrada en la cuenca. Todas las URHs produjeron una baja pérdida de suelo (0-5 t/ha año), es decir, valores muy inferiores a la tasa tolerable de erosión del suelo fijada habitualmente en 11,2 t/ha año (Montgomery, 2007).

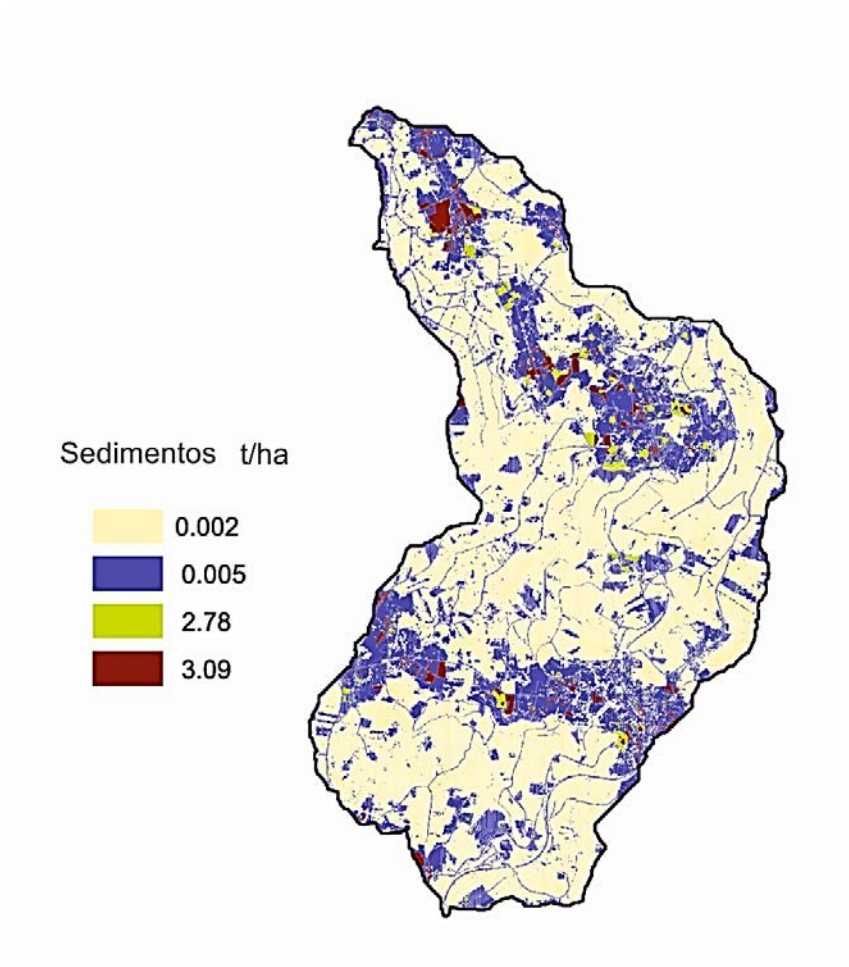


Figura 6.24. Distribución espacial de la producción media anual de sedimentos.

Los valores más bajos de producción de sedimentos se registraron en las zonas forestales y en las praderas, en tanto que los valores más elevados se obtuvieron en las zonas de cultivo, en donde se excedió ligeramente la tasa de formación del suelo para las condiciones que prevalecen en Europa (1,4 t/ha año: Alexander, 1988). Las tasas medias de producción de sedimentos proporcionadas por el modelo fueron de 3,09 t/ha para las zonas dedicadas a maíz y de 2,78 t/ha para las áreas con cereal de invierno.

Las áreas agrícolas frecuentemente constituyen las zonas con mayores tasas de erosión en cuencas de uso mixto del suelo (Somura et al., 2012), aunque ello no implica necesariamente que dichas áreas constituyan la principal fuente de sedimentos en las cuencas. Por ejemplo, Somura et al. (2012) obtuvieron las mayores tasas de erosión en áreas agrícolas, si bien las áreas forestales contribuyeron con el mayor aporte de sedimentos (63%), debido a que representan el 80% del área total de la cuenca. En nuestro caso, aunque las áreas forestales representan el 65% del área sólo contribuyen a una pequeña proporción de los sedimentos aportados a la red de drenaje (figura 6.25).

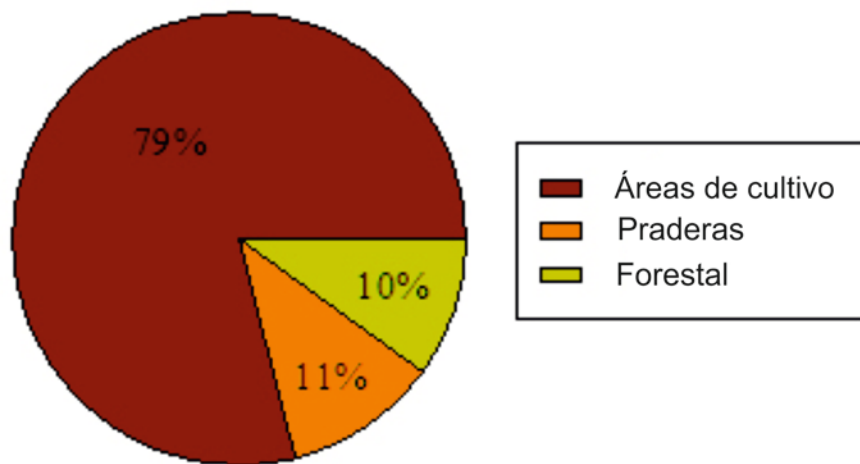


Figura 6.25. Proporción de producción de sedimentos para cada uso del suelo.

Las simulaciones están en línea con los resultados de estudios de erosión por flujo concentrado realizados en la cuenca durante el periodo elegido para las simulaciones, pues también señalan a las áreas de cultivo como las principales fuentes de sedimentos y de fósforo (Rodríguez-Blanco et al., 2010a, d),

especialmente cuando se hallan desprovistas de vegetación. Las actividades de manejo del suelo encaminadas al cultivo de maíz, dejan la superficie del suelo desprovista de cobertura vegetal durante buena parte del año, coincidiendo con el periodo más lluvioso, y por tanto, favorecen los procesos de erosión. En la figura 6.26 se ilustra la ubicación de parcelas con surcos y cárcavas efímeras, las cuales debido a su buena conectividad con la red de drenaje aportaron elevadas cantidades de sedimentos al río, por lo que se pueden considerar áreas fuente de sedimentos (zonas de una cuenca hidrográfica donde se genera toda o gran parte del sedimento exportado por ésta al exterior).

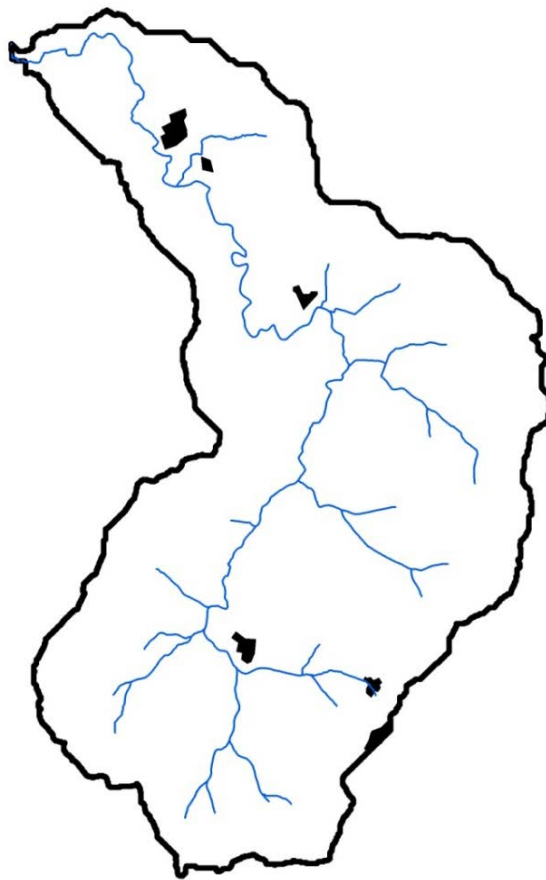


Figura 6.26. Ubicación de las principales parcelas agrícolas que actúan como fuente de sedimentos en la cuenca del río Corbeira.

6.3.2.3. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA CARGA DE NITRATOS

En muchas regiones europeas se constató que la pérdida del nitrógeno de terrenos agrícolas constituye un problema importante desde el punto de vista de

la contaminación de los recursos hídricos (Howden et al., 2009), y Galicia no es ajena a ello. Así, la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, 2001) considera esta región como zona de alto riesgo de eutrofización de suelos y aguas, siendo una de las pocas regiones europeas que presenta valores altos de N, asociados a emisiones de la actividad agropecuaria (> 100 kg/ha), y valores medios, asociados al uso de fertilizantes nitrogenados (50-100 kg/ha) (EEA, 2000). De hecho, Macías et al. (2003) detectaron un aumento en la concentración de N-NO₃ en numerosas zonas rurales pasando, según estos autores, en menos de diez años de 2-3 mg/L a 10-20 mg/L.

A pesar de que la cuenca del río Corbeira se aleja de la problemática comentada, pues posee una baja actividad agropecuaria y relativamente bajas concentraciones de nitratos en las aguas, se consideró interesante incluir los nitratos en este trabajo, con el fin de analizar con el SWAT, una vez calibrado y validado, el efecto de los diferentes usos del suelo sobre el aporte de nitratos a las aguas, así como la influencia de los distintos tipos de flujo en el transporte de nitratos. Dicha información es fundamental para el uso sostenible del suelo y para evaluar la efectividad de medidas de conservación sobre la calidad de las aguas.

La calibración de la carga de nitratos se efectuó a *escala mensual*. En la tabla 6.11 se presentan los estadísticos para las etapas de calibración y de validación, así como la media y el rango de los datos observados para ambas etapas. Los valores estadísticos revelan una satisfactoria adecuación de los datos simulados a los observados, tanto para la etapa de calibración como para la de validación y se aproximan al rango de valores dado por otros autores. Hu et al. (2007) simulando la carga mensual de N-NO₃ en una cuenca agrícola de Estados Unidos obtuvieron un NS de 0,51 en la calibración y 0,72 en la validación. Ullrich y Volk (2010) consiguieron un NS de 0,52 al emplear el SWAT en el análisis de la influencia de las estrategias de muestreo en la calibración del modelo. Sin embargo, la simulación de la carga de N-NO₃, igual que la de sedimentos, no es tan satisfactoria como la del caudal (tablas 6.8 y 6.9) debido a que los nitratos, igual que otros parámetros de calidad del agua, dependen de los procesos

hidrológicos y por tanto los errores en la simulación del caudal se magnifican en su simulación.

Tabla 6.11. Estadísticos de la calibración y validación de los datos mensuales de nitratos.

| Parámetro | Calibración | Validación |
|------------------------------|---------------|---------------|
| R ² | 0,52 | 0,54 |
| BIAS (kg) | 19 | 46 |
| NS | 0,50 | 0,53 |
| Media y rango observado (kg) | 607 (64-2039) | 788 (38-2397) |

En la figura 6.27 se representa la evolución temporal de los datos simulados y observados. Se aprecia que la carga de N-NO₃ simulada reproduce adecuadamente la tendencia de los datos medidos, excepto en el periodo otoño-invierno del año 2005/06 en el que los valores simulados son inferiores a los medidos. Esto último, podría estar relacionado con la falta de precisión en la simulación de determinados picos de caudal acaecidos en dicho periodo, explicación también dada por otros autores para justificar simulaciones insatisfactorias de N-NO₃ con el SWAT (Chu et al., 2004; Hu et al., 2007; Ferrant et al., 2011). Este resultado debe ser considerado como una debilidad del SWAT para realizar simulaciones de N-NO₃ a caudales elevados, sobre todo en arroyos pequeños como el Corbeira, debido a las acusadas variaciones que experimentan el caudal y las concentraciones de nutrientes durante los eventos de escorrentía (Pionke et al., 1999; Harmel et al., 2003; Rodríguez-Blanco et al., 2010a; 2012; 2013a, e).

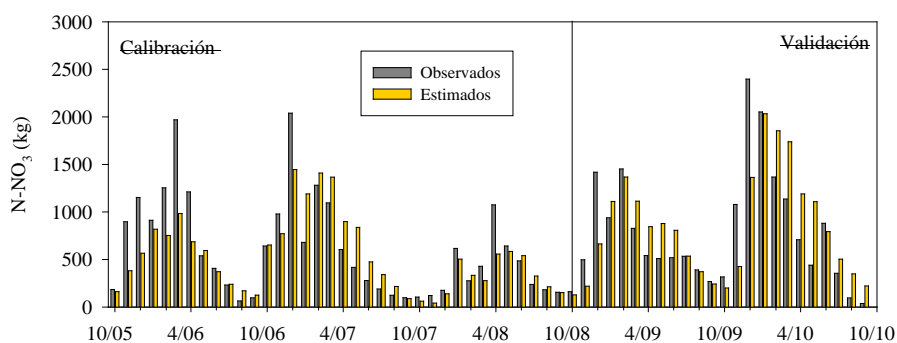


Figura 6.27. Comparación de la carga mensual de N-NO₃ observada y estimada.

De la agregación de los datos mensuales se deduce que la *exportación anual* de N-NO₃ es relativamente baja. Los valores simulados oscilaron entre 2,3 y 6,8 kg/ha, siendo el valor medio de 4,8 kg/ha, mientras que los valores medidos variaron entre 2,8 y 6,8 registrando un valor medio de 5,1 kg/ha.

En síntesis, el modelo simula la pérdida de N-NO₃ a escala mensual y anual con adecuada precisión, de modo que el SWAT podría constituir una herramienta útil para predecir el efecto de los cambios de uso del suelo y del clima sobre la exportación de N-NO₃. Su utilidad podría extenderse a la evaluación de planes de manejo dirigidos a la implementación de la Directiva Marco del Agua (EC, 2000) en la cuenca del Corbeira y en áreas con similares condiciones ambientales y geomorfológicas. Para tales fines, es imprescindible disponer de una estimación precisa de la carga de nutrientes, pues de lo contrario se incrementa la incertidumbre de los resultados de los modelos (Robertson, 1999; Ullrich y Volk, 2010), con la consiguiente repercusión en los planes de gestión ambiental. En la cuenca del Corbeira se constató que las cargas de N-NO₃, y especialmente las de fósforo particulado, presentan una amplia variabilidad en función de la técnica de muestreo, método de cálculo y periodo de evaluación. Se comprobó que los muestreos mensuales y quincenales subestiman ampliamente la carga, fundamentalmente la de fósforo particulado (Rodríguez-Blanco et al., 2013f). El uso de datos de cargas alejados de la realidad orientará la calibración del modelo hacia el ajuste incorrecto.

La distribución espacial de la exportación de nitratos simulados (figura 6.28) permite observar que las mayores pérdidas de N-NO₃ ocurren en las áreas de cultivo (17,6 kg/ha), las cuales superan en 1,2 y 9 veces a las de las praderas (13,5 kg/ha) y terrenos forestales (1,9 kg/ha), respectivamente, reflejando que la pérdida de N-NO₃ se incrementa con la intensidad del uso agrícola.

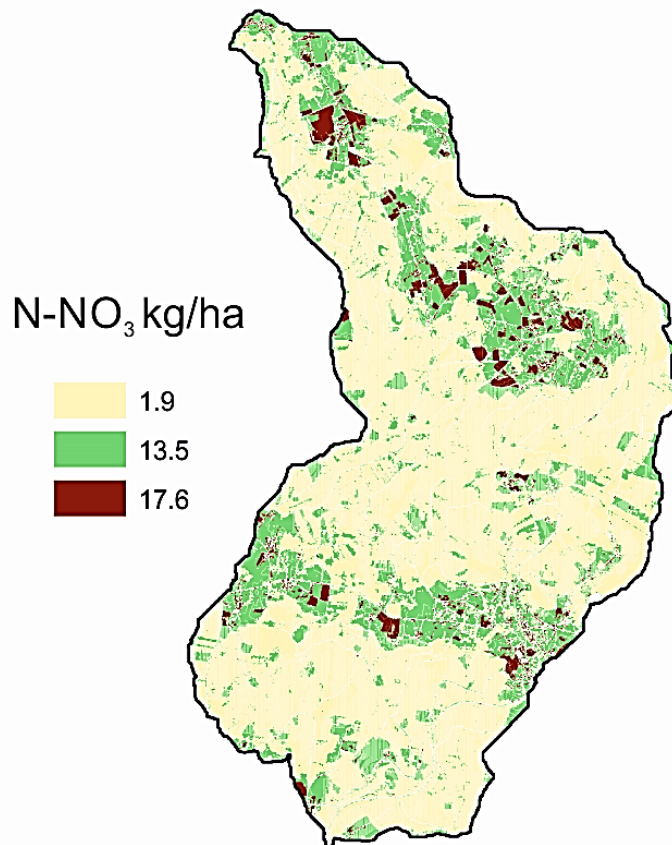


Figura 6.28. Distribución de la exportación media anual de N-NO₃ (simulada).

Cuando se analiza la contribución de los usos a la pérdida global de nitratos (figura 6.29), se observa que las tierras agrícolas (praderas y tierras de cultivo), a pesar de representar tan sólo un 30% del área de la cuenca, son las que más contribuyen a la exportación de N-NO₃ (77%), debido principalmente a que reciben un aporte de fertilizantes nitrogenados (mayoritariamente purín) considerablemente mayor que el de los terrenos forestales. Por lo tanto, las medidas encaminadas a reducir la pérdida de nitratos en la cuenca deben centrarse en las áreas agrícolas, especialmente en las praderas, por ser éstas la principal área fuente de N-NO₃ en la cuenca del Corbeira. Los resultados anteriores muestran que el SWAT es una herramienta útil para evaluar la distribución espacial de la exportación de N-NO₃ e identificar las áreas más sensibles a la contaminación por nitratos dentro de la cuenca.

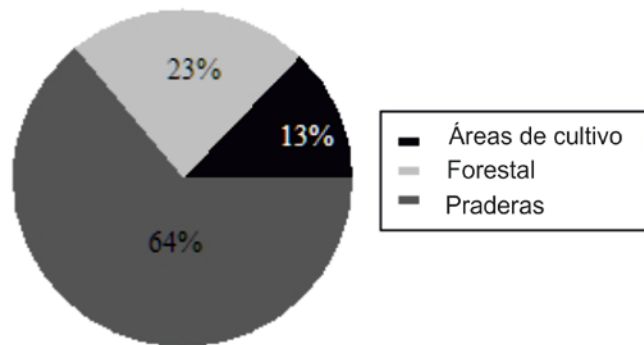


Figura 6.29. Proporción de N-NO₃ exportados por cada uso del suelo.

En la figura 6.30 se muestra la *contribución* de los diferentes *flujos* (superficial, lateral y subterráneo) a la carga total de N-NO₃ durante el periodo de simulación. Se aprecia que la mayor parte de las pérdidas de N-NO₃ ocurren en el flujo subterráneo (63%), lo que corrobora los resultados de estudios previos realizados en la cuenca, que cifraron la contribución del flujo base a la producción total de N-NO₃ en un 67% (Rodríguez-Blanco et al., 2013g). Igualmente, Bouraoui y Grizetti (2008) y Lam et al. (2012), entre otros, identificaron el flujo subterráneo como la principal vía de transporte de N-NO₃ en cuencas localizadas en zonas templado húmedas, mientras que la escorrentía superficial se considera la ruta de transporte predominante en áreas mediterráneas (p.e. Bernal et al., 2012). Por esta razón, las medidas de mitigación en Galicia deberían de centrarse principalmente en reducir la lixiviación de N-NO₃.

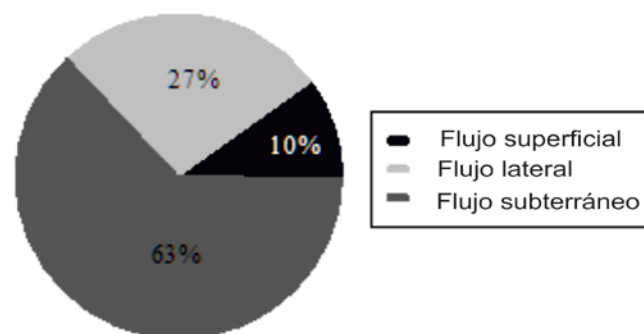


Figura 6.30. Contribución del tipo de flujo a la carga de N-NO₃.

6.4. VALORACIÓN DE LA UTILIDAD DEL GENERADOR CLIMÁTICO Y DE LA CALIBRACIÓN DEL SWAT PARA ANALIZAR ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Se evaluó la utilidad del generador climático del modelo SWAT con el objetivo de valorar su uso en las simulaciones de escenarios climáticos. Para ello, se ejecutó el modelo, usando el generador climático para las condiciones actuales (periodo de referencia 1981-2010), para simular la descarga de agua, producción de sedimentos y carga nitratos. Posteriormente, se compararon los resultados promedio anuales de estas simulaciones con los valores medidos (tabla 6.12). Los resultados de los indicadores estadísticos, interpretados de acuerdo con los criterios propuestos por Motovilov et al. (1999) y Moriasi et al. (2007), apuntan a que el rendimiento del modelo es satisfactorio, lo que indica que el generador climático del modelo SWAT puede ser utilizado con un grado de confianza razonable para analizar escenarios de cambio climático.

