



Entregável 3.1.1

Modelação dos recursos hídricos no território SUDOE

Modélisation des ressources en eau sur le territoire de SUDOE

Modelación de los recursos hídricos en el territorio SUDOE



Dezembro 2018

Modelação dos recursos hídricos no território SUDOE

Modélisation des ressources en eau sur le territoire de SUDOE

Modelación de los recursos hídricos en el territorio SUDOE

Produto da actividade 3.1.1

Produit d'activité 3.1.1

Producto de la actividad 3.1.1

Descrição:

Modelação, MOHID-Land, SWAT, Caudais Qualidade da água, Nitratos.

Description:

Modélisation, MOHID-Land, SWAT, Flux Qualité de l'eau, Nitrates

Descripción:

Modelación, MOHID-Land, SWAT, Caudales, Calidad del agua, Nitratos.

Coordenação do entregável

Ramiro Neves

IST

Autores

Ana Ramos Oliveira	IST
Sabine Sauvage	CNRS
Juan-Luis Lechuga	UPV/EHU
Roxelane Cakir	CNRS
Maite Meaurio	UPV/EHU
Mélanie Raimonet	CNRS
José-Miguel Sánchez-Pérez	CNRS
Juan-Jesús Gomiz Pascual	UCA
Julián Ladera	UCLM
Leticia Palazón	CSIC
Javier Paredes	UPV
Francisco Javier Rodríguez Benlloch	UPV
José Bodoque	UCLM
Santiago Beguerias	CSIC
Tiago Ramos	IST

Índice

Conteúdo

1. Introdução / Introduction / Introducción.....	1
2. Aplicação do modelo MOHID-Land ao território SUDOE.....	2
2.1 Área de estudo / Domaine d'étude / Área de estudio.....	2
2.2. Modelo / Modèle / Modelo.....	3
2.3. Escala da aplicação / Échelle d'application / Escala de aplicación	4
2.4. Dados de base / Données de base / Datos básicos	4
2.4.1. Meteorologia.....	4
2.4.2. Topografia.....	4
2.4.3. Tipos de solo	5
2.4.4. Secções transversais	5
2.4.5. Uso de solo	5
2.4.6. Barragens	5
2.5. Metodologia para calibração e validação dos resultados / Méthodologie pour la calibration et la validation des résultats / Metodología para la calibración y validación de los resultados.....	6
2.6. Resultados / Résultats / Resultados	7
2.6.1. Cantábria	8
2.6.2. Minho.....	9
2.6.3. Douro.....	11
2.6.4. Tejo	13
2.6.5. Guadiana	14
2.6.6. Guadalquivir	16
2.7. Conclusões / Conclusions / Conclusiones	17
3. Aplicação do modelo SWAT ao território SUDOE	18
3.1. Área de estudo / Domaine d'étude / Área de estudio.....	18
3.2. Modelo / Modèle / Modelo.....	18
3.3. Escala da aplicação / Échelle d'application / Escala de aplicación	19
3.4. Dados de base / Données de base / Datos básicos	19
3.5. Metodologia para calibração e validação dos resultados / Méthodologie pour la calibration et la validation des résultats / Metodología para la calibración y validación de los resultados.....	20

3.5.1. Hidrologia	21
3.5.2. Nitratos	22
3.6. Resultados / Résultats / Resultados	25
3.7. Formato e localização dos resultados no servidor AGUAMOD / Format et emplacement des résultats sur le serveur AGUAMOD / Formato y localización de los resultados en el servidor AGUAMOD	27
3.8. Conclusões / Conclusions / Conclusiones	27

1. Introdução / Introduction / Introducción

A tarefa 3.1 teve como objectivo a modelação dos recursos hídricos no território SUDOE com os modelos MOHID-Land (www.mohid.com/) e SWAT (<https://swat.tamu.edu/>), nomeadamente os volumes de água drenados e restantes componentes do balanço hídrico, bem como as cargas de sedimentos e nitratos de fontes antrópicas difusas. Os modelos foram implementados utilizando a informação compilada no âmbito da GT1, nomeadamente cartas de solos, bases de dados e funções de pedotransferência das propriedades do solo, cartas de uso do solo e dados meteorológicos, tendo os seus resultados sido posteriormente validados através da comparação com a informação disponível relativa a caudais e cargas de sedimentos e nitratos monitorizadas nas diferentes bacias pelas diversas agências governamentais-regionais. Face à dimensão da tarefa, a área de estudo foi dividida pelos parceiros de acordo com a Tabela 1. Este entregável apresenta agora uma breve descrição dos modelos utilizados, das metodologias seguidas, dos dados de entrada e dos principais resultados obtidos.

Tabla 1. Resumen sobre las áreas de estudio, responsables y modelos utilizados

Demarcación	Responsable	Modelización		
	obtención datos	SWAT	MOHID	AQUATOOL
Andalucía Mediterránea	UCA	UCA	IST	UPV
Cantábrico	UPV/EHU	UPV/EHU	IST	UPV
Cataluña	CNRS + CSIC	CNRS	IST	UPV
Duero	UCLM	UCLM	IST	UPV
Ebro	CSIC	CSIC	IST	UPV
Guadalete y Barbate	UCA	UCA	IST	UPV
Galicia-Costa	UPV/EHU	UPV/EHU	IST	UPV
Guadalquivir	UCA/CSIC	UCA/CSIC	IST	UPV
Guadiana	UCA	UCA	IST	UPV
Júcar	UPV	CNRS	IST	UPV
Miño-Sil	UPV/EHU	UPV/EHU	IST	UPV
País Vasco	UPV/EHU	UPV/EHU	IST	UPV
Segura	UPV	UCLM	IST	UPV
Tajo	UCLM	UCLM	IST	UPV
Tinto, Odiel y Piedras	UCA	UCA	IST	UPV
Francia*	CNRS + UPV/EHU (Adour)	CNRS + UPV/EHU	IST	UPV
Portugal	INIAV	CNRS	IST	UPV

2. Aplicação do modelo MOHID-Land ao território SUDOE

2.1 Área de estudo / Domaine d'étude / Área de estudio

O modelo MOHID-Land foi implementado em todo o território SUDOE. No entanto, devido à capacidade de cálculo disponível, dividiu-se a área de estudo em três domínios distintos, nomeadamente as partes Oeste e Este da Península Ibérica e o território do sul da França (Figura 1).

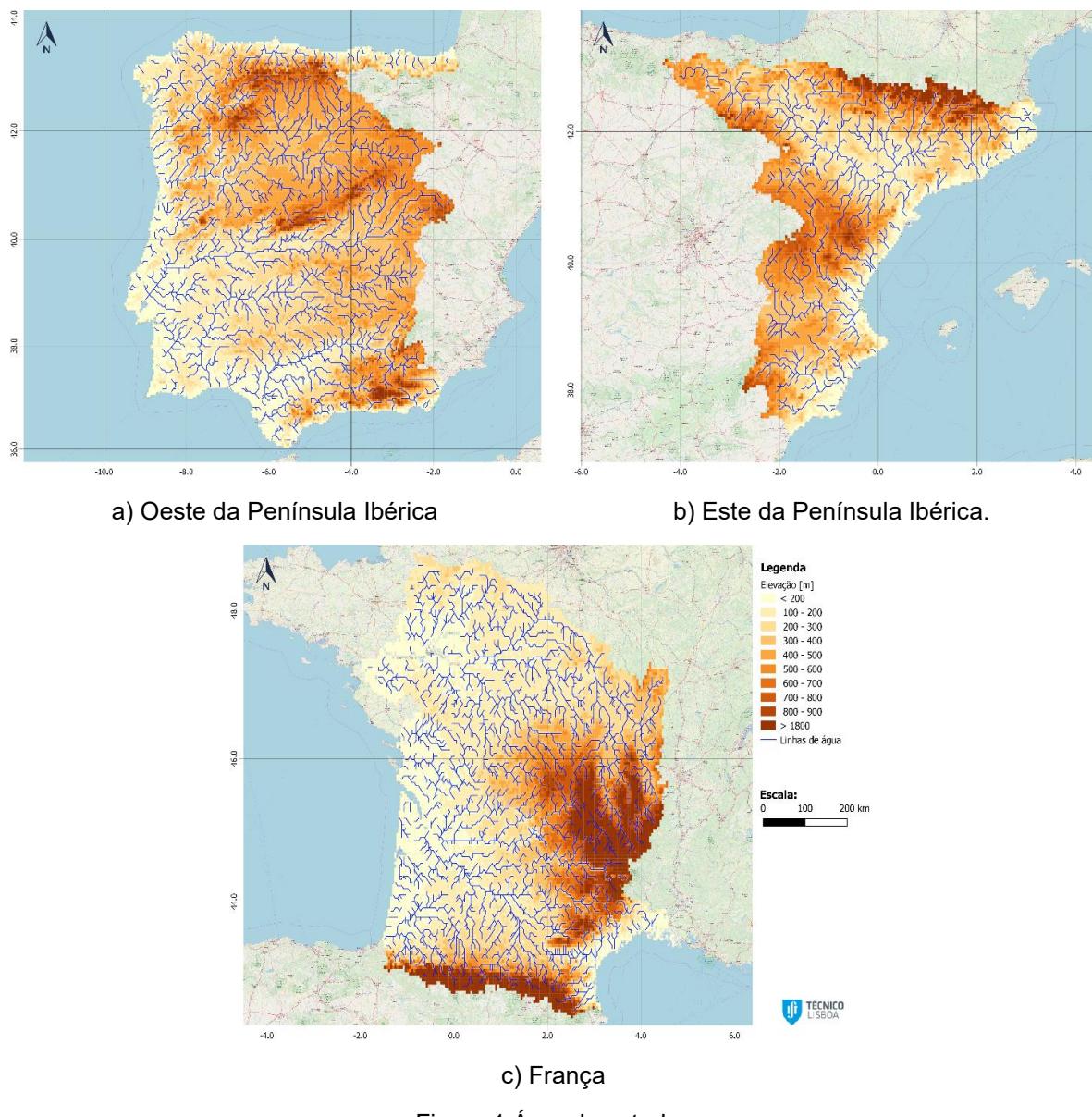


Figura 1 Área de estudo.

O domínio Oeste da Península Ibérica está delimitado a leste pelas linhas de festo das bacias do Tejo, do Douro, do Guadiana, do Guadalquivir e da região da Cantábria e a Norte, a Sul e a Oeste pela linha de costa. Assim, este domínio engloba as seguintes bacias hidrográficas:

- Minho (Portugal e Espanha);
- Douro (Portugal e Espanha);
- Tejo (Portugal e Espanha);
- Guadiana (Portugal e Espanha);
- Guadalquivir (Espanha);
- Região Cantábrica (Espanha);
- Região da Galiza (Espanha);
- Sado (Portugal);
- Mondego (Portugal).

O domínio Este da Península Ibérica é delimitado a Norte pela cordilheira dos Pirenéus, a Sul e Este pela linha de costa do Mar Mediterrâneo e a Oeste pelo anterior domínio. Este domínio engloba as seguintes bacias hidrográficas:

- Ebro;
- Segura;
- Júcar.

Por fim, o domínio denominado França abarca o território delimitado a Sul pela cordilheira dos Pirinéus, a Oeste pelo Golfo de Biscaia, a Norte pela bacia do Loire, Este pela linha de costa do Mar Mediterrâneo e Alpes. As bacias pertencentes a este domínio são:

- Garonne (França);
- Adour (França);
- Aude (França).

2.2. Modelo / Modèle / Modelo

O modelo MOHID Land inclui quatro compartimentos principais, cada um deles associado a um meio físico onde a água se movimenta - a atmosfera, o meio poroso, a superfície do solo e a rede de drenagem - simulando as trocas de água entre eles em contínuo, respeitando as leis de conservação da massa e do momento.

O módulo da atmosfera não faz simulações explícitas, sendo a sua função ler e processar dados meteorológicos (precipitação, temperatura, radiação solar, humidade relativa, velocidade do vento) que podem servir de condições de fronteira à modelação hidrológica. Estes, podem ser provenientes de estações de medição ou de modelos de simulação atmosférica.

O escoamento na superfície do solo é simulado por um modelo bidimensional (2D), o movimento da água no meio poroso é calculado por um modelo tridimensional (3D) e o escoamento na rede de drenagem usa um modelo unidimensional (1D). As malhas dos escoamentos superficial e no meio poroso usam a mesma discretização horizontal. No meio poroso o solo é dividido verticalmente em camadas de espessura variável de modo a descrever a variabilidade vertical do teor de água no solo, dos solutos e de outras propriedades dos solos. Por fim, a rede de drenagem é formada por uma rede de modelos 1D, definida com base na topografia do terreno.

O MOHID usa um método de cálculo baseado em volumes finitos. Os fluxos de água são calculados nas faces dos volumes e as variáveis de estado são calculadas no centro dos mesmos como resultados de um balanço de massa, sendo a sua taxa de variação o resultado da diferença entre o que entra e o que sai do volume, mais o que se produz menos o que se consome por acção dos processos biogeoquímicos. O passo temporal do cálculo é variável, sendo maior durante os períodos secos da simulação e menor durante os períodos húmidos, quando os fluxos aumentam.

2.3. Escala da aplicação / Échelle d'application / Escala de aplicación

O modelo foi aplicado em todo o território SUDOE com uma resolução de 5 km. Os resultados obtidos com esta malha podem, posteriormente, ser agregados segundo diferentes escalas, nomeadamente à escala do sistema de exploração.

2.4. Dados de base / Données de base / Datos básicos

Os dados de entrada necessários à implementação do modelo MOHID Land e apresentados nas secções seguintes foram interpolados para uma malha com resolução de 5 km.

2.4.1. Meteorologia

A informação de base relativa à meteorologia provém da base de dados SAFRAN, preparada pelo CSIC para Portugal e Espanha com uma resolução de 5 km e preparada para França, pelo CNRS, com uma resolução de 8 km. A referida base de dados disponibiliza valores horários de diversos parâmetros meteorológicos, incluindo a precipitação, a temperatura do ar, a radiação solar, a velocidade do vento e a humidade relativa.

Os dados meteorológicos foram agregados e disponibilizados em ficheiros com formato NetCDF, os quais foram convertidos para ficheiros no formato HDF5, utilizados pelo MOHID-Land.

2.4.2. Topografia

A topografia do domínio estudado foi obtida a partir da base de dados disponibilizada pela NASA através da missão *Shuttle Radar Topography Mission*. Esta base de dados

está disponível no formato *raster*, com resolução de 90 metros.

2.4.3. Tipos de solo

Os tipos de solo foram obtidos a partir da base de dados do *European Soil Data Centre* (ESDAC).

2.4.4. Secções transversais

As secções transversais das linhas de água foram definidas de acordo com Andreadis et al. (2013), onde a base de dados disponibilizada apresenta valores de profundidade e largura das secções em função da área drenada.

Para efeitos de modelação as secções transversais das linhas de água foram consideradas rectangulares.

2.4.5. Uso de solo

A informação relativa ao uso de solo foi recolhida a partir do Corine Land Cover 2012. Esta informação é disponibilizada pelo Copernicus Land Monitoring Service, no formato *raster* e com resolução de 100 m.

A referida informação serviu de base à definição dos valores do coeficiente de Manning na superfície, do Curve Number e do tipo de vegetação presente em cada célula da malha.