Tabla. 6.12. Estadísticos del rendimiento del modelo para la estimación de valores promedio anuales de descarga de agua, sedimentos y nitratos.

| Parámetro | Descarga de agua | Sedimentos | Nitratos |
|----------------|------------------|------------|----------|
| R ² | 0,86 | 0,55 | 0,60 |
| NS | 0,76 | 0,43 | 0,55 |

La validez de la calibración del modelo SWAT para escenarios de cambio climático es difícil de evaluar. Se realizó un esfuerzo para abordar esta cuestión calibrando y validando el SWAT durante un periodo de tiempo que incluye años secos, húmedos y muy húmedos, consiguiendo de este modo una calibración para un amplio rango de precipitaciones anuales. Sin embargo, este periodo no incluye todo el rango de condiciones de temperatura ni de concentraciones de CO₂ simuladas en los escenarios de cambio climático y, en consecuencia, la validez de la calibración bajo dichos escenarios no fue posible investigarla lo que constituye una limitación de esta metodología. No obstante, los indicadores estadísticos del

rendimiento del modelo (tabla 6.12) muestran que la aplicación del SWAT en la cuenca del Corbeira es robusta. En consecuencia, se puede aprovechar para investigar el impacto del cambio climático en la descarga de agua y en la producción de sedimentos y nitratos con un grado de confianza razonable, en particular, para trabajar a escala anual y estacional. El modelo también distingue el flujo base de la escorrentía superficial, por lo que cambios en estos flujos pueden ser evaluados con razonable confianza.

6.5. EVALUACIÓN DE LA INCIDENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA RESPUESTA HIDROSEDIMENTARIA Y EN LA CARGA DE NITRATOS

En este apartado se analiza la respuesta de la descarga de agua, sedimentos y nitratos bajo diferentes escenarios de cambio climático, que incluyen cambios en la temperatura, precipitación y concentración de CO₂ atmosférico. El procedimiento adoptado sigue la metodología empleada por Pruski et al. (2002a, b) y Nunes et al. (2008), entre otros.

Debido a las numerosas incertidumbres relacionadas con los múltiples factores que regulan el comportamiento del sistema climático, no es aconsejable utilizar un único escenario climático para caracterizar el clima futuro, sino que resulta más conveniente utilizar una gama de proyecciones que cubran un amplio espectro de incertidumbre. Por ello, en este trabajo, los escenarios usados para la simulación del cambio climático se han elaborado a partir del rango de predicciones recogidas en el proyecto ENSEMBLES para los periodos 2031-2060 y 2069-2098.

Los resultados de las simulaciones bajo escenarios de cambio climático indicarán la sensibilidad de la descarga de agua, sedimentos y nitratos a cambios en el clima, y a partir de ellos se pueden derivar tendencias con el fin de diseñar mecanismos de mitigación y adaptación al cambio climático.

6.5.1. PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO SEGÚN ENSEMBLES

En este apartado se presenta la recopilación de los cambios proyectados en las medias anuales y mensuales de temperatura y precipitación para los periodos 2031-2060 y 2069-2098 con respecto al periodo de referencia 1981-2010. Como se indicó en la sección de material y métodos, estos datos de precipitación y temperatura corresponden a los cambios proyectados para el área de estudio por los distintos modelos regionales anidados a modelos globales del proyecto ENSEMBLES.

Tal como se observa en la figura 6.31, las proyecciones de cambio climático presentan una amplia variabilidad en las *medias anuales* de temperatura y precipitación entre modelos. Todos predicen, en mayor o menor cuantía, un incremento de la temperatura y un descenso de las precipitaciones, proyectando los mayores cambios para el periodo 2069-2098. Así, para 2031-2060 predicen aumentos de temperatura comprendidos entre 0,4 y 1,8 °C y descensos en la precipitación desde -2 hasta el -14%, en tanto que para el periodo 2069-2098 señalan incrementos en la temperatura media anual comprendidos entre 1,6 y 3,9 °C y disminuciones de la precipitación entre el -6% y el -27%. Los valores promedio de todas las proyecciones utilizadas predicen un aumento de la temperatura de 1,1 °C y un descenso de la precipitación del -6% para el periodo 2031-2060 en relación con los valores de referencia, en tanto que para 2069-2098 se vaticina un incremento medio de 2,2 °C de la temperatura y una disminución del 14% de la precipitación respecto a los valores actuales.

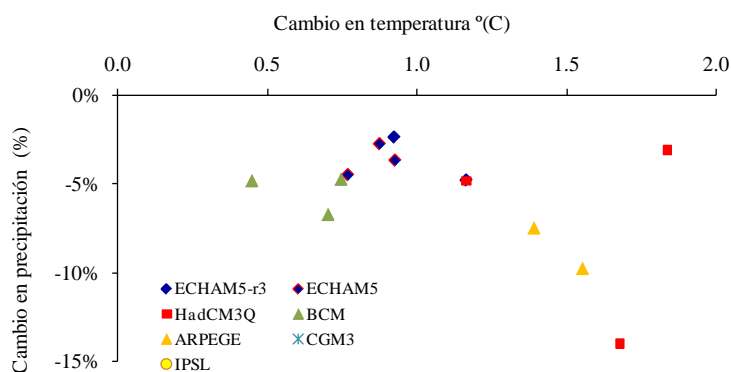


Figura 6.31. Rango de variación de las medias anuales de temperatura y precipitación. 2031-2060 (proyecto ENSEMBLES).

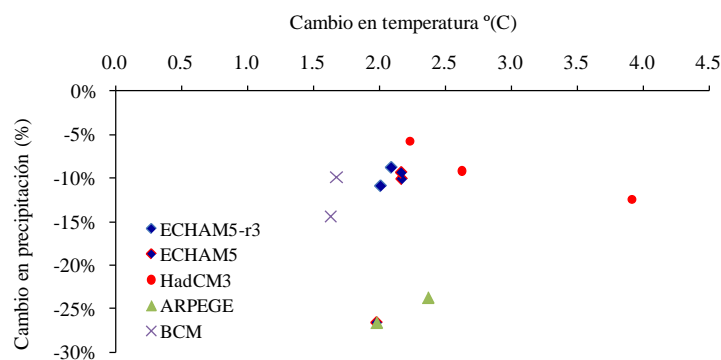


Figura 6.31. (Continuación) Rango de variación de las medias anuales de temperatura y precipitación. 2069-2098 (proyecto ENSEMBLES). Los símbolos identifican los distintos modelos globales.

En general, de las proyecciones mostradas, la que predice mayores aumentos de temperatura y descensos en las precipitaciones es el modelo HadCM3. El modelo BCM, proporciona incrementos de temperatura y descensos en las precipitaciones menos acusados. Los pronósticos de aumento de la temperatura o descenso de la precipitación son más uniformes entre las previsiones que comparten modelo global (señaladas en la figura 6.31 con el mismo símbolo) que entre las que comparten el modelo regional, observándose diferencias más acusadas para las previsiones que comparten el modelo HadCM3 (tabla 5.1, figura 6.31).

Las discrepancias son mayores para las precipitaciones que para las temperaturas. Esto se debe a que la presencia de precipitación, en cualquier lugar y momento, está ligada a procesos físicos que resultan difíciles de simular correctamente por los modelos. Por el contrario, los procesos que determinan la temperatura del aire están condicionados, entre otros factores, por la estacionalidad de la radiación solar que recibe el planeta a lo largo del año, cuyo cálculo se realiza con mucha menor incertidumbre.

En cuanto a los pronósticos *mensuales* se observa (excepto para diciembre en el periodo 2031-2060) una tendencia clara a la disminución de las precipitaciones más acusada para 2069-2098 que para 2031-2060 (figuras 6.32). Las mayores diferencias entre modelos, en ambos periodos, tienen lugar en invierno y especialmente en otoño, sugiriendo que el comportamiento previsto

para las precipitaciones en la zona de estudio presenta una alta incertidumbre, puesto que modelos que proyectan un déficit de precipitación muy acusado conviven con otros que proyectan un incremento en las precipitaciones. Por el contrario, todos los modelos predicen que la disminución de la precipitación será alta en primavera y en verano, es decir, durante el periodo más seco del año. En general, los veranos mostrarán disminuciones de menor entidad que las primaveras, pero debe tenerse en cuenta que los veranos son más secos que las primaveras, de forma que una disminución en torno al 40% significa una reducción de 20 mm al mes, lo que quiere decir que apenas lloverá en los meses más cálidos del año y de mayor actividad biológica. Es probable que la reducción de la precipitación en el área de estudio esté asociada tanto al descenso del número de días de lluvia como al incremento de ésta los días que llueve. En definitiva, estas previsiones son indicativas de una tendencia hacia una mediterraneización del clima con una mayor estacionalidad del régimen de precipitaciones, por lo que las sequías estacionales podrían incrementarse en un futuro. Todo ello, afectará a las respuestas y regímenes hidrológicos y, por tanto, a la producción de sedimentos y nutrientes.

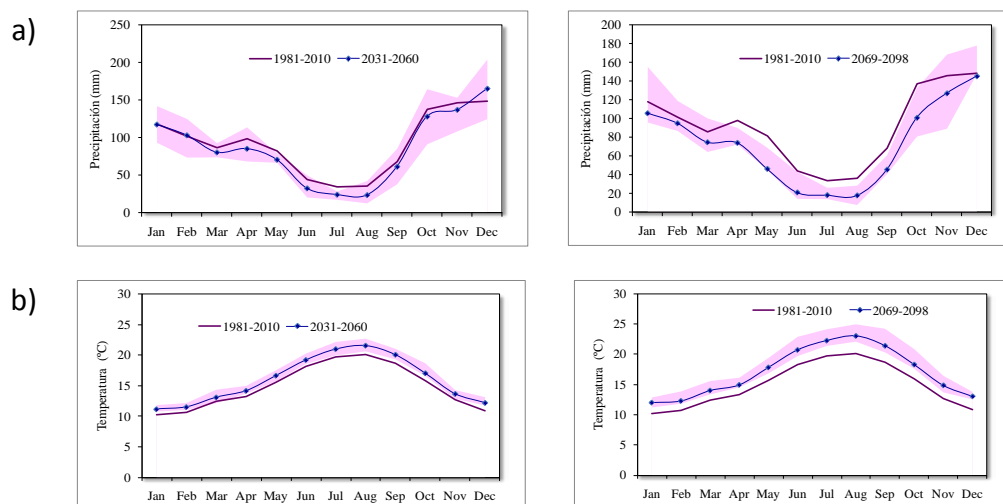


Figura 6.32. Precipitación (a) y temperatura (b) mensual en el área de estudio y proyecciones de cambio climático.

El área sombreada muestra el rango de las predicciones de los modelos climáticos. La línea representa la media.

En lo que respecta a las temperaturas, se prevé un incremento durante todo el año, más acusado para el periodo 2069-2098 (figura 6.32). Sin embargo,

estos incrementos no se repartirán por igual a lo largo del año, sino que alcanzarán más intensidad en verano, estación en la que en los casos más extremos, los incrementos de temperatura para el periodo 2069-2098 podrían superar 5°C. Estas previsiones confirmarían las tendencias observadas para Galicia (obtenidas con series de datos actuales), que señalan un incremento de 0,5 °C por década durante los últimos treinta años (Lago et al., 2006).

En síntesis, integrando la dinámica proyectada por los diferentes modelos para las dos variables climáticas analizadas, cabe esperar que en el área de estudio las primaveras y los veranos sean más secos y cálidos, lo que podría tener serias implicaciones en muchos sectores, tales como el agrícola o en el suministro de agua durante el verano. Esta circunstancia debería considerarse en futuros planes de manejo de la cuenca, así como en la gestión del embalse situado aguas abajo.

6.5.2. RESPUESTA DE LA DESCARGA DE AGUA, SEDIMENTOS Y NITRATOS A CAMBIOS INDIVIDUALES DE TEMPERATURA, PRECIPITACIÓN Y CO₂

La representación completa del cambio climático tiene dos componentes: emisión de CO₂ (y otros gases de efecto invernadero) y respuesta climática. El componente de emisión refleja la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera en un determinado periodo de tiempo, mientras que la respuesta climática hace referencia a las modificaciones del clima debidas a cambios en las concentraciones de CO₂. El impacto de estos dos componentes en la hidrología y en la producción de sedimentos y nitratos de una cuenca puede simularse en el SWAT conjuntamente o de forma independiente, bien simulando el efecto de un incremento en las concentraciones de CO₂ sobre el crecimiento de la vegetación y la evapotranspiración, o bien, simulando cambios en la precipitación y/o temperatura y/u otras variables climáticas representativas del supuesto incremento en las concentraciones de CO₂. La separación de los efectos del CO₂ atmosférico de la temperatura y precipitación facilita el análisis de sensibilidad de la respuesta hidrológica y, por consiguiente de la producción de sedimentos y nitratos a cambios en esas variables.

En este apartado se analiza la sensibilidad de la descarga de agua, sedimentos y nitratos a cambios individuales de temperatura, precipitación y concentraciones de CO₂, creando escenarios para cada una de las variables (en el próximo apartado se diseñan escenarios combinando variables). Los resultados de las simulaciones se discuten a escala anual y a escala estacional con de objetivo de conocer tanto las afecciones globales como las debidas a las variaciones estacionales de los parámetros climáticos.

6.5.2.1. RESPUESTA ANUAL

En la tabla 6.13 se presentan los escenarios de cambio climático para dos intervalos de tiempo (2031-2060, 2069-2098). Se crearon cuatro escenarios de temperatura, cuatro de precipitación y dos de CO₂, los cuales representan cambios en esas variables con respecto al periodo de referencia 1981-2010. Dos de los escenarios de temperatura y de precipitación se elaboraron considerando los valores medios de las proyecciones del proyecto ENSEMBLES y los otros dos a partir de los valores máximos. Los escenarios de CO₂ se obtuvieron multiplicando el nivel de referencia de CO₂ atmosférico (330 ppm) por un factor de 1,5 y 2,0 con el fin de representar las concentraciones de CO₂ estimadas para mediados y finales del siglo XXI.

Tabla. 6.13. Escenarios de cambio climático usados para evaluar la respuesta anual de la descarga de agua, sedimentos y nitratos.

| Escenario | Parámetro modificado | Magnitud del cambio |
|-----------|----------------------|---------------------------|
| 1 | Temperatura (°C) | 1,1 °C (Media 2031-2060) |
| 2 | Temperatura (°C) | 1,7 °C (Máxima 2031-2060) |
| 3 | Temperatura (°C) | 2,2 °C (Media 2069-2098) |
| 4 | Temperatura (°C) | 3,9 °C (Máxima 2069-2098) |
| 5 | Precipitación (%) | -6% (Media 2031-2060) |
| 6 | Precipitación (%) | -14% (Máxima 2031-2060) |

Tabla. 6.13. (Continuación) Escenarios de cambio climático usados para evaluar la respuesta anual de la descarga de agua, sedimentos y nitratos.

| Escenario | Parámetro modificado | Magnitud del cambio |
|-----------|----------------------|-------------------------|
| 7 | Precipitación (%) | -15% (Media 2069-2098) |
| 8 | Precipitación (%) | -27% (Máxima 2069-2098) |
| 9 | CO ₂ | 1,5 * 330 |
| 10 | CO ₂ | 2,0 * 330 |

6.5.2.1.1. RESPUESTA ANUAL DE LA DESCARGA DE AGUA

Los resultados de las simulaciones indican que se producirán cambios importantes en la descarga de agua, sedimentos y nitratos como consecuencia de los cambios en la temperatura, en la precipitación o en el CO₂ (figura 6.33). Se advierte un pronunciado descenso de la descarga de agua tanto con el incremento de la temperatura (se pierde una mayor cantidad de agua por evapotranspiración) como con la reducción de la precipitación, siendo los impactos, en ambos casos, más acusados en el periodo 2069-2098 que es el que registra mayores anomalías climáticas respecto a las condiciones actuales.

Para los escenarios 1 (1,1 °C) y 3 (2,2 °C), que consideran valores medios de temperatura, la descarga de agua se reduciría en torno al 13% en el periodo 2031-2060, elevándose dicha cifra hasta el 29% para el horizonte 2069-2098. Con respecto a las simulaciones que contemplan el descenso medio de precipitación, la disminución de la descarga de agua sería del orden del 9% en el periodo 2031-2060 (escenario 5) en tanto que para el periodo 2069-2098 (escenario 7) alcanzaría valores del 25%. Esto sugiere que la descarga de agua en la cuenca del Corbeira será más sensible al incremento promedio de las temperaturas que a la disminución media de las precipitaciones, destacando la importancia de la evapotranspiración en la respuesta hidrológica de la cuenca. Sin embargo, al establecer la comparación con los escenarios más desfavorables (escenario 4: T+3,9 °C, escenario 8: P-27%) se aprecia una mayor sensibilidad de la descarga de agua al descenso de precipitación (figura 6.33).

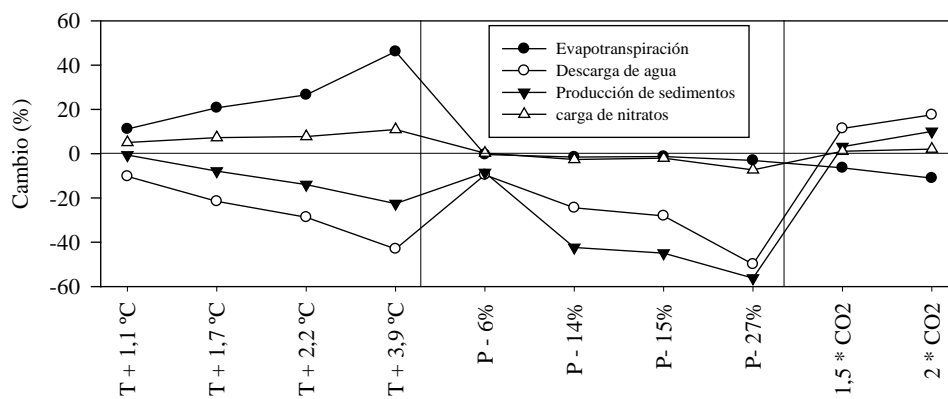


Figura 6.33. Respuesta de la evapotranspiración, descarga de agua, sedimentos y nitratos a cambios en temperatura (T), precipitación (P) y concentración de CO₂ atmosférico.

El aumento de la temperatura provoca incrementos en la producción de biomasa en algunos casos y descensos en otros, en función del tipo de cultivo (Pruski y Nearing, 2002b). Esto dependerá de las temperaturas alcanzadas en relación con las temperaturas óptimas, mínimas y máximas asociadas al crecimiento de las plantas. Los resultados de las simulaciones auguran, para la cuenca de estudio, aumentos en la biomasa forestal (65% del área total de la cuenca) y descensos en la producción de biomasa en las praderas y cultivos, asociados al incremento de temperatura (figura 6.34). Esto podría explicar el incremento de la evapotranspiración (2031-2060: 14, 21%; 2069-2098: 27, 46%), y el consecuente descenso de la descarga de agua a causa del aumento de la temperatura (figura 6.33).

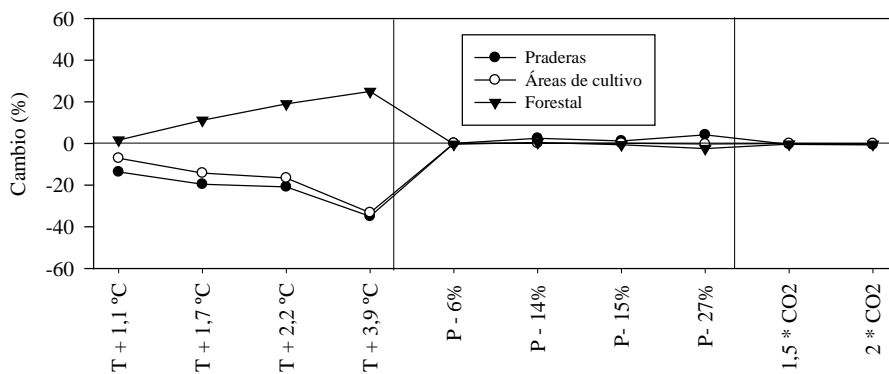


Figura 6.34. Respuesta de la biomasa vegetal a cambios en temperatura (T), precipitación (P) y concentraciones de CO₂ atmosférico.

Los cambios en las temperaturas y precipitaciones afectan de diferente modo a los componentes del flujo (figura 6.35). Así, mientras que el incremento de temperatura afecta fundamentalmente al flujo subsuperficial, debido a la pérdida de agua del suelo por evapotranspiración, el descenso de las precipitaciones ejercen más efecto en el flujo superficial. Esto explica la mayor sensibilidad del contenido de agua del suelo a cambios de temperatura (figura 6.35). Estos resultados difieren de los de Nunes et al. (2008) para la cuenca del Guadiana, en la que el flujo subsuperficial está más afectado por el descenso de las precipitaciones, debido a la escasa profundidad de los suelos. Los suelos de la cuenca de estudio, por el contrario, son profundos y favorecen el proceso de evapotranspiración, de ahí que el incremento de las temperaturas afecte principalmente al flujo subsuperficial. La modificación de las vías de flujo vendrá acompañada de modificaciones en los procesos de erosión y transporte de sedimentos y nitratos. La escorrentía superficial es la principal vía de transporte de sedimentos hacia la red de drenaje, mientras que el flujo subsuperficial constituye la ruta predominante de transporte de nitratos a los cursos fluviales en cuencas de clima templado húmedo (Pionke et al., 1999; Steegen et al., 2001; García-Ruíz et al., 2008; Rodríguez-Blanco et al., 2010c, 2013d).

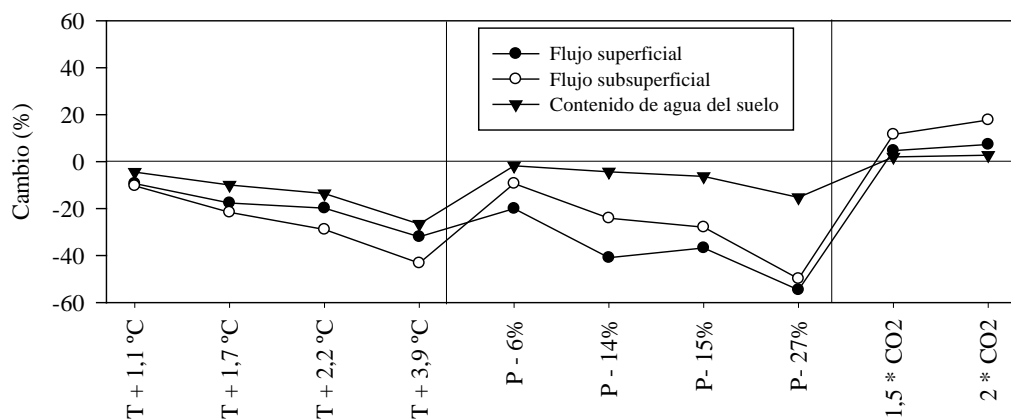


Figura 6.35. Respuesta de los diferentes tipos de flujo y contenido de agua en el suelo a cambios en temperatura (T), precipitación (P) y concentraciones de CO₂ atmosférico.

A la vista de las figuras 6.33 y 6.35 se aprecia que el descenso de la descarga de agua es más significativo que el de las precipitaciones, demostrando que no es

un proceso lineal. Se estima que por cada 1% de reducción en las precipitaciones se produce aproximadamente una disminución del 2% de la descarga de agua. Estos resultados se aproximan bastante bien a los de Pruski y Nearing (2002a), quienes analizaron el efecto de los cambios de precipitación en laderas agrícolas en diferentes regiones de Estados Unidos usando el modelo WEPP. Dichos autores evidenciaron un descenso de la escorrentía del 1,97% por cada 1% de descenso de las precipitaciones. En la misma línea, Nunes et al. (2008) señalaron descensos del 1,9 y 2,1% para las cuencas del Guadiana y Tajo, respectivamente.

La forma de modificar las precipitaciones, es decir, según se introduzcan cambios en la intensidad o en la frecuencia, influye en la respuesta hidrológica de una cuenca (Pruski y Nearing, 2002a; Nunes et al., 2008). Pruski y Nearing (2002a), entre las conclusiones de un trabajo dedicado a analizar la respuesta de la escorrentía y de la erosión a cambios en la precipitación, señalan que para dar cuenta de los cambios en la precipitación media, no basta con variar el número de días de precipitación, dado que esta metodología podría estar subestimando los posibles efectos del cambio climático sobre la escorrentía y, en consecuencia, sobre la erosión. Tampoco es suficiente con modificar la precipitación media que ocurre en un día húmedo (método más recurrido para reflejar los cambios de la precipitación anual o mensual), puesto que este método tiende a sobrestimar los efectos de las precipitaciones sobre la escorrentía y la erosión. Por tanto, sugieren que el escenario más realista es aquel en el que el 50% del cambio se realice mediante modificaciones en la cantidad media de precipitación que se produce en un día húmedo, y el otro 50% del cambio se ejecute a través de una permuta en el número de días húmedos. En este estudio se usó una metodología análoga a la empleada por Pruski y Nearing (2002a) con el fin de analizar la respuesta del flujo a cambios en las precipitaciones. Se comprobó que la forma de modificar las precipitaciones da lugar a diferentes cambios hidrológicos en la cuenca de estudio (figura 6.36). El descenso en la intensidad de las precipitaciones (figura 6.36 derecha) originará cambios más significativos en la escorrentía superficial que si la intensidad se mantiene constante (figura 6.36 izquierda).

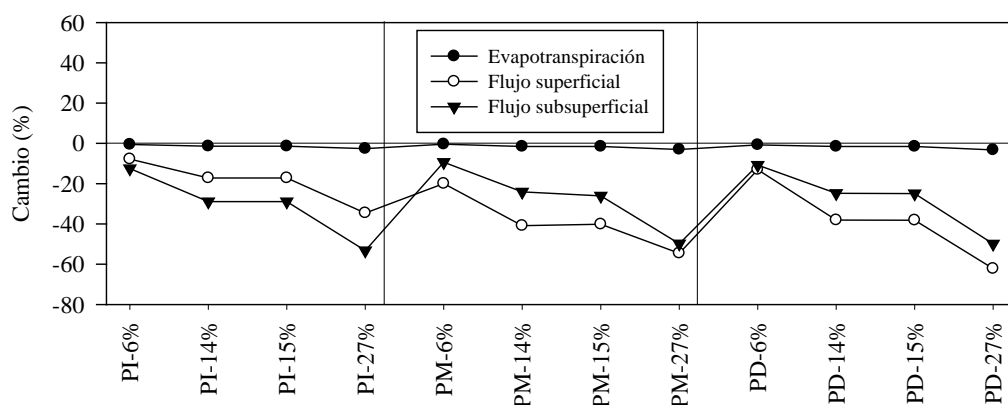


Figura 6.36. Respuesta de la evapotranspiración, flujo superficial y flujo subsuperficial a cambios en la precipitación.

(PI) intensidad constante, (PM) reducción de la intensidad al 50% del descenso de la precipitación, (PD) descenso de la intensidad a la misma tasa que la precipitación.

En lo referente al incremento en las concentraciones de CO_2 , se prevé que ocasione un aumento de la descarga de agua del orden del 10-15% (figura 6.33). El aumento en las concentraciones de CO_2 podría incrementar la productividad de la biomasa y la evapotranspiración (Rosenzweig y Hillel, 1998). Sin embargo, en este estudio no se observó ningún efecto sobre la productividad de la biomasa (figura 6.34), aunque si se constató un descenso en la evapotranspiración ($2 \times \text{CO}_2$: -11% evapotranspiración), lo que resulta en mayores niveles de humedad del suelo, y a su vez, en una mayor descarga de agua (figura 6.33). Esta reducción en la evapotranspiración podría estar relacionada con el cierre de los estomas de las plantas. Según la hipótesis de optimización de la conductancia estomática, los estomas maximizan la obtención de carbono y minimizan la pérdida de agua simultáneamente (Katul et al., 2009), es decir, como mecanismo de adaptación tienden a reducir la conductancia y a suprimir la transpiración bajo altas concentraciones de CO_2 (Collatz et al., 1992; Field et al., 1995). Esto conduciría a una mayor eficiencia, por los cultivos, del uso del agua (proporción de moléculas de CO_2 fijadas por la planta en relación al número de moléculas de agua perdidas por transpiración) (Chaplot, 2007; Gerten et al., 2007; Zhu et al., 2011, 2012), permitiendo que una mayor cantidad de agua esté disponible para la escorrentía y la recarga.

Por otra parte, el incremento en las concentraciones de CO₂ puede favorecer la tasa fotosintética. Este efecto, conocido como el efecto fertilizante del CO₂ (Ball et al., 1986), provocaría un mayor índice de área foliar de la vegetación (Betts et al., 1997; Felzer et al., 2009), lo cual podría reducir la radiación que alcanza la superficie del suelo, disminuyendo la evaporación del suelo (Hungate, 2002) y, en consecuencia, incrementando la descarga de agua (Alo y Wang, 2008). Sin embargo, Bunce (2004) en un trabajo de revisión concluye que un aumento en las concentraciones de CO₂ raramente conduce a incrementos en los índices de área foliar, salvo que la ventilación sea artificial, tal como ocurre en cámaras e invernaderos. Además, apunta a que el incremento en el índice de área foliar por encima de 3-4 m²/m², apenas afecta a la evapotranspiración como resultado del sombreado y del incremento de la humedad del dosel. Esta conclusión está basada en estudios de cultivos en los que los nutrientes no son factores limitantes, por lo que en los ecosistemas naturales cabe esperar una menor respuesta, ya que frecuentemente los nutrientes limitan la productividad de las plantas y, por tanto, su capacidad de respuesta al CO₂ (Ainsworth y Long, 2005).

6.5.2.1.2. RESPUESTA ANUAL DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

La producción de sedimentos se encontrará principalmente afectada por los cambios en la precipitación y, en menor medida, por la temperatura y la concentración de CO₂, observándose las mayores desviaciones respecto a los valores de referencia en el periodo 2069-2098 (figura 6.33). Se augura una reducción de la producción de sedimentos tanto con el incremento de la temperatura como con el descenso de las precipitaciones, con diferencias respecto a los valores actuales del orden del -1% al -14% para las simulaciones que consideran los incrementos medios de temperatura (escenario 1 y escenario 3) y del -9% al -42% en aquellas ejecutadas con las reducciones medias de las precipitaciones (escenario 5 y escenario 7). Las simulaciones realizadas bajo los supuestos de mayor descenso de la precipitación (escenario 6: P-14% y escenario 8: P-27%) muestran reducciones de la producción de sedimentos del orden del

40% para el periodo 2031-2060, alcanzando cifras del 56% para el horizonte 2069-2098. El aumento de las concentraciones de CO₂, por el contrario, ocasionará un ascenso en la producción de sedimentos (figura 6.33).

Los resultados anteriores, obviando las diferencias de magnitud, son similares a los obtenidos para la descarga de agua, no en vano la producción de sedimentos a la salida de la cuenca está frecuentemente influenciada por el flujo del arroyo (García-Ruiz et al., 2008; Mukundan et al., 2013), aunque esto no siempre sucede. Por ejemplo, Ficklin et al. (2010) al analizar la sensibilidad de la producción de sedimentos al incremento de las concentraciones de CO₂, advierten un descenso de la producción de sedimentos ligado al incremento de la descarga de agua. Este comportamiento lo atribuyeron a la reducción del factor de cobertura de la MUSLE asociada al incremento de residuos en el suelo con el aumento de CO₂, demostrando que el factor C de la USLE era el parámetro que ejercía mayor influencia en la estimación de la producción de sedimentos.

El transporte de sedimentos está fuertemente ligado a la erosión del suelo. En la cuenca de estudio, la erosión disminuirá como consecuencia del descenso de la cantidad e intensidad de las precipitaciones (figura 6.37). Por el contrario, se prevé que el incremento en las temperaturas provoque un aumento (11-17%) de las tasas de erosión en las zonas de cultivo, mientras que en las restantes superficies se mantendrán o disminuirán ligeramente. Ese incremento de la erosión en las zonas de cultivo podría deberse a la reducción de la biomasa vegetal, para la que se prevé un descenso comprendido entre el 7% y el 33% en función de los escenarios de temperatura considerados (figura 6.34). La reducción de la biomasa vegetal tiene un mayor efecto en la erosión que en la escorrentía, de ahí que las simulaciones estimen un incremento en la erosión, aun cuando la escorrentía disminuya. La erosión está afectada por el dosel de la vegetación (reduce el impacto de la energía de la precipitación), por los residuos del cultivo (protegen el suelo del impacto de las gotas de agua y drásticamente reducen la tasa de desprendimiento de las partículas del suelo y la capacidad de transporte de sedimentos), y por las raíces y los residuos en descomposición, que fijan

mecánicamente el suelo y proporcionan un medio para que prosperen los microorganismos.

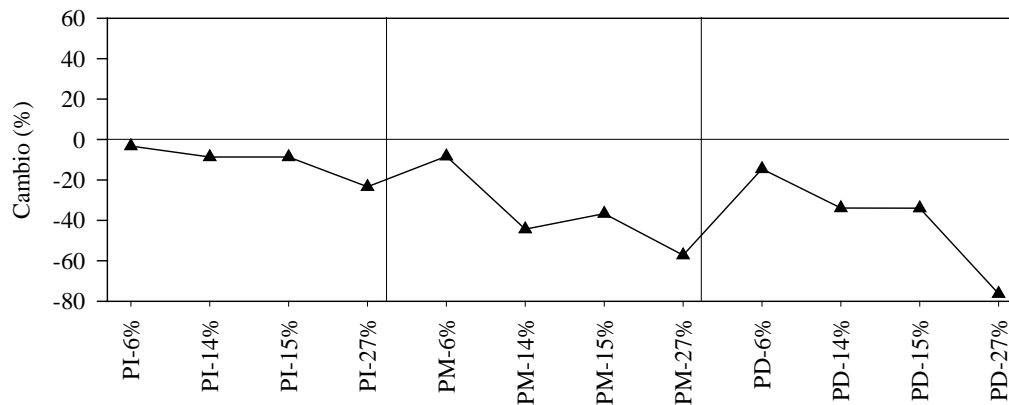


Figura 6.37. Respuesta de la erosión en los terrenos de cultivo a cambios en la precipitación. (PI) intensidad constante, (PM) reducción de la intensidad al 50% del descenso de la precipitación, (PD) descenso de la intensidad a la misma tasa que la precipitación.

A pesar de que se pronostica un ascenso en las tasas de erosión en las zonas de cultivo, principal área fuente de sedimentos en la cuenca de estudio (Rodríguez-Blanco et al., 2010c), sin embargo, se prevén reducciones en la producción de sedimentos como consecuencia del incremento de las temperaturas (figura 6.33).

La conectividad entre las áreas fuente de sedimentos y la red de drenaje desempeñan un papel crítico en el aporte de sedimentos al cauce fluvial (Steege et al., 2001; Rodríguez-Blanco et al., 2013a), de modo que la respuesta de la erosión del suelo y la producción de sedimentos a cambios en las variables climáticas no necesariamente van en la misma dirección. Así, Asselman et al. (2003) observaron un incremento en las tasas de erosión del 12%, pero no advirtieron un efecto significativo en la producción de sedimentos a la salida de la cuenca, a causa del limitado aporte de sedimentos. Por el contrario Syvitski et al. (2003) constataron un incremento tanto en las tasas de erosión como en la producción de sedimentos con el incremento de la temperatura, a causa de la buena conectividad entre las áreas fuente y la red de drenaje. En definitiva, es la combinación de los cambios en la capacidad de transporte y en las tasas de erosión, la que finalmente determina el flujo y la concentración de sedimentos en

el río. En la cuenca de estudio, el incremento de la temperatura reducirá la capacidad de transporte y aporte de sedimentos a través de la disminución de la escorrentía, lo que posiblemente resultará en una desconexión hidrológica entre algunas áreas de erosión y el cauce de río, dificultando el aporte de sedimentos al cauce. Por tanto, el efecto de una menor capacidad de transporte, prevalecerá sobre el de una mayor erosión en las áreas de cultivo. Aun así, las estrategias de gestión de la cuenca deberían encaminarse a minimizar la erosión del suelo en las zonas de cultivo, por ser ésta la principal fuente de sedimentos en la cuenca de estudio (Rodríguez-Blanco et al., 2010c).

6.5.2.1.3. RESPUESTA ANUAL DE LA CARGA DE NITRATOS

La variación en la carga de nitratos es menor que la prevista para la descarga de agua y sedimentos (figura 6.33), lo que indica que es menos sensible a los cambios en la precipitación, temperatura y concentración de CO₂ que la descarga de agua y sedimentos. Las simulaciones evidencian un incremento de la carga de nitratos, tanto con el aumento de la temperatura como de las concentraciones de CO₂, mientras que muestran una disminución asociada al descenso de las precipitaciones (figura 6.33). Esto demuestra que, salvo en las simulaciones ejecutadas con variaciones en la temperatura, la carga de nitratos mantiene la misma tendencia que la descarga de agua, como frecuentemente se indica en la bibliografía (Bouraoui et al., 2002; Martinková et al., 2011; Shrestha et al., 2012). Dado que la entrada de fertilizantes en las simulaciones se mantuvo constante en relación con las condiciones actuales, el incremento en la carga de nitratos con la temperatura, probablemente se deba a un mayor aporte desde las áreas agrícolas, a causa del descenso de la biomasa vegetal de praderas y cultivos (figura 6.34), así como al incremento de la mineralización del nitrógeno orgánico.

La mineralización del nitrógeno en el suelo depende de la naturaleza y abundancia de la materia orgánica y de la temperatura, humedad, pH y actividad microbiana. Es bien conocido que se incrementa con el contenido de materia orgánica y con la temperatura (Leirós et al., 1999), lo que conduce a la

acumulación de nitrógeno inorgánico en el suelo y a un mayor riesgo de lixiviación (Olesen y Bindi, 2002), siempre que el contenido de agua no limite la actividad microbiana (Zak et al., 1999). En el área de estudio, la precipitación anual es del orden de 1073 mm (1983/84-2009/10) por lo que el contenido de agua del suelo no debería ser limitante para la actividad microbiana y, por tanto, el incremento de la temperatura podría acelerar la transformación de nitrógeno desde formas orgánicas a inorgánicas. Otros autores, como por ejemplo Bouraoui et al. (2002) en la cuenca del río Yorkshire (Reino Unido) y Shrestha et al. (2012) en la cuenca del Assiniboine (Canadá), también atribuyeron el incremento en la carga de nitratos a la mineralización acelerada de la biomasa, si bien en todos estos casos, la carga de nitratos siguió la misma tendencia que el flujo.

6.5.2.2. RESPUESTA ESTACIONAL

Se analiza la influencia del cambio de temperatura y precipitación sobre la dinámica estacional de la descarga de agua, sedimentos y nitratos. Se lleva a cabo en base a las simulaciones realizadas a partir de los datos promedio de las proyecciones anuales y mensuales de cambio de temperatura o precipitación derivadas de los modelos del proyecto ENSEMBLES para los horizontes 2031-2060 y 2069-2098. Los escenarios elaborados se recogen en la tabla 6.14.

Tabla. 6.14. Escenarios de cambio climático usados para evaluar la respuesta estacional de la descarga de agua, sedimentos y nitratos.

| Variable | Escenarios | Anomalía considerada | E | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|---------------|-----------------------|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Temperatura | 1 T+ AMA 2031-2060 °C | Anomalía anual 2031-2060 (°C) | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 |
| | 2 T+AMM 2031-2060 °C | Anomalías mensuales 2031-2060 (°C) | 1,0 | 0,9 | 0,7 | 0,9 | 1,1 | 1,0 | 1,3 | 1,5 | 1,4 | 1,2 | 1,0 | 1,4 |
| | 3 T+AMA 2069-2098 °C | Anomalía anual 2069-2098 (°C) | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 |
| | 4 T+AMM 2069-2098 °C | Anomalías mensuales 2069-2098 (°C) | 1,8 | 1,6 | 1,6 | 1,7 | 2,2 | 2,5 | 2,6 | 3,0 | 2,7 | 2,5 | 2,2 | 2,2 |
| Precipitación | 5 P- AMA 2031-2060 % | Anomalía anual 2031-2060 (%) | -6 | -6 | -6 | -6 | -6 | -6 | -6 | -6 | -6 | -6 | -6 | -6 |
| | 6 P- AMM 2031-2060 % | Anomalías mensuales 2031-2060 (%) | -1 | 1 | -6 | -13 | -13 | -26 | -29 | -33 | -10 | -6 | -6 | -12 |
| | 7 P-AMA 2069-2098 % | Anomalía anual 2069-2098 (%) | -15 | -15 | -15 | -15 | -15 | -15 | -15 | -15 | -15 | -15 | -15 | -15 |
| | 8 P-AMM 2069-2098 % | Anomalías mensuales 2069-2098 (%) | -3 | -1 | -6 | -18 | -39 | -48 | -43 | -46 | -28 | -20 | -6 | -6 |

AMA: anomalía anual media, AMM: anomalías mensuales medias.

6.5.2.2.1. RESPUESTA ESTACIONAL DE LA DESCARGA DE AGUA

Las predicciones muestran una reducción importante, en términos porcentuales, de la descarga de agua en todas las estaciones, siendo este efecto especialmente acusado en verano y primavera, tanto al considerar los cambios en la temperatura como en las precipitaciones (figura 6.38). Para finales de siglo se prevén reducciones del orden del 35-38% en dichas estaciones, lo que pone de manifiesto la elevada sensibilidad de la descarga de agua a cambios en las variables climáticas.

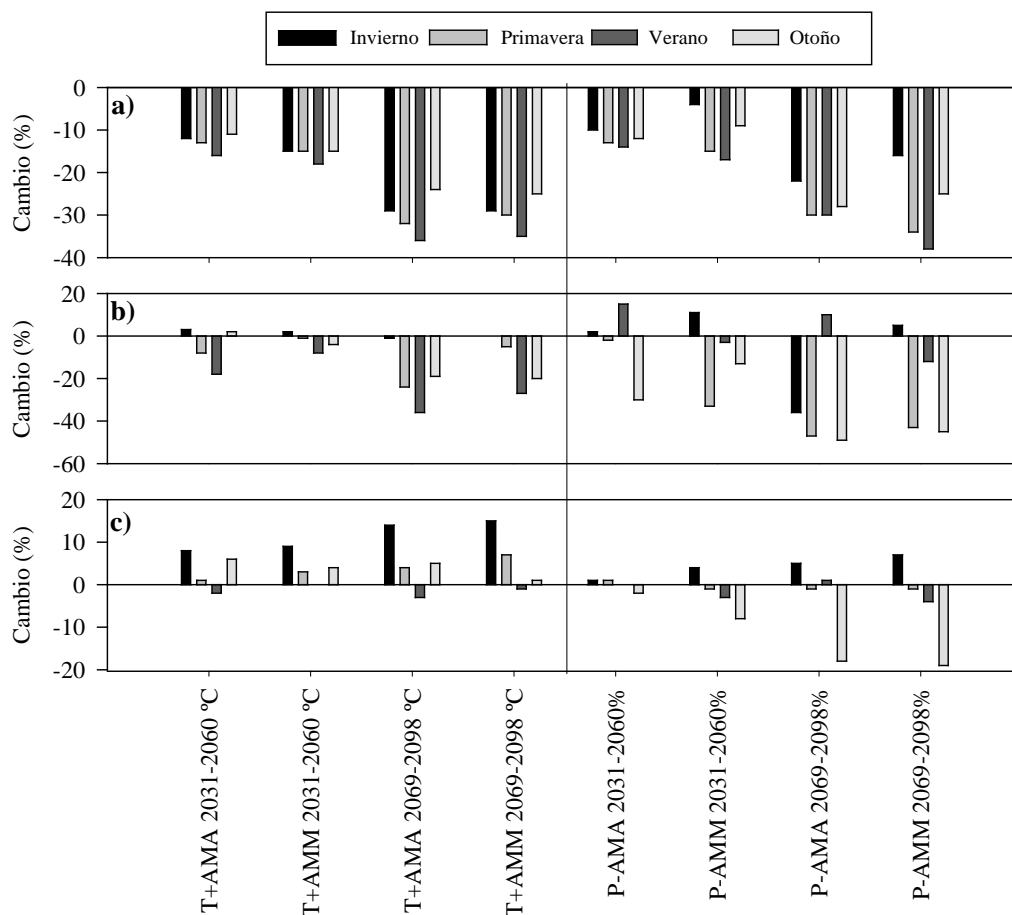


Figura 6.38. Impacto de los cambios de temperatura (T) o precipitación (P) en la descarga de agua (a), sedimentos (b) y nitratos (c) a escala estacional.