2.4.6. Barragens

A informação sobre os reservatórios no território SUDOE, nomeadamente a localização, o volume máximo admissível de ser armazenado (podendo este variar mensalmente) e o ano de construção foi obtida de diversas fontes.

A referida informação foi recolhida em diferentes websites portugueses e espanhóis, nomeadamente, o SNIRH (<https://snirh.apambiente.pt/>), Barragens de Portugal (http://cnpqb.apambiente.pt/gr_barragens/gbportugal/index.htm), os websites das diferentes regiões hidrográficas espanholas (SAIH Duero - <http://www.saihduero.es/>, SAIH Tajo - <https://saihtajo.chtajo.es/index.php>, etc) e embalses.net (<https://www.embalses.net/>).

Para além destes dados, foram ainda impostos os valores do caudal efluente em cada reservatório quando os mesmos estavam disponíveis. Estes dados foram obtidos a partir do website do SNIRH (<https://snirh.apambiente.pt/>) para as barragens em território português, enquanto que para as barragens em Espanha foram utilizados os valores definidos como “salidas” disponibilizados no FTP do CSIC.

No caso do MOHID-Land apenas foram consideradas as barragens com uma capacidade de armazenamento superior a 10 hm³, em concordância com a modelação a desenvolver com o software AquaTool.

2.5. Metodologia para calibração e validação dos resultados / Méthodologie pour la calibration et la validation des résultats / Metodología para la calibración y validación de los resultados

As simulações realizadas estendem-se por um período de aproximadamente 30 anos, com início em Outubro de 1979 e fim em Junho de 2014.

Para o domínio Oeste da Península Ibérica, os primeiros cinco anos de simulação (1979 a 1984) foram definidos como período de *warm-up* do modelo, os 10 anos seguintes (1984 a 2004) corresponderam ao período de calibração, enquanto os últimos 10 anos (2004 e 2014) dizem respeito ao período de validação.

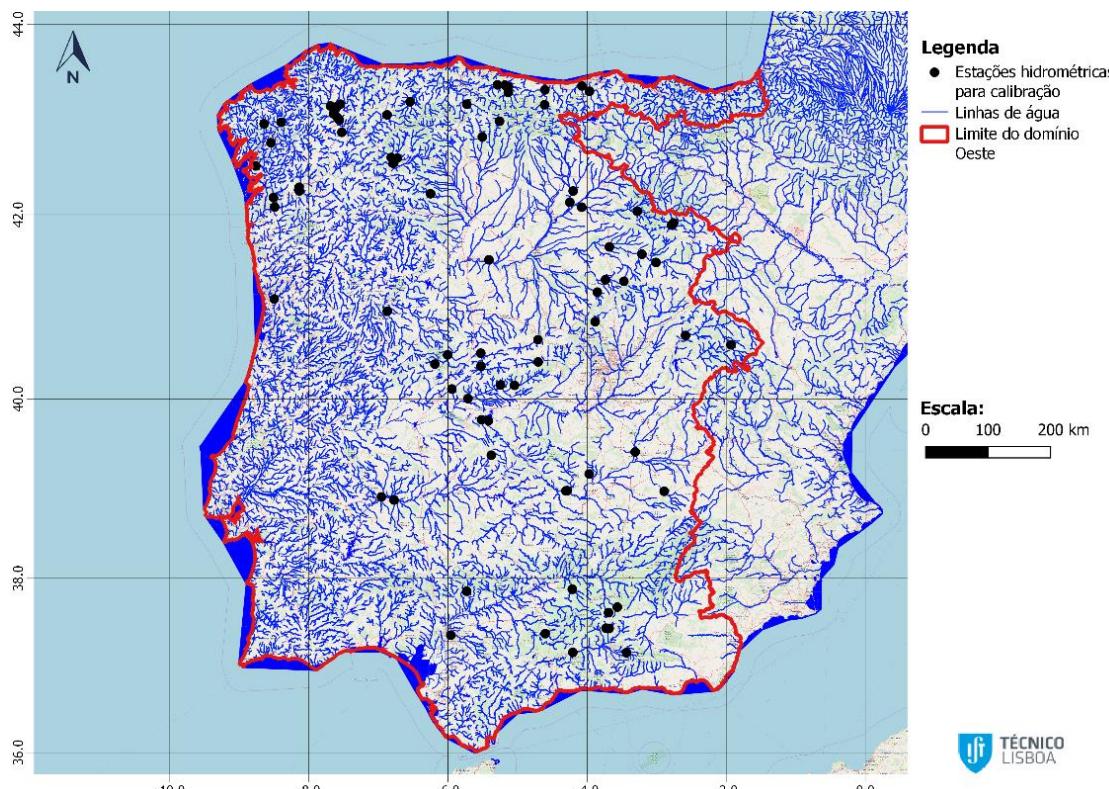


Figura 2 Estações para calibração e validação no domínio Oeste da Península Ibérica.

Naquele domínio, a calibração do caudal focou-se nos valores medidos em estações hidrométricas não influenciadas por caudais efluentes de barragens. A adopção desta metodologia pretende evitar a introdução de mais uma fonte de incerteza no processo de calibração, pois os valores impostos para o caudal efluente das barragens consideradas na simulação podem conter erros provenientes das mais diversas fontes, como erros de medição, arredondamentos por serem médias diárias, etc, e, portanto, não sendo estes valores completamente correctos, a soma dos mesmos com o caudal gerado de forma natural na simulação num determinado trecho do rio a jusante de uma barragem estará afectado pelo erro do valor do caudal efluente dessa mesma barragem. Assim, foram realizadas diversas simulações por forma a testar

qual o conjunto de parâmetros da simulação que melhor aproximam o caudal simulado ao caudal medido em estações cujo caudal medido resulta puramente de processos naturais. Na Figura 2 apresentam-se as localizações das estações utilizadas no processo de calibração e validação.

Dada a dimensão do domínio a modelar, uma vez calibrado e validado o modelo para o domínio Oeste da Península Ibérica, o mesmo conjunto de parâmetros será aplicado à modelação dos outros dois domínios (Este da Península Ibérica e França). Os resultados relativos ao caudal serão comparados com medições de estações hidrométricas cujo caudal não sofra influência de barragens, como referido anteriormente, de modo a validar também os resultados nessas áreas.