AMA: anomalía anual media, AMM: anomalías mensuales medias.

El incremento en la temperatura conducirá a una mayor evapotranspiración en todas las estaciones, lo que dará lugar a una disminución de la descarga. Los mayores incrementos porcentuales de evapotranspiración

tendrán lugar durante el otoño e invierno, es decir, durante el periodo más lluvioso del año en el área de estudio. Sin embargo, los valores absolutos más elevados de evapotranspiración se registrarán en verano y primavera, cuando las precipitaciones son más bajas, de ahí que se obtenga un mayor descenso de la descarga de agua durante dichas estaciones. Un aumento de las temperaturas incrementará la necesidad hídrica de las plantas y, por tanto, el consumo de agua, sobre todo en los meses de verano.

Cuando se modifican las precipitaciones mensuales a lo largo del año (escenario 6 y escenario 8), la tendencia a la reducción de la descarga de agua parece estar relacionada con la disminución de la precipitación, cuyo descenso es muy superior en primavera y verano frente al de otoño e invierno (tabla 6.14). El descenso de las precipitaciones, aún en los casos más desfavorables, no afectará a la evapotranspiración en ninguna de las estaciones, dado que la producción de biomasa apenas se verá modificada ($\pm 1\%$). Esto podría sugerir que, bajo los escenarios simulados de cambio en las precipitaciones, el agua disponible en el suelo excede los requerimientos de la vegetación. De hecho, dichas simulaciones no señalan un incremento en el estrés hídrico de la vegetación en ninguna estaciones.

En todas las estaciones existe una tendencia al incremento de biomasa en la zona forestal asociada al aumento de la temperatura (datos no mostrados), lo que en parte podría justificar el incremento en la evapotranspiración. En la actualidad, las principales limitaciones estacionales para el cultivo del eucalipto en Galicia, principal especie forestal en la cuenca del Corbeira, son las bajas temperaturas y las heladas (Fernández, 1994. Ruiz et al., 2008). El aumento de temperatura y, en consecuencia la disminución del riesgo de helada, incrementa la productividad, especialmente en primavera. En verano la tasa de crecimiento de la biomasa es inferior a la de otras estaciones, lo que podría asociarse a una limitación por agua o nutrientes. Sin embargo el modelo, bajo estos escenarios, solo estima un leve incremento en el número de días con estrés hídrico.

La biomasa anual en las zonas de cultivo, como se ha indicado anteriormente, tiende a reducirse con el aumento de las temperaturas (figura

6.34). Sin embargo, a escala estacional, se pronostica un incremento durante la primavera que no alcanza a compensar las reducciones previstas en las demás estaciones. Dicho incremento podría relacionarse con la anticipación del periodo de crecimiento a causa del calentamiento del clima (figura 6.39). De hecho, en los últimos años se ha constatado un adelanto en la floración y en la maduración del maíz en distintas zonas de Galicia, como muestran los datos recopilados por Rial et al. (2009) acerca del impacto del cambio ambiental sobre la fenofase de algunas especies vegetales. Es conocido que el incremento de la temperatura, siempre dentro del rango 10-30°C, acelera la tasa de desarrollo y permite que el maíz complete sus etapas fenológicas en menos tiempo (Meza et al., 2008). Sin embargo, por encima de 30°C podrían aparecer problemas en la actividad celular y disminuir la capacidad de absorción de las raíces, por lo que el estrés por temperatura podría ayudar a explicar el descenso de la productividad durante el verano. En este caso no se pronostica que existan limitaciones de agua a pesar de las elevadas necesidades de agua del cultivo durante la fase de crecimiento (300-500 mm). Por último, ante el incremento de la temperatura se proyecta un descenso de la biomasa de las praderas en todas las estaciones (datos no mostrados).

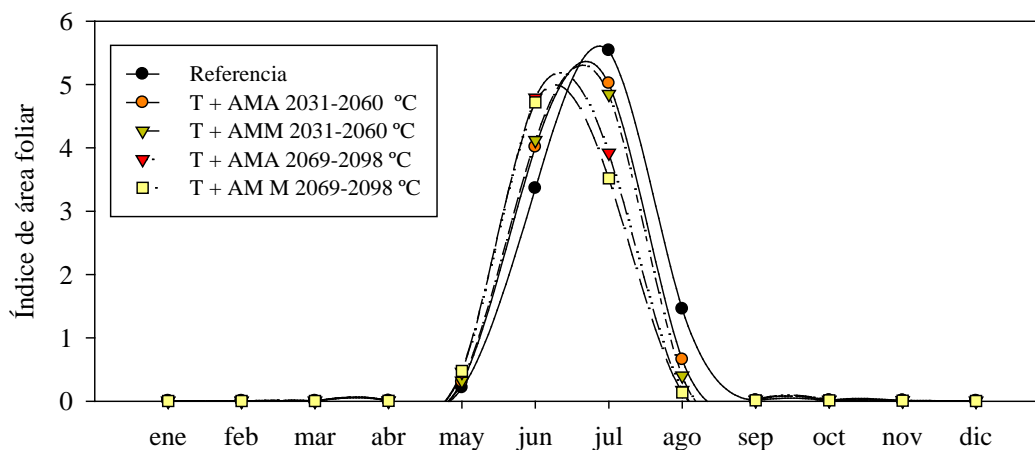


Figura 6.39. Variación en el índice de área foliar del maíz en las simulaciones estacionales que consideran incremento en la temperatura respecto al escenario de referencia. AMA: anomalía anual media, AMM: anomalías mensuales medias.

6.5.2.2.2. RESPUESTA ESTACIONAL DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

El modelo muestra un descenso de la producción de sedimentos en todas las estaciones excepto en invierno, tanto al considerar cambios en la temperatura como en las precipitaciones, debido fundamentalmente a la disminución de la descarga de agua (figura 6.38). Sin embargo, se observa una tendencia distinta en la respuesta de los sedimentos según se produzcan cambios en la temperatura o en la precipitación, lo que demuestra que estas variables afectan de distinto modo a los procesos de escorrentía y erosión.

Las simulaciones que contemplan cambios en las precipitaciones revelan que los descensos más importantes ocurren en primavera y en otoño, es decir en las estaciones en las que se produce una mayor reducción de volumen de precipitación (en términos absolutos), disminuyendo su poder erosivo. Por el contrario, cuando se modifica la temperatura los descensos de producción de sedimentos más acusados tienen lugar en verano, siguiendo la misma tendencia que la descarga de agua. Sin embargo, esta reducción tiene poco efecto en la producción anual, puesto que la descarga de sedimentos en verano sólo representa un pequeño porcentaje (2%) de la producción total de sedimentos.

Las simulaciones de los escenarios que introducen cambios en las precipitaciones a lo largo del año, muestran un incremento en la producción de sedimentos durante el invierno previsiblemente ligado al aumento de las precipitaciones durante algún mes de esa estación (tabla 6.14), las cuales favorecen la erosión del suelo.

6.5.2.2.3. RESPUESTA ESTACIONAL DE LA CARGA DE NITRATOS

Los escenarios de cambio de temperatura proyectan un aumento de la carga de nitratos en todas las estaciones, salvo en verano, con los mayores incrementos de carga en invierno. Estas diferencias podrían deberse al incremento de la mineralización en verano, con la consecuente retención de nitratos en los suelos a causa de la falta de agua para transportarlos, mientras que en las

estaciones lluviosas el transporte estará favorecido y es más probable que se incremente la carga. Rustad et al. (2001) en experiencias de laboratorio, realizadas por tanto con un calentamiento artificial (calefacción, invernaderos), constataron un incremento en las tasas de mineralización neta del 46%, mientras que Ducharne et al. (2007) al analizar el impacto del cambio climático sobre la calidad del agua en el río Sena (Francia) encontraron un aumento de la tasa neta de mineralización comprendida entre el 8 y el 26%.

En el caso de escenarios que contemplan variaciones en las precipitaciones, se prevé un incremento de la carga de nitratos en invierno y un descenso en las otras estaciones, especialmente en otoño, si bien el incremento en invierno no compensa las pérdidas en las otras estaciones.

Los resultados de la sensibilidad de la descarga de agua, sedimentos y nitratos a escala estacional señalan que las diferencias entre estaciones se atenúan para aquellos escenarios que consideran anomalías anuales. Esto pone de manifiesto que los escenarios que consideran una determinada tasa de cambio de temperatura y/o precipitación, frecuentemente utilizados en la evaluación del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos y la calidad de las aguas, muestran los impactos a escala anual, pero difícilmente informarán de los procesos que ocurren a escalas menores, pues no tienen en cuenta la distribución de las temperaturas y de las precipitaciones a lo largo del año.

6.5.3. RESPUESTA DE LA DESCARGA DE AGUA, SEDIMENTOS Y NITRATOS A CAMBIOS SIMULTÁNEOS DE TEMPERATURA, PRECIPITACIÓN Y CO₂

A continuación se exponen los resultados del análisis de sensibilidad de la descarga de agua, sedimentos y nitratos a cambios simultáneos de temperatura, precipitación y concentración de CO₂, discutiendo los resultados a escala anual y estacional.

En la tabla 6.15 se presentan los escenarios de cambio climático para dos intervalos de tiempo (2031-2060, 2069-2098). Se crearon cuatro escenarios

combinando temperatura, precipitación y concentración de CO₂. Dos de ellos se elaboraron con datos medios de las proyecciones del proyecto ENSEMBLES y los otros dos a partir de los valores máximos.

Tabla 6.15. Escenarios de cambio climático usados para evaluar la respuesta anual de la descarga de agua, sedimentos y nitratos a cambios simultáneos de T, P y CO₂.

| Periodo | Escenarios | Parámetro modificado | E | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|-----------|-------------------|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 2031-2060 | 1 AMM 2031-2060 | Temperatura (°C) | 1 | 0,9 | 0,7 | 0,9 | 1,1 | 1,0 | 1,3 | 1,5 | 1,4 | 1,2 | 1,0 | 1,4 |
| | | Precipitación (%) | -1 | 1 | -6 | -13 | -13 | -26 | -29 | -33 | -10 | -6 | -6 | -12 |
| | 2 AMaxM 2031-2060 | Temperatura (°C) | 1,6 | 1,5 | 2 | 1,7 | 1,9 | 2,1 | 2,5 | 2,7 | 2,4 | 2,8 | 1,6 | 2,3 |
| | | Precipitación (%) | -22 | -28 | -15 | -31 | -19 | -55 | -51 | -67 | -45 | -34 | -26 | +37 |
| 2069-2098 | 3 AMM 2069-2098 | Temperatura (°C) | 1,8 | 1,6 | 1,6 | 1,7 | 2,2 | 2,5 | 2,6 | 3,0 | 2,7 | 2,5 | 2,2 | 2,2 |
| | | Precipitación (%) | -3 | -1 | -6 | -18 | -39 | -48 | -43 | -46 | -28 | -20 | -6 | -6 |
| | 4 AMaxM 2069-2098 | Temperatura (°C) | 2,7 | 3,2 | 3,2 | 2,9 | 3,8 | 4,7 | 4,5 | 4,9 | 5,5 | 5,0 | 3,7 | 2,9 |
| | | Precipitación (%) | 31 | 17 | -26 | -27 | -46 | -69 | -61 | -80 | -41 | -41 | -39 | 20 |

Las concentraciones de CO₂ utilizadas para representar los horizontes 2031-2060 y 2069-2098 se cifran en 550 y 660 ppm, respectivamente.

AMM: anomalías mensuales medias, AMaxM: anomalías mensuales máximas.

6.5.3.1. RESPUESTA ANUAL DE LA DESCARGA DE AGUA

En la figura 6.40 se representa el impacto del cambio climático sobre la descarga de agua, sedimentos y nitratos para el periodo 2031-2060 y 2069-2098. En comparación con las simulaciones de los escenarios creados con variables climáticas individuales (solo temperatura, precipitación o CO₂) (figura 6.33), se advierte que la combinación del incremento de temperatura y descenso de precipitación y aumento de CO₂, tanto para valores medios como máximos, tiene un efecto sinérgico sobre la descarga de agua, ocasionando un incremento en la vulnerabilidad al cambio.

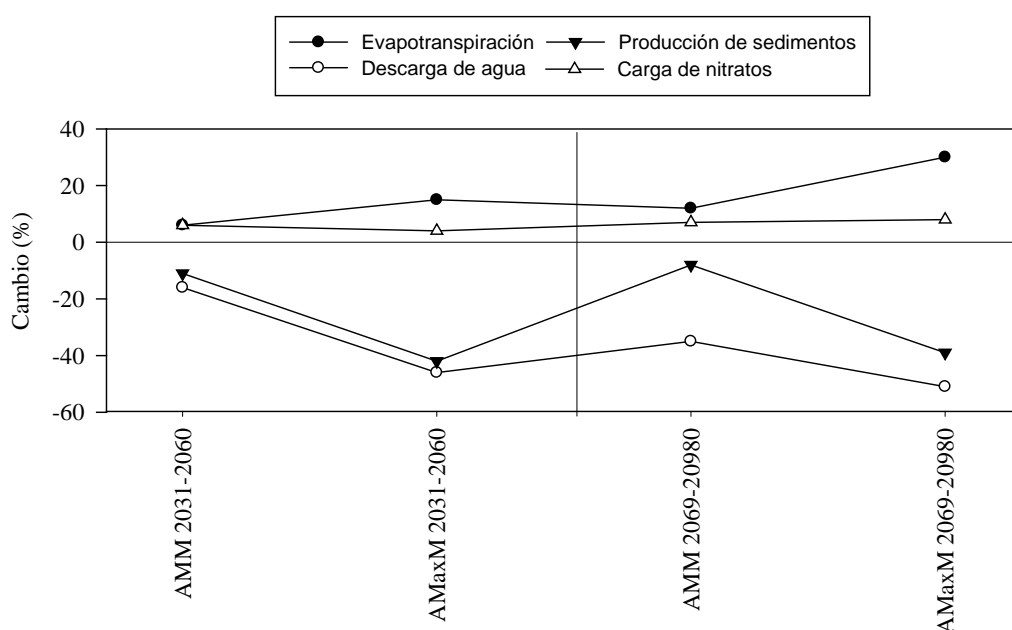


Figura 6.40. Impacto del efecto combinado de cambios en la temperatura, precipitación y concentración de CO₂ sobre la evapotranspiración y la descarga de agua, sedimentos y nitratos, para los periodos 2031-2060 y 2069-2098.

AMM: anomalías mensuales medias, AMaxM: anomalías mensuales máximas.

Los escenarios 1 y 3 (anomalías medias) pronostican una reducción de la descarga de agua del 16% para el periodo 2031-2060 y del 35% para el periodo 2069-2098, mientras que las correspondientes a los escenarios 2 y 4 (anomalías máximas, poco probables) pronostican descensos del orden del 46 y 51% para esos mismos horizontes. Si bien estos resultados son orientativos y deben de tomarse como indicadores de tendencias, ponen de manifiesto la elevada sensibilidad del Corbeira al cambio climático, aun cuando las variaciones climáticas son

relativamente bajas. Lo expuesto concuerda con la mayoría de los estudios de impacto climático realizados en la Península Ibérica, que pronostican descensos en los recursos hídricos (Iglesias et al., 2005; López-Moreno et al., 2006; Nunes et al., 2008), con la excepción del estudio de Fernández (2002) que prevé un incremento.

La previsible disminución de la descarga de agua en la cuenca del Corbeira es mayor que la estimada para otras cuencas de Galicia (Iglesias et al., 2005; Raposo et al. 2013). Por ejemplo, Iglesias et al. (2005) aplicando dos escenarios de cambio climático para 2060 (+2,5 °C y -8% precipitación y +4 °C y -15% precipitación) a 19 cuencas hidrográficas españolas, predicen un descenso en los recursos hídricos de Galicia Costa comprendido entre el 2 y el 9%, mientras que el CEDEX (2010) lo cifra en torno al 12% para el periodo 2041-2070 bajo el escenario A2, y en el 8% para el escenario B2. En la misma línea, Raposo et al. (2013) analizando el impacto de dos escenarios de cambio climático (A2 y B2) en cuatro cuencas fluviales de Galicia (Anllóns, Deza, Landro y Mera), pronosticaron descensos del flujo hipodérmico (subsuperficial) comprendidos entre el 4% y el 15% e incrementos de escorrentía superficial del 1,5% al 192%, debido a la concentración de las precipitaciones en invierno. Hay que tener en cuenta que el Corbeira es una pequeña cuenca de cabecera, y por ello más vulnerable a las variaciones de temperatura y precipitación.

En esta comparación cabe incluir el trabajo de Fernández (2002), que utiliza el modelo hidrológico distribuido SIMPA (Sistema Integrado para la Modelización de la Precipitación Aportación) con paso mensual para comparar la evolución de la descarga de agua en el periodo 1945-1995 respecto al periodo 2040-2049, a partir de las series de precipitación y temperatura resultantes del modelo climático regional PROMES en las simulaciones de 1xCO₂ y 2xCO₂. Entre las 19 cuencas españolas que analiza Fernández (2002) se encuentra la del río Cabe, un afluente del Miño. En dicha cuenca observa un buen calibrado del modelo hidrológico en términos de aportación anual respecto a los aforos disponibles, si bien, en contra de lo que señalan otros análisis, las precipitaciones de entrada para los escenarios climáticos futuros son más elevadas que las del registro histórico

(13%), de manera que estos incrementos no se compensan completamente con una evapotranspiración creciente (15%) y dan lugar a resultados ciertamente contradictorios, un aumento de aportaciones muy importante (25%).

Los resultados de las simulaciones también muestran para la cuenca del Corbeira que el descenso de la descarga de agua es más acusado que el descenso de la precipitación. Esto se podría explicar por cambios indirectos en la evapotranspiración como consecuencia del incremento en la producción de biomasa en la zona forestal (65% del área de la cuenca). La evapotranspiración se incrementará en un 6 y 12% al considerar los escenarios 1 y 3 (anomalías medias), respectivamente, alcanzando valores de 15 y 30% en los escenarios más desfavorables (2 y 4), es decir, considerando los valores máximos (figura 6.40).

El efecto negativo de las altas temperaturas o menores precipitaciones sobre la descarga de agua podría verse compensado por las mayores tasas fotosintéticas debido al incremento de CO₂. Una mayor cantidad de CO₂ atmosférico repercutirá sobre la función de las plantas aumentando la eficiencia en el consumo foliar de agua, resultante de una mayor resistencia estomática. En general, se reconoce que los efectos positivos que ejercería un aumento de CO₂ sobre la relación agua-planta quedarían compensados por una mayor demanda evaporativa a temperaturas superiores. Numerosos estudios indican que los cambios de temperatura y de precipitación modificarán y, en muchos casos, limitarán los efectos del CO₂ sobre las plantas. Por ejemplo, unas temperaturas altas durante el periodo de floración podrían atenuar los efectos del CO₂, ya que limitarían el número, tamaño y calidad de los granos (Thomas et al., 2003; Hamilton et al., 2008).

Para confirmar el efecto del CO₂ en la descarga de agua se compararon los resultados de escenarios que consideran el efecto del CO₂ con los que no lo consideran (tabla 6.16). En este último caso se produce una reducción en la descarga de agua del 24% (2031-2060) y 46% (2069-2098), mientras que en el primero tiene lugar una reducción del 16% (2031-2060) y del 35% (2069-2098), a causa de la mayor eficiencia de las plantas en el consumo foliar de agua. Dada la

importancia ejercida por el CO₂ sobre la descarga de agua, este parámetro debería ser considerado en cualquier evaluación de impacto de cambio climático. No obstante, ha de tenerse en cuenta que los efectos del CO₂ sobre la descarga de agua pueden estar sobreestimados puesto que el SWAT no asume un incremento en el área foliar con el aumento de las concentraciones de CO₂.

Tabla 6.16. Efecto de los escenarios con incrementos de CO₂ (escenarios 1 y 3) y sin incremento de CO₂ sobre la respuesta de la descarga de agua anual.

| | Con CO ₂ | Sin CO ₂ |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|
| Descarga de agua 2031-2060 (%) | -16 (escenario 1) | -24 |
| Descarga de agua 2069-2098 (%) | -35 (escenario 3) | -46 |

6.5.3.2. RESPUESTA ANUAL DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

Las simulaciones apuntan a una disminución de la producción de sedimentos (figura 6.40) atribuida, en gran medida, a la reducción de la descarga de agua y de las precipitaciones, principales factores que influyen en la capacidad de transporte de sedimentos. Estos resultados son consistentes con los observados por Lawler et al. (2003), Mukundan et al. (2013) y Zabaleta et al. (2013), entre otros, que también atribuyen el descenso de la producción de sedimentos a la disminución del flujo. Por el contrario, Zhu et al. (2008) en algunas áreas de la cuenca del río Yangtze (China) advierten un incremento de los sedimentos con el descenso de la descarga de agua, asociado al incremento en las tasas de erosión.

Las simulaciones realizadas con las variaciones medias (escenarios 1 y 3) muestran un descenso de la producción de sedimentos del orden del 11% para el periodo 2031-2060 y del 8% para el horizonte 2069-2098, en tanto que las efectuadas con las anomalías máximas (escenarios 2 y 4) estiman una reducción del 42 y 39% para el periodo 2031-2060 y 2069-2098, respectivamente.

6.5.3.3. RESPUESTA ANUAL DE LA CARGA DE NITRATOS

Se prevé que el cambio climático incremente la carga de nitratos en la cuenca del Corbeira (figura 6.40). Este hecho ha sido frecuentemente atribuido al aumento de la descarga de agua (Bouraoui et al., 2002; Martínková et al., 2011; Shrestha et al., 2012), sin embargo, en la cuenca del Corbeira se prevé un comportamiento opuesto, es decir, un ascenso de la carga de nitratos y una reducción de los caudales del río, lo que demuestra que la descarga de agua no será el factor determinante de la carga de nitratos en esta cuenca para futuros horizontes.

Las simulaciones realizadas con las anomalías medias (escenarios 1 y escenario 3, tabla 6.15) estiman un incremento de la carga de nitratos del orden del 6% para el periodo 2031-2060, y del 7% para el horizonte 2069-2098, reflejando una gran similitud para todo el siglo XXI, a pesar de las notables diferencias previstas en la descarga de agua.

En general, las pérdidas de nitratos dependen del balance hidrológico, de las cantidades presentes en el suelo (tanto procedentes de aportes naturales como de la fertilización) y del grado en que son absorbidos por la vegetación (Ferrier et al., 1995). Se sabe que el aumento de las temperaturas y las sequías ejercen una gran influencia en la dinámica de los nutrientes, ya que el calentamiento aumenta la mineralización y la sequía impide la absorción de nutrientes por parte de las plantas y facilita las pérdidas al sistema cuando llegan las lluvias. El aumento de la carga de nitratos con el cambio climático, en esta cuenca, podría estar relacionado con un incremento en la mineralización y con la disminución de la absorción de nitratos por la vegetación. Se prevé una reducción de la absorción de nitratos en horizontes futuros para todos los usos del suelo, especialmente notable en las zonas de pradera (15% y 22% para el periodo 2031-2060 y 2069-2098, respectivamente). Esto apunta a una menor necesidad de fertilizantes en estas áreas en horizontes futuros, lo que debería tenerse en consideración a la hora de planificar estrategias de manejo de cara a paliar los impactos del potencial cambio climático.

6.5.3.4. RESPUESTA ESTACIONAL DE LA DESCARGA DE AGUA

Las variaciones estacionales de la descarga de agua se muestran en la figura 6.41. El notable incremento de la temperatura y el descenso de la precipitación en primavera y verano causarán un pronunciado descenso de la descarga de agua durante dichas estaciones (del orden del -21% para primavera y del -24% para verano en el periodo 2031-2060 y de aproximadamente el -42% y -48% para el horizonte 2069-2098), mientras que en la época invernal los descensos serán menores (cerca al -11% y -29% para el periodo 2031-2060 y 2069-2098, respectivamente). Esto revela que se producirá una acusada reducción de la descarga de agua durante la estación de menor caudal en el río Corbeira, lo que podría tener fuerte repercusión medioambiental y socioeconómica dada la escasez del recurso en esta estación.

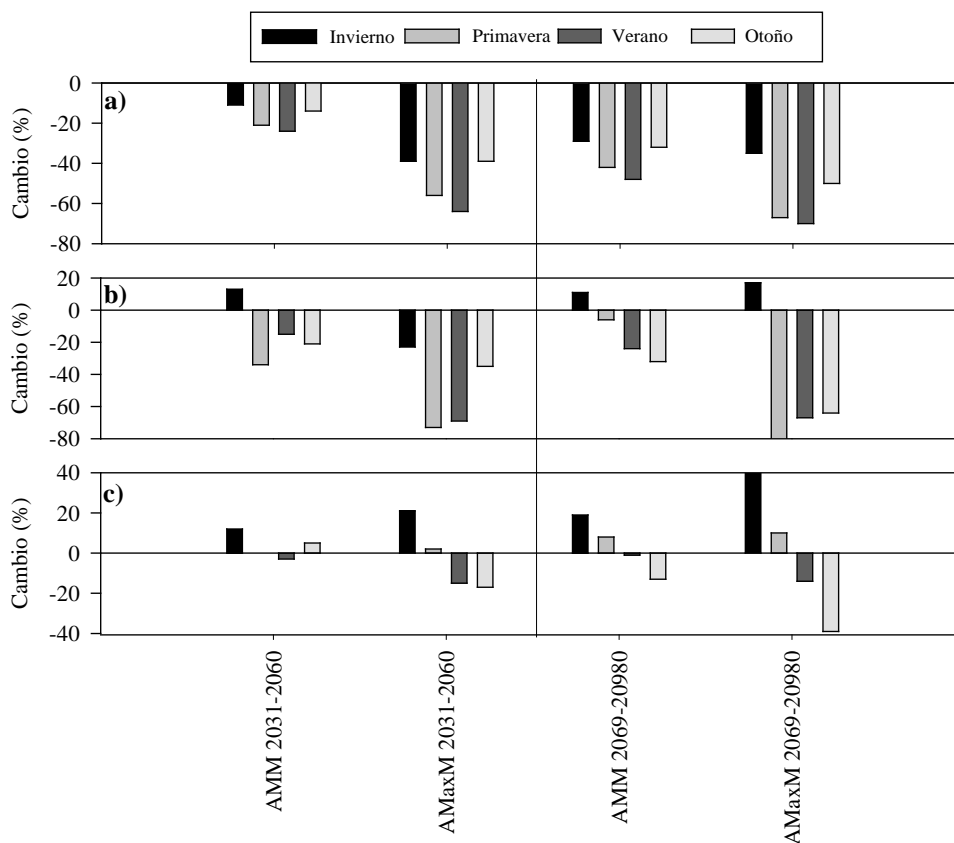


Figura 6.41. Impacto del efecto combinado de cambios en la temperatura, precipitación y concentración de CO₂ sobre la descarga de agua (a), sedimentos (b) y nitratos (c) a escala estacional para los periodos 2031-2060 y 2060-2098.

AMM: anomalías medias mensuales, AMaxM: anomalías máximas mensuales.

En líneas generales, primavera y otoño son las estaciones que perderán una mayor cantidad de recursos, pero porcentualmente el verano será la estación más perjudicada. Estos resultados coinciden con los referidos por Raposo et al. (2013) para la cuenca del río Anllóns, que estiman una reducción sustancial del caudal, especialmente en primavera y otoño, a causa de la reducción de precipitaciones en estas épocas. También pronostican una reducción del caudal de base durante el verano debido a la reducción en la recarga subterránea. Sin embargo, no proyectan cambios de caudal significativos durante el invierno, estación en la que los modelos climáticos usados por dichos autores prevén que se concentren la mayoría de las precipitaciones. Por otra parte, Fernández (2002) aunque coincide con los autores anteriores en señalar que las mayores reducciones de caudal para la cuenca del río Cabe ocurrirán durante los meses de otoño (de hasta un -46 % en el mes de diciembre), sin embargo prevé un aumento de los recursos hídricos anuales justificado por un importante incremento de las aportaciones en invierno que compensarían la reducción del otoño.

6.5.3.5. RESPUESTA ESTACIONAL DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

En todas las simulaciones, salvo la realizada con las variaciones máximas en el periodo 2031-2060 (que contempla notables disminuciones de la precipitación en invierno), se pronostica un aumento de la producción de sedimentos en invierno (figura 6.41), aunque en ningún caso llega a compensar las pérdidas de las otras tres estaciones. El incremento de la producción de sedimentos en invierno, cuando la descarga de agua disminuye, podría relacionarse con una mayor erosión en los terrenos de cultivo de la cuenca, indicando que el efecto de una mayor erosión del suelo prevalece sobre una menor capacidad de transporte de sedimentos.

En primavera, verano y otoño el descenso de la producción de sedimentos se asocia con la disminución de la descarga de agua. Mukundan et al. (2013) utilizando el modelo SWAT para analizar el efecto del cambio climático en la erosión del suelo y en la producción de sedimentos en EEUU, atribuyen la

disminución de la erosión en verano al anticipo de la estación de crecimiento, pues este cambio fenológico afecta a la cantidad y al tiempo que permanece el residuo en el suelo y, por tanto, a la erosión. En la cuenca se advierte un incremento de la biomasa vegetal en las áreas de cultivo durante la primavera, relacionado posiblemente con un adelanto de la estación de crecimiento del maíz. Sin embargo, en verano se pronostica un descenso de la producción de biomasa asociado al aumento del número de días con estrés térmico, lo que se traduce en un ligero incremento de la erosión, mientras que la producción de sedimentos disminuye.

6.5.3.6. RESPUESTA ESTACIONAL DE LA CARGA DE NITRATOS

Las simulaciones realizadas señalan un incremento en la carga de nitratos durante la primavera y, especialmente, durante el invierno capaz de contrarrestar las pérdidas previstas durante las estaciones de verano y otoño (figura 6.41). Este comportamiento podría relacionarse con una mayor actividad de las enzimas del suelo en las estaciones con mayor disponibilidad de agua como señalan Sardans et al. (2008).

6.5.4. VALORACIÓN GLOBAL DE LOS RESULTADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

En el contexto climático y fisiográfico del territorio español, la cuantificación, disponibilidad y uso de los recursos hídricos superficiales, plantea una cuestión ambiental de primer orden. Actualmente coexiste un consenso generalizado sobre la existencia del cambio climático y en los últimos años son múltiples las investigaciones sobre la incidencia de sus efectos en diferentes ámbitos.

Las estrategias de adaptación a las nuevas condiciones del cambio climático constituyen, junto con las de mitigación de sus causas, los grandes desafíos ambientales actuales y futuros. Para poder plantear estas estrategias y propuestas de adaptación en materia de gestión del agua, primero es preciso

realizar un diagnóstico sobre cuáles serán las condiciones hidrológicas futuras. Este fue el objetivo con el que se emprendió el análisis del cambio climático en la cuenca del Corbeira, tratando de conocer los cambios que experimentarán la descarga de agua, sedimentos y nitratos, a medio y largo plazo.

Para la zona de estudio, las predicciones de cambio climático derivadas del proyecto ENSEMBLES indican que en el futuro se producirá un incremento de las temperaturas y una disminución del volumen total de precipitaciones, aunque estas variaciones no serán homogéneas a lo largo del año, sino que se acentuarán especialmente durante el verano. En este estudio se evaluó la vulnerabilidad de la descarga de agua, producción de sedimentos y carga de nitratos frente a cambios en dichas variables, tanto a variables climáticas individuales (temperatura, precipitación, CO₂) como al efecto combinado de dichas variables (temperatura + precipitación + CO₂). Este ejercicio, sin pretender ser exacto, tenía la voluntad de ilustrar la dirección y la magnitud de las modificaciones que podrían tener lugar en la cuenca de Corbeira ante posibles cambios climáticos, las cuales servirán de referencia para cuencas de características similares.

Durante este trabajo se puso de manifiesto la elevada sensibilidad de la descarga de agua de la cuenca del Corbeira a cambios en la temperatura y en las precipitaciones. Además, se comprobó que el incremento de la concentración de CO₂ en la atmósfera puede suponer una ligera atenuación de los efectos de las variables climáticas sobre la descarga de agua. De igual manera, se constató que los efectos del cambio climático a medio y largo plazo sobre la descarga de agua, pueden ser significativos, siempre que se cumplan las previsiones de variación de temperatura y precipitaciones consideradas en este estudio. A grandes rasgos, el aumento de la temperatura implica una mayor demanda evaporativa, exigiendo una mayor necesidad de agua para mantener la producción de biomasa. Esto supone una reducción de las reservas de agua en el suelo. Ahora bien, puesto que la pluviometría tiende a disminuir, según las predicciones climáticas, los ecosistemas padecerán más sequía. Los recursos del río Corbeira mostrarán una reducción de la descarga de agua del orden del 16% para el periodo 2031-2060 y del 35% para finales del siglo XXI. Estas cifras son ligeramente superiores a las

referidas en la bibliografía para otras cuencas gallegas de mayor tamaño (Iglesias et al., 2005; Raposo et al.; 2013), reflejando la mayor vulnerabilidad de las pequeñas cuencas de cabecera a cambios en las variables climáticas, igual que constataron Beguería et al. (2003) y López-Moreno et al. (2006) en otras regiones de España. De todas formas, estos resultados deben de interpretarse con cautela, dado que se trata de predicciones preliminares.

Este trabajo también permitió caracterizar los cambios que puede experimentar la estacionalidad de la descarga de agua. En general, se constata una disminución más significativa, en términos absolutos, en invierno y primavera, cuando tienen lugar los caudales más elevados. No obstante, las mayores reducciones, en términos relativos, tendrán lugar en verano, coincidiendo con los caudales más bajos. Este resultado es relevante para establecer estrategias de gestión, pues la menor disponibilidad de agua en verano dificultará el mantenimiento de los caudales ecológicos durante esta época. La ausencia de un comportamiento homogéneo a lo largo del año, pone de manifiesto la necesidad de evaluar la incidencia del cambio climático a escala estacional, ya que la simulación hidrológica a escala anual no tiene resolución suficiente para describir las variaciones que se puedan producir a lo largo del año.

La producción de sedimentos y nitratos se verán sensiblemente modificadas a causa del cambio climático. La disminución de la descarga de agua conlleva inevitablemente una atenuación en la producción de sedimentos. Obviamente, esta reducción supondrá beneficios en términos de pérdida de sedimentos y elementos asociados a ellos, tales como fósforo y metales pesados. Sin embargo, la concentración de sedimentos mostrará un ligero incremento a causa de la reducción de la descarga de agua, provocando un deterioro de la calidad del agua ya que las concentraciones medias podrían alcanzar 25 mg/L, es decir, el nivel guía establecido por la legislación para agua potable (Directiva 75/440/CEE) y vida piscícola (Directiva 2006/44/CEE). Por otra parte, resulta bastante probable que la erosión del suelo se incremente en las áreas de cultivo, señalando la necesidad de adoptar nuevas prácticas de manejo encaminadas a

reducir la erosión en dichas zonas, consideradas las principales áreas fuente de sedimentos en la cuenca del río Corbeira (Rodríguez-Blanco et al., 2010c).

También se verifica que la carga de nitratos se incrementará en los horizontes futuros con relación a los valores actuales, debido posiblemente al descenso de biomasa en las praderas, así como al aumento de la tasa de mineralización ligado al incremento de la temperatura. Una mayor tasa de mineralización de la materia orgánica dará lugar a que el nitrato liberado sea arrastrado por el agua hacia el curso fluvial. A pesar de ello, las concentraciones de nitratos previstas para finales del siglo XXI se encontrarían muy por debajo de los límites establecidos por la legislación vigente actual para aguas de consumo humano (Real Decreto 140/2003), por lo que el supuesto incremento no supondría una limitación para el consumo humano.

Con carácter general, se puede indicar que este estudio proporciona un ejemplo de las modificaciones que experimentará la descarga de agua en otras partes de la España húmeda. La hidrología y la distribución de usos de la cuenca del Corbeira son similares a los de la parte alta y media de la cuenca del río Mero. Por lo tanto, si los escenarios de cambio climático adoptados en este trabajo sucedieran en un futuro, podrían ocurrir cambios significativos en el río Mero que afectarían al embalse de Cecebre.

La presa de Cecebre fue construida en 1980 con capacidad para embalsar 22 Hm³. Este embalse tiene actualmente diversas funciones, entre las que se pueden citar, el abastecimiento de agua potable a la ciudad de La Coruña y su área metropolitana (500.000 habitantes) y las actividades de recreo. Es un lugar incluido en la Red Natura 2000, protegido por la Unión Europea, tanto por su vegetación de ribera, como por las numerosas especies de aves, reptiles, mamíferos y peces que allí habitan. Por todo ello, sería interesante analizar en qué medida el cambio climático podría afectar a la disponibilidad de recursos del embalse, que ya ha comenzado a dar síntomas de insuficiencia como consecuencia del aumento de la demanda.

Si se extrapolasen los resultados de este estudio a toda la cuenca del Mero que vierte al embalse de Cecebre, las implicaciones serían importantes, pues el cambio climático podría afectar al estado cuantitativo y cualitativo de los recursos hídricos. Tomando como base los resultados de la cuenca del Corbeira se puede considerar factible, a título orientativo, una reducción a medio y largo plazo de las aportaciones medias al embalse de Cecebre del 16 y 35%, respectivamente. Por otro lado, La Coruña y su área metropolitana han experimentado un crecimiento demográfico notable, que probablemente se mantendrá durante los próximos años. Las previsiones demográficas apuntan a un crecimiento anual del 2,13%. Este incremento de población supondrá un aumento de las necesidades de agua en los suministros. Considerando que se adopten medidas de ahorro y se desarrolle una política de austeridad basada en una nueva cultura del agua, se estima que la demanda de agua, que actualmente es de unos 40 hm³/año en el conjunto del área de La Coruña (incluidos consumos domésticos, industriales y de servicios), se incrementará hasta unos 78 hm³/año para el año 2035.

Con unos recursos hídricos cada vez más mermados y un consumo que crece anualmente, todo apunta a una situación de mayor insostenibilidad hídrica y por tanto ambiental. Esto implica que deben tomarse medidas de largo alcance, capaces de resolver esta situación, a fin de evitar las consecuencias de una disminución de la merma de aportaciones y el incremento de la demanda. En la actualidad se baraja la posibilidad de multiplicar la capacidad del sistema de abastecimiento del área metropolitana de La Coruña conectando la presa al lago artificial de Meirama, que tiene una capacidad de 150 hm³, siete veces más que la capacidad de almacenamiento del embalse de Cecebre.

Para concluir, cabe subrayar una vez más el carácter orientativo de estos resultados, por lo que conviene interpretar los efectos del cambio climático en términos de tendencias, no de situaciones concretas. Es necesario incidir en la incertidumbre de las proyecciones climáticas usadas en las simulaciones, por lo que las estimaciones serán más fiables a medida que aumenten las observaciones y la calidad de las predicciones climáticas para el siglo XXI. Por otra parte, y al margen de la magnitud de los resultados, se pone de manifiesto que la modelación

hidrológica es una herramienta útil para prever situaciones futuras, que necesita una serie consistente de datos de campo que permita una correcta calibración y validación del modelo.

CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES

A continuación se exponen las principales conclusiones a las que se ha llegado a lo largo de este trabajo, agrupándolas siguiendo la estructura de los resultados.

Análisis de las variables meteorológicas

1. La comparación de los valores de precipitación y temperatura durante el periodo de estudio (2005/06-2009/10) con los datos de la serie de referencia (1983/84-2009/10) lleva a considerar al periodo de simulación (calibración y validación) representativo de la situación climática tipo en la cuenca, lo que permitió realizar una calibración del modelo SWAT ajustada a las condiciones climáticas propias del área de estudio.
2. Las precipitaciones mostraron una elevada variabilidad interanual durante el periodo de calibración (2005/06-2007/08). Dicha variabilidad brindó la posibilidad de calibrar el modelo usando una amplia gama de condiciones hidrológicas, lo que posibilitó activar todos los procesos constitutivos del modelo y, en consecuencia, obtener una calibración más acorde a las características específicas de la cuenca.

Respuesta hidrosedimentaria y carga de nitratos

1. La respuesta hidrológica de la cuenca mostró una acusada variabilidad interanual dando la oportunidad de comparar los resultados del SWAT con un amplio abanico de condiciones de esorrentía.
2. El coeficiente de esorrentía presentó valores bajos (33%), característicos de cuencas bien vegetadas y con escasa superficie impermeable, lo que denota una alta capacidad de infiltración de los suelos. Por otra parte, se constató que la evapotranspiración y la recarga de agua del suelo son procesos de suma importancia en la dinámica hidrológica de la cuenca, por lo que deben estar

bien reflejados en el modelo para representar adecuadamente los procesos hidrológicos que ocurren en ella y conseguir una buena simulación del caudal.

3. En lo referente a la producción de sedimentos y carga de nitratos se encontró una importante variabilidad interanual vinculada a la generación de escorrentía y a los usos del suelo. De ello se deduce la necesidad de simular adecuadamente el flujo así como el ciclo de los cultivos, con el fin de estimar objetivamente la pérdida de sedimentos y nitratos desde distintas zonas de la cuenca.
4. La mayor parte de la pérdida de sedimentos (70%) y el 39% de la carga de nitratos se producen durante episodios de escorrentía, aun cuando éstos solo aportan un 30% de la descarga de agua. Esto indica que la carga de sedimentos durante eventos de escorrentía debe de ser considerada en el proceso de calibración para el correcto ajuste de los parámetros del modelo.