2.6. Resultados / Résultats / Resultados

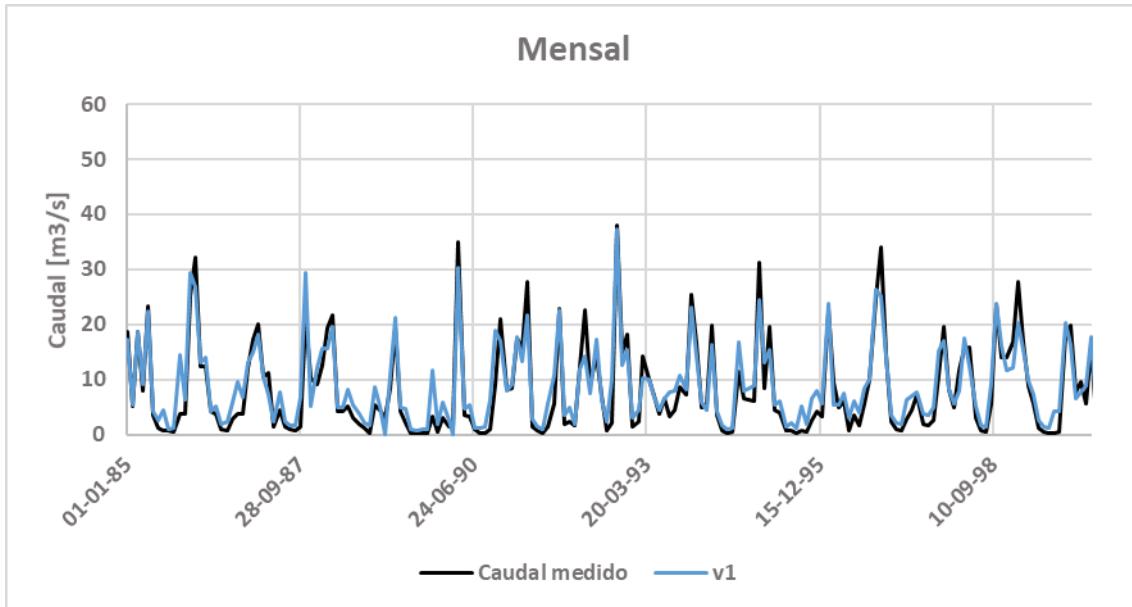
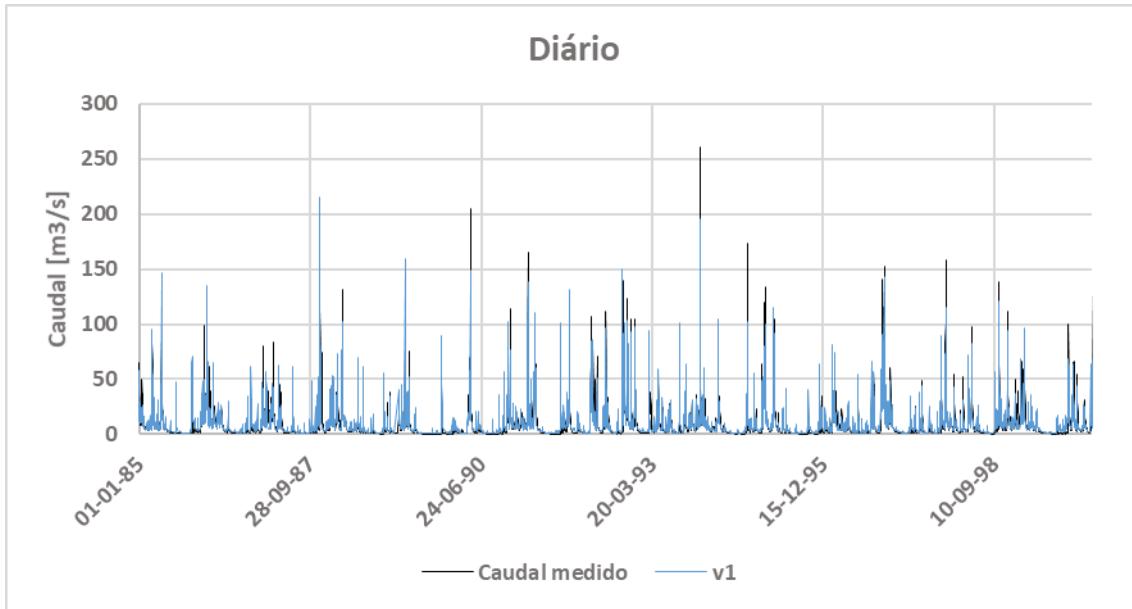
Os resultados obtidos foram analisados ao nível diário e mensal. Esta análise realizou-se visualmente com base nos gráficos caudal/tempo, mas, também, com recurso a diferentes parâmetros estatísticos, nomeadamente, o coeficiente de determinação (R^2), o coeficiente de Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), o Root Mean Square Error (RMSE) e o PBIAS.

Importa referir que foram realizadas várias simulações por forma a fazer uma análise de sensibilidade do MOHID-Land aos diferentes parâmetros que podem produzir alterações ao nível do caudal simulado, nomeadamente, as dimensões das secções transversais, o valor da condutividade hidráulica do solo na direcção vertical e horizontal e a espessura das camadas do solo. Essas simulações abrangeram os primeiros 10/15 anos do período de simulação referido anteriormente, sendo que o tempo gasto para simular cada mês variou entre os 20 e os 40 minutos, em função da quantidade de água precipitada.

Nas primeiras simulações realizadas não estava disponível informação relativa às estações hidrométricas nas bacias do rio Guadiana e Guadalquivir e, portanto, não foram extraídas séries temporais de caudal relativas a estas bacias.

Seguidamente apresentam-se alguns dos resultados obtidos para o domínio Oeste da Península Ibérica.

2.6.1. Cantábria



Parâmetros estatísticos

Diário

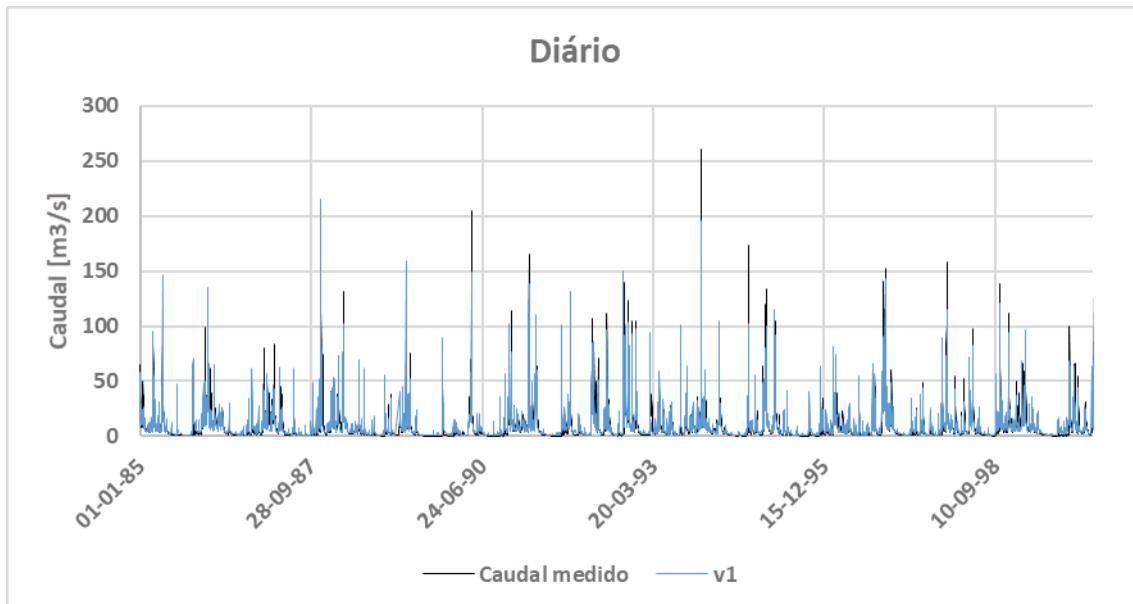
	RMSE	R2	PBIAS	NSE
Sim #1	11.55	0.670	-14.93	0.65
Sim #2	13.76	0.585	-18.31	0.34
Sim #3	13.74	0.602	-18.31	0.37
Sim #4	13.76	0.510	-19.93	0.16
Sim #5	13.76	0.592	-19.94	0.43

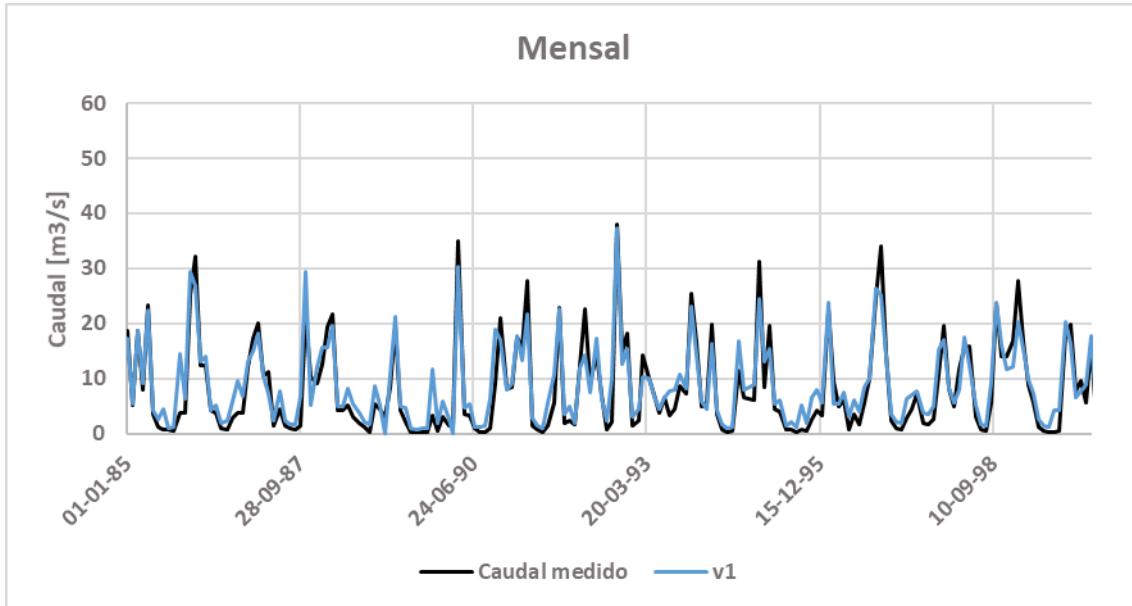
Sim #6	13.70	0.585	-20.56	0.44
Sim #7	13.38	0.606	-19.19	0.52
Sim #8	13.12	0.601	-21.75	0.50
Sim #9	12.65	0.626	-15.24	0.57

Mensal

	RMSE	R2	PBIAS	NSE
Sim #1	11.98	0.885	-10.53	0.870
Sim #2	13.13	0.842	-14.24	0.821
Sim #3	13.48	0.841	-15.13	0.828
Sim #4	11.99	0.830	-19.42	0.774
Sim #5	12.44	0.843	-16.41	0.824
Sim #6	12.29	0.839	-16.89	0.819
Sim #7	11.90	0.833	-15.43	0.815
Sim #8	12.28	0.848	-17.09	0.834
Sim #9	12.31	0.875	-9.27	0.871

2.6.2. Minho





Parâmetros estatísticos

Diário

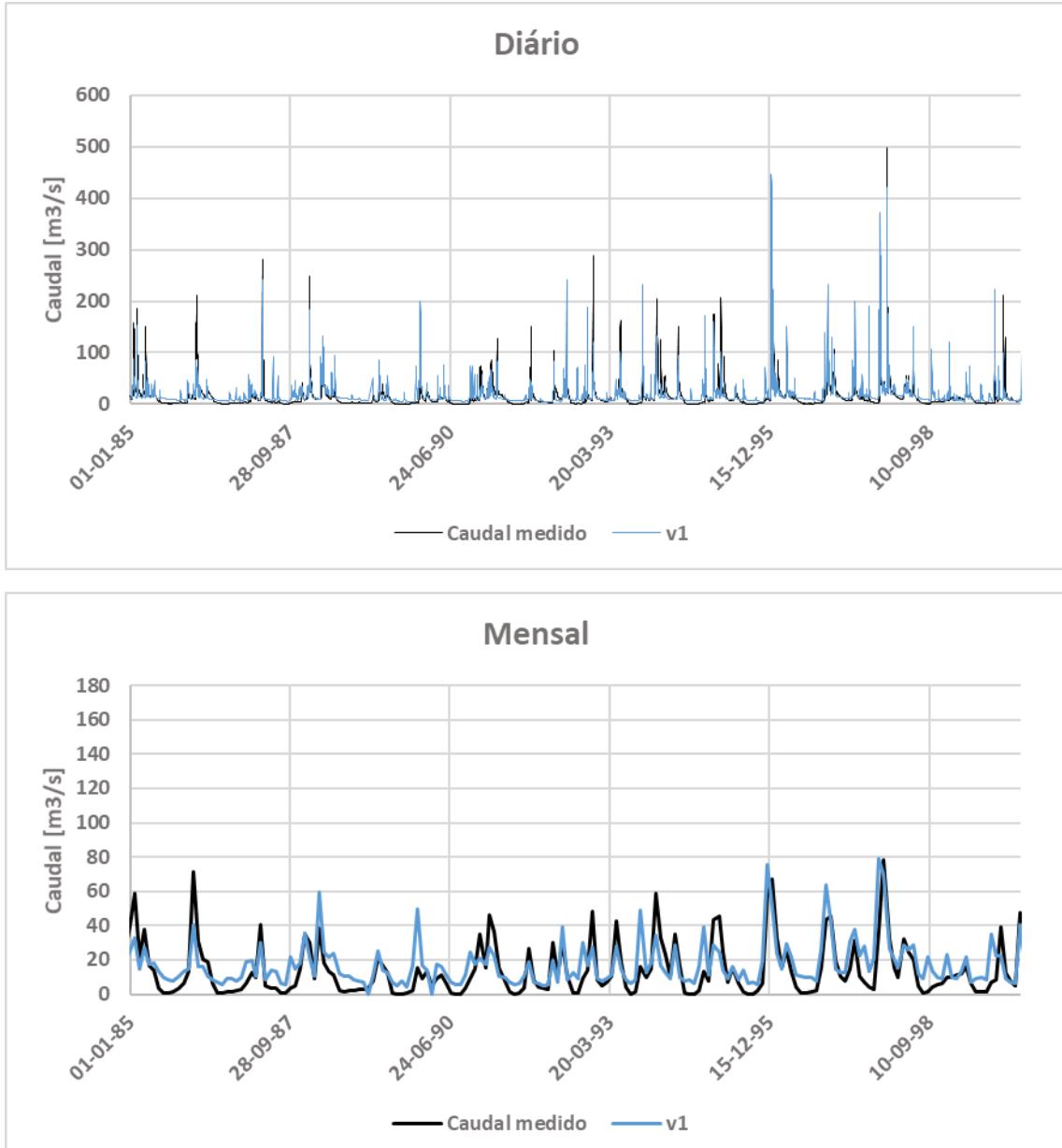
	RMSE	R2	PBIAS	NSE
Sim #1	11.55	0.670	-14.93	0.65
Sim #2	13.76	0.585	-18.31	0.34
Sim #3	13.74	0.602	-18.31	0.37
Sim #4	13.76	0.510	-19.93	0.16
Sim #5	13.76	0.592	-19.94	0.43
Sim #6	13.70	0.585	-20.56	0.44
Sim #7	13.38	0.606	-19.19	0.52
Sim #8	13.12	0.601	-21.75	0.50
Sim #9	12.65	0.626	-15.24	0.57

Mensal

	RMSE	R2	PBIAS	NSE
Sim #1	11.98	0.885	-24.18	0.87
Sim #2	13.13	0.842	-20.33	0.82
Sim #3	13.48	0.841	-24.53	0.83
Sim #4	11.99	0.830	-6.62	0.77
Sim #5	12.44	0.843	-22.23	0.82
Sim #6	12.29	0.839	-17.67	0.82

Sim #7	11.90	0.833	-16.24	0.82
Sim #8	12.28	0.848	-10.96	0.83
Sim #9	12.31	0.875	30.97	0.87