Calibración, validación y aplicación del modelo SWAT

1. Los resultados del análisis de sensibilidad para el módulo hidrológico pusieron de manifiesto una alta sensibilidad del modelo a los parámetros que influyen en la disponibilidad de agua en el suelo y en el flujo subterráneo.
2. Las simulaciones de caudal, producción de sedimentos y nitratos realizadas con el SWAT reflejan adecuadamente el comportamiento de los valores observados, de lo que se deduce la utilidad de este modelo como herramienta para estimar dichas variables en cuencas de características geomorfológicas, climáticas y de uso del suelo similares a las de la cuenca del río Corbeira.
3. El uso del modelo permitió estimar la importancia relativa de los componentes del flujo de agua considerados por el SWAT: flujo superficial, flujo lateral y flujo subterráneo, siendo el flujo basal el predominante (68%).
4. Los resultados de las simulaciones de producción de sedimentos y nitratos permiten realizar una interpretación cualitativa, o incluso una aproximación (semi-)cuantitativa de la contribución de los diferentes usos del suelo a la producción de sedimentos y nitratos. Los valores más bajos de producción de sedimentos se registraron en las zonas forestales y en las praderas en tanto que los valores más elevados se obtuvieron en las zonas de cultivo, en donde

se excedió ligeramente la tasa de formación del suelo para las condiciones que prevalecen en Europa. Las tasas más elevadas de producción de nitratos también se registraron en las zonas de cultivo, aunque en conjunto la mayor exportación procede de las praderas, ya que éstas son las que alcanzan una mayor representatividad dentro del uso agrícola.

5. El modelo ha demostrado ser una herramienta valiosa para el estudio de la contribución de los diferentes flujos a la producción nitratos, señalando que el flujo subterráneo es la principal vía de exportación de nitratos en la cuenca del río Corbeira.
6. Dado que el modelo es capaz de predecir con bastante fiabilidad la exportación de sedimentos en la cuenca del río Corbeira durante largos periodos de tiempo, dichos resultados podrían emplearse en la estimación de la pérdida de fósforo, pues las concentraciones de sólidos en suspensión guardan muy buenas correlaciones con el fósforo particulado.

Impactos del cambio climático sobre la descarga de agua, producción de sedimentos y nitratos

1. Los modelos del proyecto ENSEMBLES usados en los escenarios de cambio climático coinciden en pronosticar un aumento de temperaturas en la zona de estudio, con variaciones en cuanto a la magnitud del cambio, y con un ritmo de calentamiento máximo durante el verano y mínimo durante el invierno. Señalan un calentamiento medio de 1,1 °C para el periodo 2031-2060 y de 2,2 para el periodo 2069-2098. En cuanto a la precipitación, se evidencian más discrepancias entre modelos. No obstante, todos los modelos coinciden en proyectar disminuciones de precipitación en el clima futuro respecto al periodo actual (1981-2010), del orden del 6% para el periodo 2031-2060 y del 15% para el horizonte 2069-2098. En general, se prevé una mayor sequía para todas las estaciones aunque algunos modelos pronostican un aumento de las precipitaciones en invierno.
2. Los resultados de las simulaciones para la cuenca del Corbeira realizadas bajo escenarios de cambio climático, elaborados a partir de los valores medios de

temperatura y de precipitación, considerando el efecto simultáneo de T + P + CO₂, para los periodos 2031-2060 y 2069-2098 proyectaron:

- a) Un descenso de la descarga de agua para la cuenca del Corbeira del orden del 16% a corto plazo y del 35% para finales del siglo XXI, mientras que las simulaciones correspondientes a los escenarios más desfavorables (anomalías máximas) pronostican descensos del orden del 46 y 51% para esos mismos horizontes. En general, se constata una disminución más significativa, en términos absolutos, en invierno y primavera, cuando tienen lugar los caudales más elevados. No obstante, las mayores reducciones, en términos relativos, tendrán lugar en verano, coincidiendo con los caudales más bajos.
- b) Una reducción de la producción de sedimentos del orden del 11% para el periodo 2031-2060 y del 15% para el horizonte 2069-2098, en tanto que las efectuadas con las anomalías máximas estiman una reducción del 42 y 39% para el periodo 2031-2060 y 2069-2098, respectivamente. Se pronostica un aumento de la producción de sedimentos en invierno.
- c) Un incremento de la carga de nitratos similar para todo el siglo XXI (6-7%) a pesar de las diferencias previstas en la descarga de agua, siendo mayor el incremento durante primavera y especialmente durante el invierno.

De las conclusiones del presente estudio se deduce que el modelo hidrológico SWAT es una herramienta útil para predecir el efecto del uso del suelo y los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos y la producción de sedimentos y nitratos a escala de cuenca.

BIBLIOGRAFÍA

8. BIBLIOGRAFÍA

- Aburrea, J., Cebrián, A.C.** 2001. *Trend and variability analysis on rainfall series and their extreme events*. In: Brunet M., López, D. (eds.) *Detecting and modelling regional climate change*, Springer, New York. pp. 191-201
- Aburrea, J., Asín, J., Erdozain, O., Fernández, E.** 2001. *Climate variability analysis of temperature series in the medium Ebro river basin*. In: Brunet, López. (Eds.). *Detecting and modelling regional climate change*. Berlin Springer. pp. 109-118.
- Ainsworth, E.A., Long, S.P.** 2005. *What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy*. *New Phytologist*. **165 (2)**: 351–371.
- Aksoy, H., Kavvas, M.L.**, 2005. *A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models*. *Catena* **64**: 247–271.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M.** 1998. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. FAO irrigation and drainage paper. **56**. Rome, Italy.
- Alo, C.A., Wang, G.** 2008. *Hydrological impact of the potential future vegetation response to climate changes projected by 8 GCMs*. *Journal of Geophysical Research*. 113, G03011. doi: 10.1029/2007JG000598.
- Alsdorf, D.E., Rodríguez, E., Lettenmaier, D.P.** 2007. *Measuring surface water from space*. *Reviews of Geophysics*. **45**. RG2002, doi:10.1029/2006RG000197.
- Álvarez-Cobelas, M., Angeler, D., Sanchez-Carillo, S.** 2008. *Export of nitrogen from catchments: a worldwide analysis*. *Environmental Pollution*. **156**: 261-269.
- Álvarez, V., Taboada, J.J., Lorenzo, M.N.** 2011. *Cambio climático en Galicia en el siglo XXI: Tendencias y variabilidad en temperaturas y precipitaciones*. ACT 2. pp. 65-85.
- Álvarez-Salgado, X.A., Fernández-Reiriz, M.J., Labarta, U., Filgueira, R., Peteiro, L., Figueiras, F.G., Piedracoba, S., Rosón, G.** 2009. *Influencia do cambio climático no*

- cultivo de mexillón das rías galegas*. En: Pérez Muñuzuri, Vivente; Fernández Cañamero, Marisa e Gómez Gesteira. Evidencias e Impactos do Cambio Climático en Galicia. Xunta de Galicia. Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible.
- Alves, D.R.B., Frizzones, J.A., Dourado-Neto, D.** 2001. *Repartição da lâmina de irrigação, aplicada via pivô central, na cultura do milho*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande. **5 (1)**: 67-70.
- Anderson, M.G., Burt, T.P.** 1982. *Throughflow and pipe monitoring in the humid temperate environment*. In: Bryan, R., Yair, A. (Eds.). *Badland Geomorphology and Piping*. GeoBooks. Cambridge. UK. pp. 337-354.
- Andreu, J.** 1993. *Análisis de sistemas y modelación. Conceptos y métodos para la planificación hidrológica*. (Ed. Andreu J.). Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). Barcelona. España. 391 pp.
- APHA.** 1998. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 20th edn. Washington.
- Arabi, M., Frankenberger, J., Engel, B., Arnold, J.** 2007. *Representation of agricultural management practices with SWAT*. Hydrological Processes.
- Arnold, J.G., Williams, J.R., Maidment, D.R.** 1995. *Continuous-time water and sediment-routing model for large basins*. Journal of Hydraulic Engineering. **121**: 171-183.
- Arnold, J.G., Allen, P.M., Muttiah, R., Bernhardt, G.** 1995. *Automated base flow separation and recession analysis techniques*. Ground Water. **33 (6)**: 1010-1018.
- Arnold, J. G., Muttiah, R. S., Srinivasan, R., Allen, P. M.** 2000. *Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the upper Mississippi basin* Journal of Hydrology. **227**: 21–40.
- Asselman, N.E.M., Middelkoop, H., van Dijk, P.M.** 2003. *The impact of changes in climate and land use on soil erosion, transport and deposition of suspended sediment in the River Rhine*. Hydrological Processes. D.C. **17**: 3225–3244.

- Ayala-Carcedo, F.J.** 2004. *El cambio climático en España: una realidad con efectos en la economía y el sector asegurador*. Fundación Mapfre Estudios. Gerencia de Riesgos y Seguros. **86**: 17-24.
- Ball, J.T., Woodrow, I.E., Berry, J.A.** 1986. *A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental condition*. In: Biggings, J. (Ed.). *Progress in Photosynthesis Research*. Martinus Nijhoff, pp. 221–224.
- Bärlund, I., Kirkkala, T., Malve, O., Kämäri, J.** 2007. *Assessing SWAT model performance in the evaluation of management actions for the implementation of the Water Framework Directive in a Finish catchment*. *Environmental Modelling & Software*. **22**: 719-724.
- Bastola, S., Ishidaira, H., Takeuchi, K.** 2008. *Regionalisation of hydrological model parameters under parameter uncertainty: A case study involving topmodel and basins across the globe*. *Journal of Hydrology*. **357(3–4)**: 188–206.
- Beguería, S., López-Moreno, J.I., Lorente, A., Seeger, M., García-Ruiz, J.M.,** 2003. *Assessing the effect of climate change and land-use changes on streamflow in the central Spanish Pyrenees*. *Ambio*. **32 (4)**: 283-286.
- Betts, R.A., Boucher, O., Collins, M., Cox, P.M., Falloon, P.D., Gedney, N., Hemming, D.L., Huntingford, C., Jones, C.D., Sexton, D.M.H., Webb, M.J.** 2007. *Projected increase in continental runoff due to plant responses to increasing carbon dioxide*. *Nature* **448 (7157)**: 1037–1041.
- Beasley, D.B., Huggins, L.F.** 1981. *ANSWERS User's Manual*. USDA Report No. EPA-905/9-82-01, United States Department of Agriculture.
- Benaman, J., Shoemaker, C.A., Haith, D.A.** 2005. *Calibration and Validation of soil and water assessment tool on an agricultural watershed in upstate*. New York. *Journal of Hydrology*. **10**: 363-74.
- Beniston, M.** 2006. *Changes in run-off in the central Alps (HIRHAM RCM)*.

- Bernal, S., Buturini, A., Sabater, F.** 2003. *Variability of DOC and nitrate responses to storms in a small Mediterranean forested catchment*. Hydrology and Earth System Sciences. **6 (6)**: 1031-1041.
- Betrie, G.D., Mohamed, Y.A., van Griensven, A., Srinivasan, R.** 2011. *Sediment management modelling in the Blue Nile Basin using SWAT model*. Hydrology and Earth System Sciences. **15**: 807-818.
- Beven, K.J.** 1993. *Prophecy, Reality, and Uncertainty in Distributed Hydrological Modelling*. Advances in Water Resources. **16 (1)**: 41-51.
- Beven, K.J.** 2001. *Rainfall-runoff modelling. The Primer*. John Wiley and Sons, LTD. Toronto. 360 pp.
- Blade, I., Cacho, I., Castro-Diez, Y., Gomis, D., Gonzalez-Samperiz, P., Miguez-Macho, G., Perez, F.F., Rodríguez-Fonseca, B., Rodríguez-Puebla, C., Sanchez, E., Sotillo, G., Valero-Garces, B. Vargas-Yanez, M.** 2010. *Clima en España: Pasado, presente y futuro*. Informe de evaluación del cambio climático regional. Eds. F.F. Pérez & R. Boscolo. CLIVAR España. MARM y MICINN.
- Blöschl, G., Sivapalan, M.** 1995. *Scale issues in hydrological modeling: a review*. In: Kalma, J.D., Sivapalan, M. (Eds.). John Wiley & Sons, Chichester. pp. 9-48.
- Boardman, J.** 2006. *Soil erosion science: reflections on the limitations of current approaches*. Catena. **68**: 73–86.
- Bonell, M., Hendriks, M.R., Imenson, A.C., Hazelhoff, L.** 1984. *The generation of storm runoff in a forested clayey drainage basin in Luxembourg*. Journal of Hydrology. **71**: 53-77.
- Bosch, D.D., Sheridan, J.M., Batten, H.L., Arnold, J.G.** 2004. *Evaluation of the SWAT model on a coastal plain agricultural watershed*. Trans. ASAE. **47 (5)**: 1493-1506.
- Bouraoui, F., Galbiati, L., Bidoglio, G.** 2002. *Climate change impacts on nutrient loads in the Yorkshire Ouse catchment (UK)*. Hydrology and Earth System Sciences. **6 (2)**: 197–209.

- Bouraoui, F., Grizzetti, B.** 2008. *An integrated modelling framework to estimate the fate of nutrients: Application to the Loire (France)*. Ecological Modelling. **212**: 450-459.
- Brunet, M., Jones, P.D., Sigró, J., Saladié, O., Aguilar, E., Moberg, A., Della-Marta, P.M., Lister, D., Walter, A., López, D.** 2007. *Temporal and spatial temperature variability and change over Spain during 1850-2005*. Journal of Geophysical Research. **112**: D12117.
- Brunet, M., Casado, M.J., Castro, M., Galán, P., López, J.A., Martín, J.M., Pastor, A., Petisco, E., Ramos, P., Ribalaygua, J., Rodríguez, E., Sanz, I., Torres, L.** 2008. *Generación de escenarios climáticos regionalizados para España*. Agencia Estatal de Meteorología. 157 pp.
- Bunce, J.A.** 2004. *Carbon dioxide effects on stomatal responses to the environment and water use by crops under field conditions*. Oecologia. **140 (1)**: 1-10.
- Buttle, J.M.** 1994. *Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins*. Progress in Physical Hydrology. **18**: 16-41.
- Calvo de Anta, R., Macías, F., Rivero, A.** 1992. *Aptitud agronómica de los suelos de la provincia de La Coruña*. Diputación Provincial de A Coruña. La Coruña. España.
- Calvo de Anta, R., Macías, F.** 2002. *Mapa de solos de Galicia*. Hoja 46 (Oza dos Ríos). Escala 1: 50.000. Consellería de Medio Ambiente. Xunta de Galicia. Santiago de Compostela. España.
- Calvo de Anta, R., Macías, F.** 2005. *Mapa de solos de Galicia*. Hoja 45 (Betanzos). Escala 1: 50.000. Consellería de Medio Ambiente. Xunta de Galicia. Santiago de Compostela. España.
- Calvo de Anta, R., Macías, F.** 2005. *Mapa de solos de Galicia*. Hoja 70 (Ordes). Escala 1: 50.000. Consellería de Medio Ambiente. Xunta de Galicia. Santiago de Compostela. España.
- Campbell, J.L., Hornbeck, J.W., Mitchell, M.J., Adams, M.B., Castro, M.S., Driscoll, H.T., Kahl, J.S., Kochenderfer, J.N., Likens, G.E., Lynch, J.A., Murdoch, P.S., Nelson, S.J., Shanley, J.B.** 2004. *Input-output budgets of inorganic nitrogen for 24 forest*

- watersheds in the northeastern United States: A review*. Water, Air and Soil Pollution. **151**: 373-396.
- Cancelo, J. Rial, M.E., Díaz-Fierros., F.** 2009. *Balance hídrico*. En: Pérez Muñuzuri, Vivente; Fernández Cañamero, Marisa e Gómez Gesteira. Evidencias e Impactos do Cambio Climático en Galicia. Xunta de Galicia. Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible.
- Casalí, J., Gastesi, R., Álvarez, J., de Santiesteban, L.M., del Valle, J., Jiménez, R., Larrañaga, A., Goñi, M.I., Aguirre, U., Campo, M.A., López, J.J., Doñezar, M.** 2008. *Runoff, erosion and water quality of agricultural watershed in central Navarre (Spain)*. Agriculture Water Management. **95**: 1111-1128.
- Castillo, F., Martínez, A., Blanco, R.** 2006. *O Clima de Galicia. A variabilidade natural do clima en Galicia*. Ed. Naranjo, L., Pérez, V. Xunta de Galicia, Santiago de Compostela. España. pp. 17-91.
- Castro, M., Martín-Vide, J., Alonso, S.** 2005. *El Clima de España: pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI*. En: Moreno, J.M. (Ed.). Evaluación Preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático. Ministerio de Medio Ambiente. pp. 1-64.
- Ceballos, A., Morán, E., Luengo, M. A., Llorente, J. M.** 2008. *Water resources and environmental change in a Mediterranean environment: The south-west sector of the Duero river basin (Spain)*, Journal of Hydrology. **351**: 126-138.
- CEDEX.** 2010. *Estudio de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos y las masas de agua. Ficha 1. Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en régimen natural*. Clave CEDEX 42-407-1-001. Informe técnico para ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid, España.
- Collatz, G.J., Ribas-Carbo, M., Berry, J.A.** 1992. *A coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C4 plants*. Australian Journal of Plant Physiology. **19**: 519-538.

- Crawford, M., Linsley, T.** 1966. *Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed Model IV*. Stanford: Department of Civil Engineering. Stanford University, Technical Report. **39**: 210.
- Cruz, R., Lago, A., Lage, A., Rial, M.E., Díaz-Fierros, F., Salsón, S.** 2009. *Evolución reciente do clima de Galicia. Tendencias observadas en variables meteorolóxicas*. En: Evidencias e Impactos do Cambio Climático en Galicia. Xunta de Galicia. Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible. pp. 19-58.
- Chaplot, V.** 2007. *Water and soil resources response to rising levels of atmospheric CO₂ concentration and to changes in precipitation and air temperature*. Journal of Hydrology. **337**: 159-171.
- Chess.** 2001. *Climate, hydrochemistry, and economics of surface-water systems*. Available at: www.nwl.ac.uk/ih/www/research/images/chessreport.pdf. Accessed 25 August 2006.
- Chorley, R.J.** 1969. *The drainage basin as the fundamental geomorphic unit*. In: Chorley, R.J. (Eds.). *Introduction to Physical Hydrology*. Methuen, London. pp. 37-59.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W.** 1998. *Applied Hydrology*. Mc Graw-Hill, New York.
- Christensen, J.H.** 2005. *Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects (PRUDENCE)*. Final Report. URL: <http://prudence.dmi.dk/>
- Chu, T.W., Shirmohammadi, A., Montas, H.J., Sadeghi, A.** 2004. *Evaluation of SWAT model's sediment and nutrient components in the piedmont physiographic region of Maryland*. Translation Asabe. **47 (2)**: 427-438.
- Darvishzadeh, R., Skidmore, A., Schlerf, M., Atzberger, C., Corsi, F., Cho, M.** 2008. *LAI and chlorophyll estimation for a heterogeneous grassland using hyperspectral measurements*. Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. **63**: 409-426.
- De Roo, A.P.J., Wesseling, C.G., Jetten, V.G., Offermans, R.J.E., Ritsema, C.J.** 1995. *LISEM, Limburg Soil Erosion Model, User Manual*, Dept. of Physical Geography, Utrecht University.

- De Roo, A.P.J., Offermans, R.J.E., Cremers, N.H.D.T.** 1996. *LISEM: a single event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output*. Hydrological Processes. **10**: 1107-1117.
- Deasy, C., Hethwaite, A.L., Brazier, R.E.** 2008. *A field methodology for quantifying phosphorus transfer and delivery to streams in first order agricultural catchments*. Journal of Hydrology. **350**: 329-338.
- Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo** (6 de septiembre de 2006). *Calidad de las aguas continentales que requieren protección o mejora para ser aptas para la vida de los peces*. (2006/44/CEE). Diario oficial de las comunidades europeas (DOCE), L 264. pp. 21-31.
- Dismeyer, G.E., Foster, G.R.** 1984. *Estimating the cover-management factor (C) in the Universal Soil Loss Equation for forest conditions*. Journal of Soil and Water Conservation. **36**: 235-240.
- Ducharne, A., Baubion, C., Beaudoin, N., Benoit, M., Billen, G., Brisson, N.** 2007. *Long term prospective of the Seine River system: Confronting climatic and direct anthropogenic changes*. Science of the Total Environment. **375**: 292-311.
- EC (European Commission)**. 1998. *Council Directive 98/83/EC of 3rd November 1998 on the quality of water intended for human consumption*. Official Journal of the European Communities L 330.
- EC (European Commission)**. 2000. *European Parliament and the Council of the European Union. Directive 2000/60/EC establishing a framework for the Community action in the field of water policy*. Official Journal of the European Communities. **L 327**: 1-72.
- EEA (European Environment Agency)**. 2000. *Down to earth: Soil degradation and sustainable development in Europe. A challenge for the 21st century*. Environmental issue series. Environmental European Agency, Denmark. **16**: 32.
- EEA (European Environment Agency)**. 2001. *Analysis and mapping of soil problem areas (hot spots). Final report*. Environmental European Agency, Denmark. 62 pp.