2.6.3. Douro



Parâmetros estatísticos

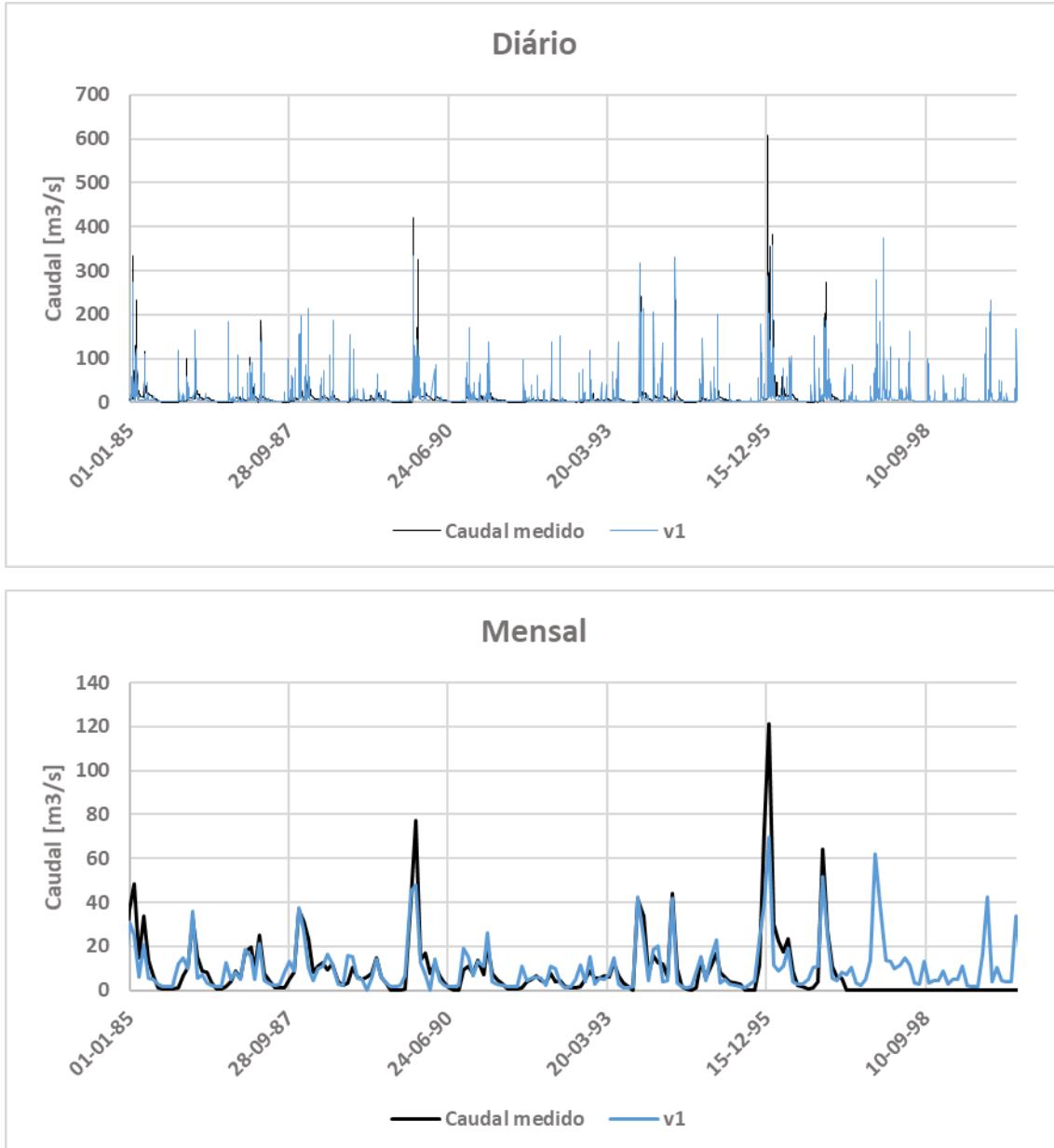
Diário

	RMSE	R2	PBIAS	NSE
Sim #1	21.14	0.454	6.27	0.34
Sim #2	21.65	0.410	14.51	0.27
Sim #3	20.65	0.446	3.07	0.28
Sim #4	20.03	0.562	13.01	0.56
Sim #5	20.03	0.404	13.01	0.31
Sim #6	22.93	0.297	22.09	0.12
Sim #7	22.93	0.367	19.05	0.32
Sim #8	25.04	0.317	21.08	0.32
Sim #9	25.50	0.403	46.30	0.36

Mensal

	RMSE	R2	PBIAS	NSE
Sim #1	25.86	0.566	-24.18	0.52
Sim #2	28.07	0.496	-20.33	0.48
Sim #3	28.85	0.553	-25.97	0.54
Sim #4	26.72	0.745	-3.56	0.69
Sim #5	27.60	0.505	-51.75	0.50
Sim #6	29.63	0.446	-16.75	0.38
Sim #7	28.45	0.567	-42.32	0.54
Sim #8	29.26	0.537	-3.84	0.58
Sim #9	32.07	0.675	88.31	0.59

2.6.4. Tejo



Parâmetros estatísticos

Diário

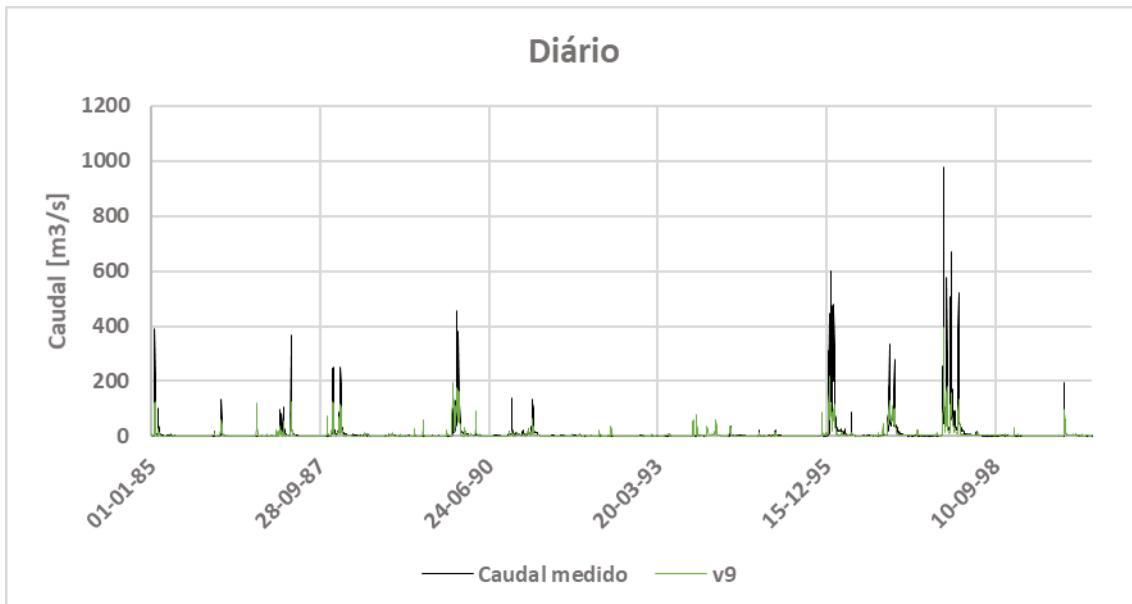
	RMSE	R2	PBIAS	NSE
Sim #1	20.47	0.510	15.74	0.49
Sim #2	24.75	0.408	14.68	0.02
Sim #3	24.98	0.406	13.88	0.01
Sim #4	22.35	0.484	14.25	0.27
Sim #5	22.37	0.385	14.25	0.09