- EEA (European Environment Agency).** 2008. *Impacts of Europe's changing climate - 2008 indicatorbased assessment*. EEA Report No 4/2008 European Environment Agency, Copenhagen.
- Esteban-Parra, M.J., Rodrigo, F.S., Castro-Díaz, Y.** 1995. *Temperature trends and change points in the northern Spanish plateau during the last 100 years*. International Journal of Climatology. **15**: 1031-1042.
- Esteban-Parra, M.J., Rodrigo, F.S., Castro-Díaz, Y.** 1998. *Spatial and temporal patterns of precipitation in Spain for the period 1880-1992*. International Journal of Climatology. **18**: 1557-1574.
- EUROHARP.** 2006. *Towards European harmonised procedures for quantification of nutrient losses from diffuse sources*. Available at: euroharp.org/pd/pd/index.htm#5. Accessed 25 August 2006.
- Evans, R.** 1980. *Mechanics of water erosion and their spatial and temporal controls: an empirical viewpoint*. In: Kirkby, M.J., Morgan R.P.C. (Eds.), Soil erosion. Chichester, Wiley.
- FAO.** 1998. *World Reference Base for Soil Resources*. World Soil Resources Reports. FAO, Rome, Italy. **84**: 88.
- FAO.** 2006. *World Reference Base for Soil Resources*, World Soil Resources Reports. FAO, Rome, Italy. **103**
- Favis-Mortlock, D.T., Savabi, M.R.** 1996. *Shifts in rates and spatial distributions of soil erosion and deposition under climate change*. In: Anderson, M.G., Brooks, S.M. (Eds.). Advances in Hillslope Processes. Vol 1. Wiley, Chichester, UK.
- Favis-Mortlock, D.T., Boardman, J., MacMillan, V.** 2001. *The limits of erosion modeling: why we should proceed with care*. In: Harmon, R.S., Doe, W.W. (Eds.). Landscape Erosion and Evolution Modeling. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York. pp. 477-516.
- Felzer, B.S., Cronin, T.W., Melillo, J.M., Kicklighter, D.W., Adam Schlosser, C.** 2009. *Importance of carbon–nitrogen interactions and ozone on ecosystem hydrology*

- during the 21st century. *Journal of Geophysical Research* 114, G01020. doi: 10.1029/2008JG000826.
- Fernández, A.** 1994. *Modelos de predicción de evolución de la productividad en los turnos sucesivos de eucalipto tratado a monte bajo*. Publicación Interna. Centro de Investigación Forestal de Lourizán. Pontevedra.
- Fernández, P.** 2002. *Estudio del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos. Aplicación en 19 cuencas en España*. Tesis doctoral. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid (ETSICCPM), Universidad Politécnica de Madrid (UPM).
- Ferrant, S., Oehler, F., Durand, P., Ruiz, L., Salmon-Monviola, J., Justes, E., Dugast, P., Probst, A., Probst, J.L., Sánchez-Perez, J.M.** 2011. *Understanding nitrogen transfer dynamics in a small agricultural catchment: Comparison of a distributed (TNT2) and a semi distributed (SWAT) modeling approaches*. *Journal of Hydrology*. **406**: 1-15.
- Ferrer Julià, M., Estrela, M.T., Sánchez, J.A., García, M.** 2004. *Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction*. *Geoderma*. **123 (3-4)**: 257–277.
- Ferrier, R.C., Whitehead, P.G., Sefton, C., Edwards, A.C., Pugh, K.** 1995. *Modelling impacts of land use change and climate change on nitrate–nitrogen in the River Don, North East Scotland*. *Water Research*. **29 (8)**: 1950–1956.
- Field, C., Jackson, R., Mooney, H.** 1995. *Stomatal responses to increased CO₂: implications from the plant to the global scale*. *Plant, Cell & Environment*. **18**: 1214-1255.
- Flanagan, D.C., Nearing, M.A.** 1995. *USDA-Water Erosion Prediction project: Hillslope profile and watershed model documentation*. NSERL Report No. 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette.
- Florsheim, J.L., Pellerin, B.A., Oh, N.H., Ohara, N., Bachand, P.A.M., Bachand, S.M., Bergamaschi, B.A., Hernes, P.J., Kavvas, M.L.** 2011. *From deposition to erosion: Spatial and temporal variability of sediment sources, storage, and transport in a*

small agricultural watershed. Geomorphology. doi: 10.1016/j.geomorph.2011.04.037.

Gallart, F., Llorens, P. 2001. *Water resources and environmental change in Spain. A key issue for sustainable integrated catchment management*. Cuadernos Investigación Geográfica. **27**: 7–16.

Gallart, F., Llorens, P. 2004. *Observations on land cover changes and water resources in the headwaters of the Ebro catchment, Iberian Peninsula*. Physics and Chemistry of the Earth. **29**: 769–773.

Gan, T.Y., Dlamini, E.M., Biftu, G.F. 1997. *Effects of model complexity and structure, data quality, and objective functions on hydrologic modeling*. Journal of Hydrology. **192** (1): 81-103.

García-Ruiz, J.M., Arnáez, J., Beguería, S., Seeger, M., Martí-Bono, C., Regüés, D., Lana-Renault, N., White, S. 2005. *Runoff generation in an intensively disturbed, abandoned farmland catchment*. Central Spanish Pyrenes. Catena. **59**: 79-92.

García-Ruiz, J.M., Regüés, D., Alvera, B., Lana-Renault, N., Serrano-Muela, M.P., Nadal-Romero, E., Navas, A., Latrón, J., Martí-Bono, C., Arnáez, J. 2008. *Flood generation and sediment transport in experimental catchments affected by land use changes in the central Pyrenees*. Journal of Hydrology. **356**: 245-260.

Gedalof, Z., Peterson, D.L., Mantua, N.J. 2004. *Columbia riverflow and drought since 1750*. Journal of the American Water Resources Association. **40**: 1579-1592.

Gerten, D., Schaphoff, S., Lucht, W. 2007. *Potential future changes in water limitations of the terrestrial biosphere*. Climatic Change. **80** (3): 277-299.

Gómez-Gesteira, M., Gimeno, L., de Castro, M., Lorenzo, M.N., Álvarez, I., Nieto, R., Taboada, J.J., Crespo, A.J.C., Ramos, A.M., Iglesias, I., Gómez-Gesteira, J.L., Santo, F.E., Barriopedro, D., Trigo, I.F. 2011. *The state of climate in NW Iberia*. Climate Research. **48**: 109-144.

Gómez-Viñas, Sánchez-González, R., Sánchez-Cela, J. 1996. *As precipitacións*. En: Díaz-Fierros, F. (Ed). *As augas de Galicia*. Consello da Cultura Galega. pp. 41-105.

- Govers, G.** 1991. *Rill erosion on arable land in central Belgium. Rates, controls and predictability.* Catena. **18**: 133-155.
- Gruszowski, K.E., Foster, I.D., Lees, J.A., Charlesworth, S.M.** 2003. *Sediment sources and transport pathways in a rural catchment, Herefordshire, UK.* Hydrological Processes. **17**: 2665-2681.
- Gupta, H.V., Sorooshian S., Yapo, P.O.** 1999. *Status of automatic calibration for hydrological models: comparison with multilevel expert calibration.* Journal of Hydrology Engineering. **4 (2)**: 135-143.
- Hamilton, E.W., Heckathorn, S.A., Joshi, P., Wang, D., Barua, D.** 2008. *Interactive effects of elevated CO₂ and growth temperature on the tolerance of photosynthesis to acute heat stress in C3 and C4 species.* Journal of Integrative Plant Biology. **50**: 1375-87.
- Harder, S.C., Amatya, D.M., Callahan, T.J., Trettin, C.C., Hakkila, J.** 2007. *Hydrology and water budget for a forested atlantics coastal plain watershed, South Carolina.* Journal of the American Water Resources Association. **43**: 563–575.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A.** 1985. *Reference crop evapotranspiration from temperature.* Applied Engineering in Agriculture. **1**: 96-99.
- Harmel, R.D., King, K.W., Slade, R.M.** 2003. *Automated storm water sampling on small watersheds.* Applied Engineering in Agriculture. **19 (6)**: 667-674.
- Heaney, S.I., Foy, R.H., Kennedy, G.J., Crozier, W.W., O'Connor, W.C.** 2001. *Impacts of agriculture on aquatic systems: lessons learnt and new unknowns in Northern Ireland.* Marine and Freshwater Research. **52**: 151-163.
- Hewitt, C.D., Griggs, D.J.** 2004. *Ensembles-based Predictions of Climate Changes and their Impacts.* Eos. **85**: 566.
- Hewlett, J.D., Hibbert A.R.** 1967. *Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas.* In: Sopper, W.E., Lull, H.W. (Eds.). Forest Hydrology. Pergamon Press, Oxford. pp. 275-290.

- Hoeg, S., Uhlenbrook, S., Leibundgut, Ch.** 2000. *Hydrograph separation in a mountainous catchment combining hydrochemical and isotopic tracers*. Hydrological Processes. **14**: 1199-1216.
- Holvoet, K., van Griensven, A., Seuntjens, P., Vanrolleghem, P. A.** 2005. *Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT*. Physics and Chemistry of the Earth. **30**: 518-526.
- Horton, R.E.** 1932. *Drainage Basin Characteristics*. Transactions of American Geophysical Union. **13**: 350-361.
- Horton, R.E.** 1945. *Erosion of stream and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology*. Bulletin of Geological Society of America. **56**: 275-370.
- Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguera, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A.,** 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 881 pp.
- Howard, A.D.** 1967. *Drainage analysis in geologic interpretation: a summation*. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists. **51**: 2246-2259.
- Howden, N.J.K., Bowes, M.J., Humphries, N., Colin, N.** 2009. *Water quality, nutrients and the European Union's Water Framework directive in a lowland agricultural region: Suffolk, south-east England*. Science of the Total Environment. **407**: 2966-2979.
- Hu, X., Mclsaac, G.F., David, M.B., Louwers, C.A.L.** 2007. *Modeling riverine nitrate export from an East-Central Illinois Watershed Using SWAT*. Journal of Environmental Quality. **36**: 996-1005.
- Hudson, N.** 1982. *Conservación de suelos*. Reverté, S. A. Barcelona. España.
- Hungate, B.A.** 2002. *Evapotranspiration and soil water content in a scrub-oak woodland under carbon dioxide enrichment*. Global Change Biology **8**: 289-298.

Huntley, D.A., Graham, J.L., Walling, D.E. 2001. *Land-Ocean Interaction: Measuring and modelling fluxes from river basins to coastal seas*. IWA Publishing, UK. 286 pp.

Ibáñez, J.J., Machado, C., Zucarello, V., González Huecas, C. 1995. *Modelos de simulación y variabilidad espacio-temporal*. En: Ibáñez, J.J., Machado, C. (Eds.). *Análisis de la variabilidad espacio-temporal y procesos caóticos en ciencias medioambientales*. Geofoma Ediciones. Logroño. España. pp. 111-132.

Iglesias, A., Estrela, T., Gallart, F. 2005. *Impactos sobre los recursos hídricos*. En: J.M. Moreno (coord.). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. España. pp. 303-353.

IGME (Instituto Tecnológico Geominero de España). 1981. *Mapa Geológico de España, 1:50000. Hoja 45. Betanzos*. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía. Madrid. España.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1990. *Climate Change 1990: The IPCC Scientific Assessment*. Report prepared for Intergovernmental Panel on Climate Change by Working Group I. Houghton, J.T., Jenkins, G.J., Ephraums, J.J. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain, New York, NY, USA and Melbourne, Australia. 410 pp.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.J., Meiro Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A., Maskell, K. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge and New York. 572 pp.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 881pp.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment

Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge.

Jones, P.D., Moberg, A. 2003. *Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2001*. *Journal of Climate*. **16**: 206-223.

Jordan, J.P. 1994. *Spatial and temporal variability of stormflow generation processes on a Swiss catchment*, *Journal of Hydrology*. **153**: 357–382.

Jordan-Meille, L., Dorioz, J.M. 2004. *Soluble phosphorus dynamics in an agricultural watershed*. *Agronomie*. **24**: 237-248.

Kannan, N., White, S.M., Worrall, F., Whelan, M.J. 2007. *Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modeling in SWAT-2000*. *Journal of Hydrology*. **332**: 456-466.

Kannan, N., White, S.M., Worrall, F., Whelan, M.J. 2000. *Hydrological modelling of a small catchment using SWAT-2000. Ensuring correct flow partitioning for contaminant modeling*. *Journal of Hydrology*. **334**: 64-72.

Kannan, N., White, S., Worrall, F., Whelan, M. 2003. *Modelling pollutants in runoff from the Colworth experimental Catchment*, *Proceedings of the 2nd International SWAT Conference, Bari, Italy*. pp. 149-154.

Karssenberg, D. J. 1996. *PC-RASTER Manual*. Version 2. Dept. of Physical Geography. University of Utrecht. Holand.

Katul, G., Manzoni, S., Palmroth, S., Oren, R. 2009. *A stomatal optimization theory to describe the effects of atmospheric CO₂ on leaf photosynthesis and transpiration*. *Annals of Botany*. **105 (3)**: 431-442.

Kiesel, J., Fohrer, N., Schmalz, B., White, M.J. 2010. *Incorporating landscape depressions and tile drainages of lowland catchments into spatially distributed hydrologic modelling*. *Hydrology Processes*. **24**: 1472-1486.

- Kirkby, M., Bracken, L., Reaney, S.** 2002. *The influence of land use, soils and topography on the delivery of hillslope runoff to channels in SE Spain*. *Earth Surface Processes and Landforms*. **27**: 1459–1473.
- Knisel, W.G.** 1980. *CREAMS: A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service Conservation Research Report. **No. 26**.
- Krause, P., Boyle, D.P., Bäse, F.** 2005. *Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment*. *Advances in Geosciences*. **5**: 83-87.
- Lamb, Q.D., Schmalz, B., Fohrer, N.** 2012. *Assessing the spatial and temporal variations of water quality in lowland areas, Northern Germany*. *Journal of Hydrology*. **428-439**: 137-147.
- Lana-Renault, N., Regüés, D.** 2009. *Seasonal patterns of suspended sediment transport in an abandoned farmland catchment in the Central Spanish Pyrenees*. *Earth Surface Processes and Landforms*. **34**: 1291–1301.
- Latron, J., Gallart, F.** 2008. *Runoff generation processes in a small Mediterranean research catchment (Vallcebre, Eastern Pyrenees)*. *Journal of Hydrology*. **358**: 206- 222.
- Lawler, D.M., McGregor, G.R., Phillips, I.D.** 2003. *Influence of atmospheric circulation changes and regional climate variability on river flow and suspended sediment fluxes in southern Iceland*. *Hydrological Processes*. **17**: 195–223.
- Lecce, S., Pease, P., Gares, P., Wang, J.** 2006. *Seasonal control on sediment delivery in a small coastal plain watershed, North Carolina, USA*. *Geomorphology*. **73**: 246-260.
- Leirós, M.C., Trasar-Cepeda, C., Seoane, S., Gil-Sotres, F.** 1999. *Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture*. *Soil Biology and Biochemistry*. **31**: 327-35.
- Lencastre, A., Franco, F.M.** 1992. *Lições de hidrologia (lessons in hydrology)*, 2nd Ed. New University of Lisbon Editorial Services, Lisbon. Portugal.
- Linsley R.K., Kohler, M.A., Paulhus, J.L.H., Wallace, J.S.** 1958. *Hydrology for engineers*. McGraw Hill. New York. USA. 512 pp.

- Llamas, J.** 1993. *Hidrología General, principios y aplicaciones*. Servicio Editorial Universidad del País Vasco. 635 pp.
- López-Bermúdez, F., Navarro-Hervas, F., Romero-Díaz, M.A., Conesa-García, C., Castillo-Sánchez, V., Martínez-Fernández, J., García-Alarcón, C.** 1988. *Geometría de cuencas fluviales: Las redes de drenaje del alto Guadalentín*. Proyecto LUCDEME IV. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Murcia. España. 225 pp.
- López-Moreno, J.I., Beguería, S., García-Ruiz, J.M.** 2006. *Trends in high flows in the Central Spanish Pyrenees: response to climatic factors or to land-use change?* Hydrological Sciences Journal. **51 (6)**: 1039-1050.
- Ludwig, B.,** 1992. *Érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du nord du bassin parisien: analyse de la variabilité des symptômes d'érosion a l'échelle du bassin versant élémentaire*. Thèse de doctorat, Université Strasbourg-I. 201 pp.
- MA.** 2003. *Ecosystems and Human Well-being: a Framework for Assessment*. Island Press, Washington, D.C.
- Macías, F., Otero, J.L., Romero, E., Verde, R., Parga, E., Rodríguez, L., Macías, F., Taboada, M.** 2003. *Seguimiento de la contaminación de suelos y aguas de Galicia por residuos agrarios eutrofizantes*. Xunta de Galicia, Santiago de Compostela.
- Macrae, M.L., English, M.C., Schiff, S.L., Stone, M.** 2007. *Capturing temporal variability for estimates of annual hydrochemical export from a first-order agricultural catchment in southern Ontario, Canada*. Hydrological Processes. **21**: 1651-1663.
- Macrae, M.L., English, M.C., Schiff, S.L., Stone, M.** 2010. *Influence of antecedent hydrologic conditions on patterns of hydrochemical export from a first-order agricultural watershed in Southern Ontario, Canada*. Journal of Hydrology. **389**: 101-110.
- MAFF.** 1991. *Code of good agricultural practices for the protector of water*. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. England. 80 pp.
- MARM.** 2008. *Informe balance del año hidrológico 2007-2008*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid. España. 201 pp.

Marsh, T.J., Dale, M. 2002. *The UK floods of 2000/01 a hydrometeorological Appraisal*. Water and Environment Journal. **16**: 180-188.

Martínez Catalán, J.R., Klein, E., De Pablo, J.G., González, F. 1984. *El Complejo de Órdenes: subdivisión, descripción y discusión sobre su origen*. Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe. **7**: 139-201.

Martínez-Cortizas, A., Castillo-Rodríguez, F., Pérez-Alberti, A. 1994. *Factores que intervienen en la precipitación y el balance de agua en Galicia*. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles. **18**: 79-96.

Martinkova, M., Hesse, C., Krysanova, V., Vetter, T., Hanel, M. 2011. *Potential impact of climate change on nitrate load from the Jizera catchment (Czech Republic)*. Physics and Chemistry of the Earth. **36**: 673-683.

Matalas, N.C. 1967. *Mathematical assessment of synthetic hydrology*. Water Resources Research. **3 (4)**: 937-945.

Meybeck, M., Laroche, L., Durr, H.H., Syvitski, J.P.M. 2003. *Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers*. Global and Planetary Change. **39**: 65-93.

Meyer, L.D., Foster, G.R., Nikolov, S. 1975. *Effect of flow rate and canopy on rill erosion*. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. **8**: 905-911.

Meza, F.J., Silva, D., Vigil, H. 2008. *Climate change impacts on irrigated maize in Mediterranean climates: Evaluation of double cropping as an emerging adaptation alternative*. Agricultural Systems. **98**: 21-30.

Mitchell, J.K., Bubenzer, G.D. 1980. *Soil loss estimation*. In: Kirkby, M.J., Morgan, R.P.C. (Eds.). Soil erosion. Chichester: John Wiley & Sons. pp. 17-62.

Moatar, F., Meybeck, M. 2007. *Riverine fluxes of pollutants: towards predictions of uncertainties by flux duration indicators*. Comptes Rendus Geoscience. **339 (6)**: 367-382.

Monaghan, R.M., Wilcock, R.J., Smith, L.C., TikkiSETTY, B., Thorrold, B.S., Costall, D. 2007. *Linkages between land management activities and water quality in an intensively*

farmed catchment in southern New Zealand. Agriculture, Ecosystems and Environment. **118**: 211-222.

Montgomery, D.R. 2007. *Dirt: The Erosion of Civilizations*. University of California Press, Berkeley. 295 pp.

Monteith, J.L. 1965. *Evaporation and the environment*. In: The state and movement of water in living organisms. 19th symposia of the Society for Experimental Biology. Cambridge Univ. Press, London, U.K. pp. 205-234.

MOPTMA. 1995. *Programa Nacional del Clima*. Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente.

Morán-Tejeda, E., Ceballos-Barbancho, A., Llorente-Pinto, J.M. 2010. *Hydrological response of Mediterranean headwaters to climate oscillations and land-cover changes: The mountain of Duero River basin (Central Spain)*. *Global and Planetary Change.* **72**: 39-49.

Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M.E. 1998. *The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments*. *Earth Surface Processes and Landforms.* **23**: 527-544.

Morgan, R.P.C., Quinton, J.N. 2001. *Erosion Modeling*. In: Harmon, R.S., Doe, W.W. (Eds.). *Landscape Erosion and Evolution Modeling*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York. pp. 117-143.

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L. 2007. *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. *Translations ASABE.* **50 (3)**: 885-900.

Morisawa, M. 1985. *Rivers: form and process*. Longman. Geomorphology texts. K.M. Clayton. University of East Anglia. London and New York. 223 pp.

Motovilov, Y., Gottschalk, G.L., Engeland, K., Rodhe, A. 1999. *Validation of distributed hydrological model against spatial observations*. *Agricultural and Forest Meteorology.* **98**: 257-277.