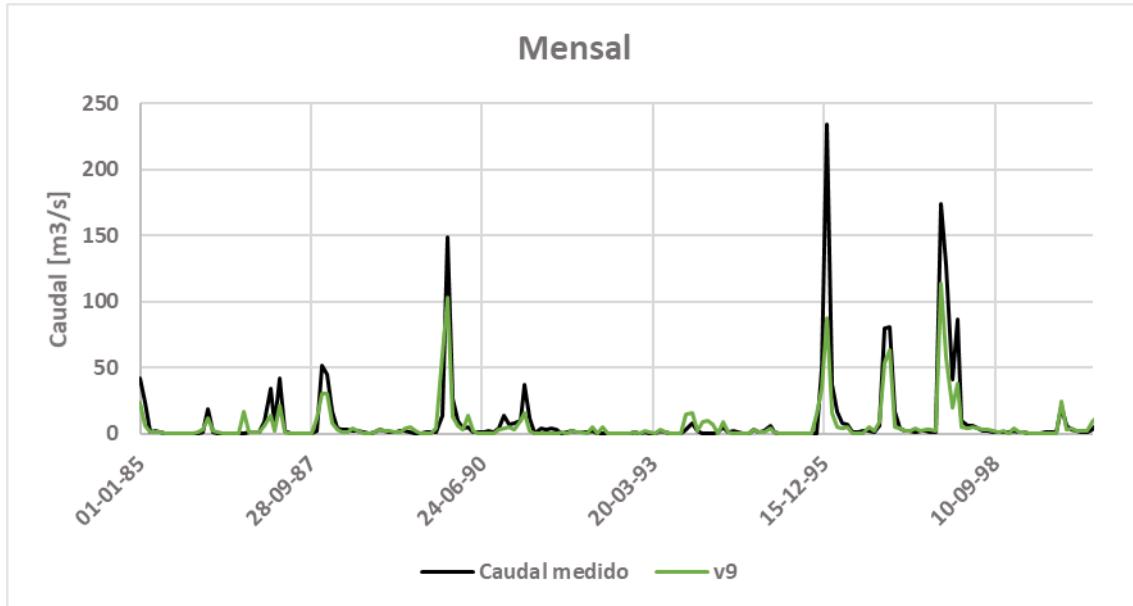
Sim #6	22.73	0.359	16.83	0.03
Sim #7	22.16	0.466	18.47	0.37
Sim #8	20.86	0.371	25.57	0.34
Sim #9	21.27	0.409	29.68	0.40

Mensal

	RMSE	R2	PBIAS	NSE
Sim #1	28.40	0.804	8.66	0.77
Sim #2	28.96	0.711	6.39	0.69
Sim #3	29.59	0.718	5.19	0.70
Sim #4	27.48	0.680	9.47	0.68
Sim #5	28.73	0.695	-1.18	0.71
Sim #6	29.36	0.678	1.78	0.69
Sim #7	29.00	0.751	10.79	0.74
Sim #8	29.35	0.749	13.72	0.71
Sim #9	29.34	0.740	25.76	0.62

2.6.5. Guadiana





Parâmetros estatísticos

Diário

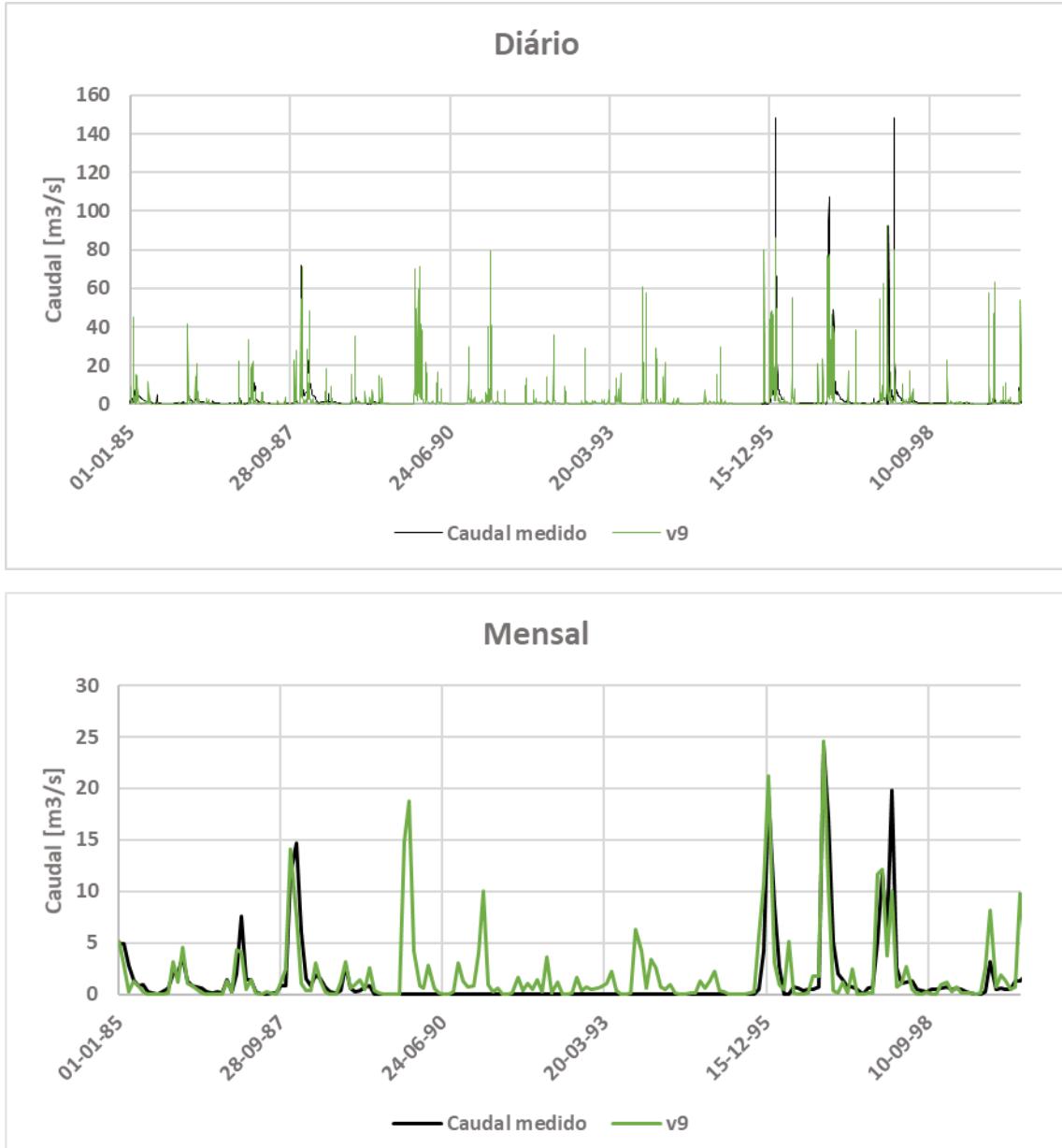
	RMSE	R2	PBIAS	NSE
Sim #1	-	-	-	-
Sim #2	-	-	-	-
Sim #3	-	-	-	-
Sim #4	-	-	-	-
Sim #5	-	-	-	-
Sim #6	18.59	0.566	-25.81	0.53
Sim #7	17.09	0.623	-69.78	0.46
Sim #8	20.05	0.500	37.70	0.51
Sim #9	18.38	0.598	46.83	0.51

Mensal

	RMSE	R2	PBIAS	NSE
Sim #1	-	-	-	-
Sim #2	-	-	-	-
Sim #3	-	-	-	-
Sim #4	-	-	-	-
Sim #5	-	-	-	-
Sim #6	34.72	0.772	-29.29	0.73

Sim #7	33.45	0.797	1.29	0.63
Sim #8	36.82	0.708	-0.06	0.72
Sim #9	37.96	0.839	36.75	0.68

2.6.6. Guadalquivir



Parâmetros estatísticos

Diário

	RMSE	R2	PBIAS	NSE
Sim #1	-	-	-	-
Sim #2	-	-	-	-
Sim #3	-	-	-	-
Sim #4	2.24	0.331	40.71	0.28
Sim #5	2.24	0.336	40.72	0.30
Sim #6	1.97	0.349	28.51	0.32
Sim #7	1.89	0.599	24.06	0.36
Sim #8	3.17	0.310	16.33	-0.31
Sim #9	2.96	0.522	21.50	0.10

Mensal

	RMSE	R2	PBIAS	NSE
Sim #1	-	-	-	-
Sim #2	-	-	-	-
Sim #3	-	-	-	-
Sim #4	3.86	0.765	29.53	0.65
Sim #5	3.80	0.738	19.55	0.65
Sim #6	3.79	0.748	13.69	0.68
Sim #7	3.93	0.759	-15.04	0.75
Sim #8	4.14	0.631	6.40	0.62
Sim #9	4.83	0.702	-3.66	0.68

2.7. Conclusões / Conclusions / Conclusiones

As simulações realizadas permitiram calibrar o modelo MOHID Land para o domínio Oeste da Península Ibérica com sucesso, obtendo bons resultados para a maior parte das estações analisadas. No entanto, verificou-se que existem estações hidrométricas em que a modelação do caudal não foi bem conseguida.