- Mukundan, R., Pradhanang, S.M., Pierson, D.C., Anandhi, A., Zion, M.S., Matonse, A.H., Lounsbury, D.G., Steenhuis, T.S.** 2013. *Suspended sediment source areas and future climate impact on soil erosion and sediment yield in a New York City water supply watershed*, USA. *Geomorphology*. **183**: 110-119.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V.** 1978. *River flow forecasting through conceptual models part I- a discussion of principles*. *Journal of Hydrology*. **10**: 282–290.
- Nearing, M.A.** 2001. *Potential changes in rainfall erosivity in the U.S. with climate change during the 21st century*. *Journal of Soil and Water Conservation*. **56**: 229-232.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Srinivasan, R. y Williams, J.R.** 2002. *Soil and Water Assessment Tool user's manual*. Texas Water Resources Institute, Colleague Station. TWRI report TR-192.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., King, K.W.** 2005. *SWAT theoretical documentation*. Grassland Soil and Water Research Laboratory, Texas. USA. 494 pp.
- Neitsch, S.L.** 2005. *Soil and Water Assessment Tool, theoretical documentation, version 2005*. Agricultural Research Service. Texas Agricultural Experiment Station, Texas, USA.
- Nunes, J. P., Seixas, J., Pacheco, N. R.** 2008. *Vulnerability of water resources, vegetation productivity and soil erosion to climate change in Mediterranean watersheds*. *Hydrological Processes*. **22 (16)**: 3115-3134.
- Oeurng, C., Sauvage, S., Sánchez-Pérez, J.M.** 2011. *Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model*. *Journal of Hydrology*. **401 (3-4)**: 145-153.
- Olesen, J.E., Bindi, M.** 2002. *Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy*. *European Journal of Agronomy*. **16**: 239-62.
- Owens, L.B., Edwards, W.M., van Keuren, R.W.** 1991. *Baseflow and stormflow transport of nutrients from mixed agricultural watersheds*. *Journal of Environmental Quality*. **20**: 407-414.

- Panagopoulos, Y., Makropoulos, C., Baltas, E., Mimikou, M.** 2011. *SWAT parameterization for the identification of critical diffuse pollution source areas under data limitations*. *Ecological Modelling*. **222**: 3500-3512.
- Palleiro, L., Rodríguez-Blanco, M.L., Taboada-Castro, M.M., Taboada-Castro, M.T.** 2013. *Hydrological response of a humid agroforestry catchment at different time scales*. *Hydrological Processes*. DOI: 10.1002/hyp.9714.
- Pellerin, B.A., Wollheim, W.M., Feng, X., Vörsmarty, C.J.** 2008. *The application of electrical conductivity as a tracer for hydrograph separation in urban catchments*. *Hydrological Processes*. **22**: 1810-1818.
- Pérez Muñuzuri, V., Fernández Cañamero, M., Gómez Gesteira, J.L.** 2009. *Evidencias e Impactos do Cambio Climático en Galicia*. Xunta de Galicia. Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible.
- Pérez, M., Filgueira, M., Freijido, M., Méndez, G.** 2000. *Parámetros morfométricos e hidrológicos de las cuencas de drenaje y ríos tributarios a la ría de Vigo. Estimaciones de las variaciones anuales en las cargas en suspensión y en disolución*. *Journal of Iberian Geology*. **26**: 171-187.
- Phomcha, P., Wirojanagud, P., Vangpaisal, T., Thaveevouthti, T.** 2011. *Predicting sediment discharge in an agricultural watershed: A case study of the Lam Sonthi watershed, Thailand*. *Science Asia*. **37**: 43-50.
- Pionke, H.B., Gburek, W.J., Schnabel, R.R., Sharpley, A.N., G.F. Elwinger.** 1999. *Seasonal flow, nutrient concentrations and loadings patterns in stream flow draining an agricultural hill-land watershed*. *Journal of Hydrology*. **220**: 62-73.
- Priestley, C., Taylor, J.** 1972. *On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters*. *Monthly Weather Review*. **100 (2)**: 81-92.
- Prieto, L., García-Herrera, R., Díaz, J., Hernández, E., Del Teso, T.** 2004. *Minimum extremes temperatures over Peninsular Spain*. *Global and planetary change*. **44**: 59-71.

- Pruski, F.F., Nearing, M.A.** 2002a. *Runoff and soil-loss responses to changes in precipitation: a computer simulation study*. Journal of Soil and Water Conservation. **57 (1)**: 7-16.
- Pruski, F.F., Nearing, M.A.** 2002b. *Climate-induced changes in erosion during the 21st century for eight U.S. locations*. Water Resources Research, **38 (12)**: 34-1-34-12.
- Qinton, J.N.** 1994. *Validation of physically based erosion models, with particular reference to EUROSEM*. Conserving Soil Resources (de. R. J. Rickson). pp. 300-313.
- Raposo, J.R.** 2012. *Evaluación cuantitativa de los recursos hídricos subterráneos de la demarcación hidrográfica de Galicia Costa y de los impactos hidrogeológicos producidos por infraestructuras subterráneas y por el cambio climático*. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Raposo, J.R., Dafonte, J., Molinero, J.** 2013. *Assessing the impact of future climate change on groundwater recharge in Galicia Costa*. Hydrogeology Journal. **21 (2)**: 459-479.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., Saxton, K.E.** 1982. *Estimation of soil water properties* Transactions of the ASAE. **25**: 1316-1320.
- Rial Rivas, M.E.** 2007. *Investigación dos procesos que regulan o caudal e a calidade das augas na bacía do río Anllóns*. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela. 482 pp.
- Rial Rivas, M.E., Álvarez, M., Díaz-Fierros, F.** 2009. *Tendencias dos caudais medios, máximos e mínimos nas bacías galegas desde 1970*. En: Pérez Muñuzuri, V., Fernández Cañamero, M., Gómez Gesteira (Coords.). Evidencias e Impactos do Cambio Climático en Galicia. Xunta de Galicia. Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible. pp. 209-245.
- Rial Rivas, M.E., Díaz-Fierros, F.** 2009. *Influencia do cambio climático nas fenofases de diferentes especies vexetais e animais*. En: Pérez Muñuzuri, V.; Fernández Cañamero, M., Gómez Gesteira. (Coords.). Evidencias e Impactos do Cambio Climático en Galicia. Xunta de Galicia. Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible. pp. 91-130.

- Rial Rivas, M.E., Varela, C., Álvarez, M.A., Díaz-Fierros, F. 2003. *Aporte de sedimentos y relación de descarga de un río de la zona húmeda española*. En: Bienes, R., Marqués, M.J. (Eds.). Actas del I Simposio Nacional sobre control de la erosión y degradación del suelo. Madrid. pp. 459-462.
- Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero. *Por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano*. Ministerio de Presidencia. BOE núm. 45 de 21 de Febrero de 2003.
- Robertson, D.M., Roerish, E.D. 1999. *Influence of various water quality sampling strategies on load estimates for small streams*, Water Resources Research. **35** (12): 3747-3759.
- Rodrigo, F.S., Trigo, R.M. 2007. *Trends in daily rainfall in the Iberian Peninsula from 1951-2002*. International Journal of Climatology. **27**: 513-529.
- Rodríguez-Blanco, M.L., Taboada-Castro, M.M., Taboada-Castro, M.T. 2010a. *Factors controlling hydro-sedimentary response during runoff events in a rural catchment in the humid Spanish zone*. Catena. **82**: 206–217.
- Rodríguez-Blanco, M.L., Taboada-Castro, M.M., Palleiro, L., Taboada-Castro M.T. 2010b. *Temporal changes in suspended sediment transport in an Atlantic catchment, NW Spain*. Geomorphology. **123**: 181-188.
- Rodríguez-Blanco, M.L., Taboada-Castro, M.M., Taboada-Castro, M.T. 2010c. *Sources and sediment yield from a rural catchment in humid temperate environment, northwest Spain*. Earth Surface Processes and Landforms. **35**: 272-277.
- Rodríguez-Blanco, M.L., Taboada-Castro, M.M., Taboada-Castro, M.T. 2010d. *Sediment and phosphorus loss in runoff from an agroforestry catchment, NW Spain*. Land Degradation & Development. **21**: 161-170.
- Rodríguez-Blanco, M.L., Taboada-Castro, M.M., Taboada-Castro, M.T. 2012. *Rainfall runoff response and event-based runoff coefficients in a humid area (northwest Spain)*. Hydrological Science Journal. **57** (3): 445-459.

- Rodríguez-Blanco, M.L., Taboada-Castro, M.M., Taboada-Castro, M.T.** 2013a. *Linking the field to the stream: soil erosion and sediment yield in a rural catchment, NW Spain*. Catena. **102**:74-81.
- Rodríguez-Blanco, M.L., Taboada-Castro, M.M., Taboada-Castro, M.T.** 2013b. *Phosphorus transport into a stream draining from a mixed land use catchment in Galicia (NW Spain): Significance of runoff events*. Journal of Hydrology. **481**: 12-21.
- Rodríguez-Blanco, M.L., Taboada-Castro, M.M., Keizer, J., Taboada-Castro, M.T.** 2013c. *Phosphorus Loss from a Mixed Land Use Catchment in NW Spain*. Journal of Environmental Quality. (In press).
- Rodríguez-Blanco, M.L., Taboada-Castro, M.M., Taboada-Castro, M.T.** 2013d. *Contrasting dynamics of nitrate and Kjeldahl nitrogen in a stream draining a rural catchment in Galicia (NW Spain)*. Communications in Soil and Plant Analysis. **44**: 415-421.
- Rodríguez-Blanco, M.L., Taboada-Castro M.M., Taboada-Castro, M.T., Oropeza-Mota, J.L.** 2013e. *Relationship between Phosphorus and Suspended Sediment Concentrations in a Stream Draining a Rural Area in NW Spain*. Communications in Soil and Plant Analysis. (In press).
- Rodríguez-Blanco, M.L., Taboada-Castro, M.M., Taboada-Castro, M.T., Oropeza-Mota, J.L.** 2013f. *Relating nitrogen export patterns from a mixed land use catchment in NW Spain with rainfall and streamflow*. Hydrological Processes. (In press).
- Rodríguez-Blanco, M.L., Taboada-Castro, M.M., Palleiro, L., Taboada-Castro, M.T.** 2013g. *Analysing the influence of different monitoring strategies on nutrient yield estimation from a small rural catchment in NW Spain*. Proceedings of TWAM 2013, International Conference & Workshops. pp. 1-4.
- Rodríguez-Suárez, J.A., Soto, B., Iglesias, M.L., Díaz-Fierros, F.** 2010. *Application of the 3PG forest growth model to a Eucalyptus globulus plantation in Northwest Spain*. European Journal of Forest Research. **129**: 573-583.

- Romero, M.A., López, F.** 1999. *Relación entre escorrentías superficiales y características físicas y ambientales en pequeñas cuencas fluviales (Alto Guadalquivir)*. Avenidas fluviales e inundaciones en la cuenca del Mediterráneo. University of Alicante, Alicante. pp. 171–183.
- Rosenzweig, C., Hillel, D.** 1998. *Climate Change and the Global Harvest. Potential Impacts of the Greenhouse Effect on Agriculture*. Oxford University Press: New York.
- Rosón, G., Cabanas, J.M., Pérez, F.F., Herrera Cortijo, J.L., Ruiz-Villarreal, M., Castro, C.G., Piedracoba, S., Álvarez-Salgado, X.A.** 2009. *Evidencias do cambio climático na hidrografía e a dinámica das rías e da plataforma galega*. En: Pérez Muñuzuri, Vivente; Fernández Cañamero, Marisa e Gómez Gesteira (Coords.). *Evidencias e Impactos do Cambio Climático en Galicia*. Xunta de Galicia. Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible.
- Ruiz, F., López, G., Toral, G., Alejano, R.** 2008. *Selvicultura de Eucalyptus globulus L.* En: Serrada, F., Montero, G., Reque, J.A. (Eds.) *Compendio de Selvicultura aplicada en España*. INIA. Ministerio de Educación y Ciencia. Fundación Conde del Valle Salazar. pp. 117-154.
- Rustad, L.E., Campbell, J.L., Marion, G.M., Norby, R.J., Mitchell, M.J., Hartley, A.E.** 2001. *A metaanalysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming*. *Oecologia*. **126**: 543-620.
- Saladié, O.** 2004. *Variaciones y tendencia secular de la precipitación en el sector nororiental de la Península Ibérica 1850-2000*. Universidad de Barcelona. Tesis doctoral inédita. 496 pp.
- Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R., Hauck, L.M.** 2001. *Validation of the SWAT Model on a large river basin with point and nonpoint sources*. *Journal of the American Water Resources Association*. **37**: 1169-88.
- Sardans, J., Peñuelas, J., Estiarte, M.** 2008. *Changes in soil enzymes related to C and N cycle and in soil C and N content under prolonged warming and drought in a Mediterranean shrubland*. *Applied Soil Ecology*. **39**: 223-235.

- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., Papendick, R.L.** 1986. *Estimating generalized soil-water characteristics from texture*. Soil Science Society of America Journal. **50(4)**: 1031-1036.
- Schmalz, B., Fohrer, N.** 2009. *Comparing model sensitivities of different landscapes using the ecohydrological SWAT model*. Advances in Geosciences. **21**: 91–98, doi: 10.5194/adgeo-21-91-2009.
- Seeger, M., Errea, M.P., Beguería, S., Arnáez, J., Martí, C., García-Ruiz, J.M.** 2004. *Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees*. Journal of Hydrology, **288 (3-4)**: 299-311.
- Sharpley, A.N., Williams, J.R.** 1990. *EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator), 1. model documentation*. USDA Agricultural Research Service, Washington DC.
- Sheridan, G.Y., Noske, P.J.** 2007. *Catchment-scale contribution of forest roads to stream exports of sediment, phosphorus and nitrogen*. Hydrological Processes. **21**: 3107-3122.
- Shrestha, R.R., Dibike, Y.B., Prowse, T.** 2011. *Modeling climate change impacts on hydrology and nutrient loading in the upper Assiniboine catchment*. Journal of the American Water Resources Association. **48**: 74-89.
- Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S.W., Gupta, V.K., Karambiri, H., Lakshmi, V., Liang, X., McDonnell, J.J., Mendiondo, E.M., O'Connell, P.E., Oki, T., Pomeroy, J.W., Schertzer, D., Uhlenbrook, S., Zehe, E.** 2003. *IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences*. Hydrological Sciences Journal. **48 (6)**: 857-880.
- Sloan, P.G., Moore, I.D.** 1984. *Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds*. Water Resources Research. **20 (12)**: 1815-1822.
- Somura, H., Takeda, I., Arnold, J.G., Mori, Y., Jeong, J., Kannan, N., Hoffman, D.** 2012. *Impact of suspended sediment and nutrient loading from land uses against water quality in the Hii River basin, Japan*. Journal of Hydrology. **450-451**: 25-35.

- Spruill, C.A., Workman, S.R., Taraba, J.L.** 2000. *Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model*, Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers). **43**: 1431–1439.
- Steege, A., Govers, G., Takken, I., Nachtergaele, J., Poesen, J., Merckx, R.** 2001. *Factors controlling sediment and phosphorus export from two Belgian agricultural catchments*. Journal of Environmental Quality. **30**: 1249-1258.
- Strahler, A.N.** 1964. *Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks*. In: Chow, V.T. (Eds.). Handbooks of Applied Hydrology. Mc Graw-Hill Book Co. New York. **4**: 39-76.
- Syvitski, J.P.M., Peckham, S.D., Hilberman, R., Mulder, T.** 2003. *Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: a planetary perspective*. Sedimentary Geology. **162 (1-2)**: 5-24.
- Taboada, J.J., Cabrejo, A., Guarín, D., Ramos, A.M.** 2009. *Tendencies of extreme values on rainfall and temperature and its relationship with teleconnection patterns*, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-7426-1.
- Taboada-Castro, M.M., Lado-Liñares M., Diéguez A., González, A.** 1999. *Evolución temporal de la infiltración superficial a escala de parcela*. En: González, A., Taboada, M.T. (Eds.). Avances sobre el estudio de la erosión hídrica. Universidad de A Coruña. España. pp. 101-127.
- Taboada-Castro, M.T., Taboada-Castro, M.M., Rodríguez-Blanco, M.L.** 2010. *Erosión hídrica en suelos agrícolas*. En: Fra Paleo, U. (Ed). Riesgos Naturales en Galicia. El encuentro entre naturaleza y sociedad. Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico Universidad de Santiago de Compostela. Santiago de Compostela. ISBN: 978-849887-534-8. pp. 183-202.
- Tallaksen, L.M.** 1995. *A review of baseflow recession analysis*. Journal of Hydrology. **165**: 349-370.
- Thomas, J.M.G., Boote, K.J., Allen, I.H., Gallo-Meagher, M., Davis, J.M.** 2003. *Elevated temperature and carbón dioxide effects on soybean seed composition and transcript abundance*. Crop Science. **43**: 1548-1557.

- Thorntwaite, C.W.** 1948. *An approach toward a rational classification of climate*, Geological Revue.
- Tolson, B.A., Shoemaker, C.A.** 2007. *Cannonsville reservoir watershed SWAT2000 model development, calibration and validation*. Journal of Hydrology. **337**: 68-86.
- Ullrich, A., Volk, M.** 2010. *Influence of different nitrate-N monitoring on load estimation as a base for model calibration and evaluation*. Environment Monitoring Assessment. **171**: 513-527.
- UNESCO.** 2011. *The impact of Global Change on Water Resources: The response of UNESCO's International Hydrological Programme*. UNESCO, Division Water Sciences. Paris. Francia.
- Uriarte, A.** 1998. *Sediment dynamics on the inter-continental shelf on the Basque Country (N. Spain)*. Tesis Doctoral. Universidad de Southampton. pp. 302.
- Valcárcel, M., Taboada, M.T., Dafonte, J.** 2003. *Ephemeral gully erosion in northwestern Spain*. Catena. **50 (2-4)**: 199-216.
- van Deursen, W.P., Wesseling, C.G.** 1992. *The PC-RASTER Package*. Department of Physical Geography. University of Utrecht. 198 pp.
- van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Sirinivasan, R.** 2006. *A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models*. Journal of Hydrology. **324**: 10-23.
- Varela, C.** 2002. *Control, diagnosis y prevención de la contaminación difusa en una cuenca agraria*. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela. 632 pp.
- Vázquez, M.X., Prada, A.** 2009. *Valoración económica dos efectos do cambio climático no turismo*. En: Pérez Muñuzuri, Vivente; Fernández Cañamero, Marisa e Gómez Gesteira. Evidencias e Impactos do Cambio Climático en Galicia. Xunta de Galicia. Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible.
- Veith, T.L., Ghebremichael, L.T.** 2009. *How to: applying and interpreting the SWAT Auto-calibration tools*. In: Proceedings of Fifth International SWAT Conference. August. pp. 5-7.

- VVAA.** 2007. *El cambio climático en España. Informe para el Presidente del Gobierno elaborado por expertos en cambio climático. Documento resumen.* Noviembre 2007.
- Walling, D.E.** 2007. *Global change and the sediment loads of the world's rivers.* Proceedings of the Tenth International Symposium on River Sedimentation. pp. 112-30.
- White, K.L., Chaubey, I.** 2005. *Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model.* 2005. Journal of the American Water Resources Association. pp. 1077-1089.
- Whitfield, P., Reynolds, C.J., Cannon, A.J.** 2002. *Modelling streamflow in present and future climates: Examples from the Georgia Basin, British Columbia.* Canadian Water Resources Journal. **27**: 427-456.
- Williams, J.R.** 1969. *Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients.* Trans. ASAE. **12(1)**: 100-103.
- Williams, J.R.** 1975. *Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor.* In: Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources. ARS.S-40, US Gov. Print. Office: Washington, DC. pp. 244-252.
- Williams, J.R.** 1995. *The EPIC model.* In: Singh, V.P. (Ed.), Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch. pp. 909-1000.
- Williams, J.R., Berndt, H.D.** 1977. *Sediment yield prediction based on watershed hydrology.* Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. **20**: 1100-1104.
- Wischmeier, W.H.** 1959. *A rainfall erosion index for a Universal Soil-Loss Equation.* Soil Science Society Proceedings. **23**: 246-249.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D.** 1978. *Predicting rainfall erosion losses.* USDA. Agricultural Research Service. Handbook. 537 pp.
- WMO** 1980a. *Manual on Stream Gauging. Fieldwork.* Volume I. World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland. Operational Hydrology Report Nº 13. 519 pp.

- WMO** 1980b. *Manual on Stream Gauging. Computation of discharge*. Volume II. World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland. Operational Hydrology Report Nº 13. 519 pp.
- Xu, Z.X., Pang, J.P., Llu, C.M., Li, J.Y.** 2009. *Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun catchment by using SWAT model*. Hydrological Processes. **23**: 3619-3630.
- Zabaleta, A., Martínez, M., Uriarte, J.A., Antigüedad, I.** 2007. *Factors controlling suspended sediment yield during runoff events in small headwater catchments of the Basque Country*. Catena. **71**: 179-190.
- Zabaleta, A., Antigüedad, I.** 2012. *Streamflow response of a small forested catchment on different time scales*. Hydrology and Earth System Sciences. **9**: 9257–9293.
- Zabaleta, A., Meaurio, M., Ruíz, E., Antigüedad, I.** 2013. *Simulation Climate Change Impact on Runoff and Sediment Yield in a Small Watershed in the Basque Country, Northern Spain*. Journal of Environmental Quality. doi: 10.2134/jeq2012.0209.
- Zak, D.R., Holmes, W.E., MacDonald, N.W., Pregitzer, K.S.** 1999. *Soil temperature, matric potential, and the kinetics of microbial respiration and nitrogen mineralization*. Soil Science Society of America Journal. **63**: 575-584.
- Zhu, Q., Jiang, H., Peng, C., Liu, J., Fang, X., Wei, X.** 2012. *Effects of future climate change, CO₂ enrichment, and vegetation structure variation on hydrological processes in China*. Global and Planetary Change. **80-81**: 123-135.
- Zhu, Q., Jiang, H., Peng, C., Liu, J., Wei, X., Fang, X., Liu, S., Zhou, G., Yu, S.** 2011. *Evaluating the effects of future climate change and elevated CO₂ on the water use efficiency in terrestrial ecosystems of China*. Ecological Modelling. **222 (14)**: 2414-2429.