3. Aplicação do modelo SWAT ao território SUDOE

3.1. Área de estudio / Domaine d'étude / Área de estudio

El área de estudio del proyecto enmarca todo el territorio SUDOE (Sudoeste Europeo). Para realizar la modelización del territorio sólo se han escogido las cuencas que desembocan en el mar con una superficie superior a 50 km². Así, el territorio SUDOE se ha dividido en una serie de cuencas (Tabla 1) que incluyen la desembocadura de la cuenca al mar, puntos de aforo y de calidad distribuidos en diferentes regiones pedo-climáticas (en caso de que se disponga de datos), la localización y los datos de caudales de entrada y de salida de embalses superiores a 5 Hm³ y datos de cantidad y calidad del agua en canales y depuradoras en ciudades con más de 10 000 habitantes.

3.2. Modelo / Modèle / Modelo

Los proyectos para modelizar el territorio SUDOE se han realizado con el software SWAT (Soil and Water Assessment Tool), concretamente con la siguiente versión: ArcGIS versión 10.4 + ArcSWAT 2012.10.4.19.

SWAT fue desarrollado por USDA-ARS (Agricultural Research Service) para predecir el impacto del manejo del suelo en la producción de agua, sedimentos y químicos agrícolas en cuencas con variación de suelos, uso de suelo y condiciones de manejo en largos períodos de tiempo. El modelo tiene como principal objetivo predecir el efecto de la toma de decisiones en el manejo de la producción de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas (Arnold, 1998). Este modelo ha sido ampliamente utilizado a nivel mundial como herramienta que permite interactuar con sistemas de información geográfica y con potencial en lo referente a temas de cambio climático, ordenamiento territorial, zonificación, manejo de cuencas, planificación de cultivos, diagnóstico de áreas susceptibles a erosión, conservación de los recursos naturales. SWAT es un modelo agro-hidrológico, conceptual y semi-distribuido basado en principios físicos que operan a escala diaria. Esta partición temporal facilita el estudio de procesos que no pueden ser evaluados a escala diaria.

Es un modelo a base física ya que en lugar de integrar ecuaciones de regresión para describir la relación entre las variables de entrada y salida necesita datos específicos de la cuenca, como climatología, topografía, propiedades del suelo, vegetación y prácticas de manejo. Los procesos físicos asociados al movimiento del agua y sedimentos, crecimiento de cultivos, ciclo de nutrientes, entre otros son directamente simulados por SWAT usando los datos de entrada. El hecho de que requiera más información de base que las ecuaciones de regresión, aporta mayor confianza a los resultados del modelo, incluso en cuencas sin aforo.

Los principales componentes del modelo incluyen parámetros climáticos, hidrológicos, propiedades del suelo, crecimiento de las plantas, nutrientes, y gestión de las actividades agrícolas, de manera que presenta una notable versatilidad, pudiendo ser utilizado con distintos objetivos. SWAT genera resultados de caudal, sedimentos, nutrientes (Nitrógeno y Fósforo). Se le atribuye la característica de semi-distribuido debido al fraccionamiento espacial que realiza, ya que divide las sub-cuenca en Unidades de Respuesta Hidrológica, las cuales consisten en unidades con una misma pendiente, usos del suelo y condiciones edáficas, y por tanto, con un comportamiento hidrológico similar (Neitsch et al., 2009). Se obtienen por superposición de cada uno de dichos datos para luego reagrupar zonas con características similares. Cada HRU es considerada como una fracción de sub-cuenca sin ubicación específica.

3.3. Escala da aplicação / Échelle d'application / Escala de aplicación

Los proyectos de modelización del territorio SUDOE (equivalentes a cuencas hidrográficas) se dividen en subcuenca que deben representar **las masas de agua** definidas por los planes hidrológicos de cada cuenca. Además, también se han considerado otras escalas como la de los sistemas de explotación y la escala de las demarcaciones hidrográficas.

3.4. Dados de base / Données de base / Datos básicos

Los datos de entrada básicos para poder realizar la modelización son los siguientes:

- Modelo digital de elevaciones (del inglés Digital Elevation Model; DEM) en formato ráster de 90m de resolución. Fuente: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM 90m)
- Mapa de ocupación del suelo. Fuente: Corine Land Cover Map 2012 (CLC 2012) (Büttner et al., 2014)
- Mapa de suelo. Fuente: European Soil Database (ESDB) y adaptado por el Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária (INIAV).

Todos los mapas se han proyectado en ETRS 89 – 30N (EPSG: 25830)

Respecto a los datos climáticos el CSIC ha procesado la base de datos SAFRAN (5km x 5km) de la Península Ibérica para su utilización en SWAT (Portugal y España), mientras que el CNRS ha procesado la base de datos SAFRAN (8 km x 8 km) Francia para la parte francesa. Los datos obtenidos de SAFRAN y que además son los datos climatológicos básicos que han de introducirse en SWAT son la precipitación y temperatura máxima y mínima diaria. Para calcular el resto de datos climáticos como la humedad o la radiación solar SWAT dispone de una herramienta Weather Generator) que las calcula en función de los datos climatológicos básicos, las coordenadas, la latitud, el día del año... En este caso se ha utilizado el Weather Generator con las coordenadas del centro de cada cuenca.

Tanto para sedimentos como para nitratos, integramos los valores de las depuradoras (o ciudades) de forma similar a los reservorios. También se ha añadido los canales, y ciudades > 10 000 habitantes (para tener en cuenta el efecto de las ciudades en nitratos, sedimentos, etc.) mediante el paso Add point source.

Para simular la influencia de los embalses se han introducido sus parámetros de gestión al modelo, así, cuando se realicen las proyecciones de cambio climático, o se analicen escenarios de gestión, se pueda actuar sobre estos parámetros. Se han incorporado los datos de gestión (máximos y mínimos, o curvas-objetivo, etc.) para que el modelo pueda generar la salida automáticamente. Con los datos observados (de las presas o los aforos aguas abajo de las presas como si fuera la salida de las presas) se ha podido verificar/validar la gestión de los embalses.

Las siguientes clases son las que se han considerado en la irrigación en el modelo siempre que estén dentro del perímetro de irrigación de la confederación:

Código SWAT	Clase asociada
RICE	Arroz
OLIV	Olivo
GRAP	Uva
ALMD	Almendros
AGRRA	Agricultura irrigada
AGRL	Agricultura irrigada
(AGRC)	(No irrigado)
ORCD	Árboles frutales

También se ha añadido activado la auto-fertilización y se ha comprobado los datos de rendimientos de cultivo en las páginas del ministerio de cada país para verificar y validar los rendimientos simulados.

3.5. Metodología para calibração e validação dos resultados / Méthodologie pour la calibration et la validation des résultats / Metodología para la calibración y validación de los resultados

Como los datos climáticos disponibles consisten en precipitación y temperatura (máxima y mínima), la ecuación para calcular la evapotranspiración (ET) es Hargreaves. El orden de calibración y validación ha sido: Hidrología > Sedimentos > Nitratos. Los periodos de calibración y validación, donde sea posible, han sido:

1/1/1980 a 31/12/1984 para WarmUp (5 años), 1/1/1985 a 31/12/2004 para calibrar, 1/1/2005 a 30/09/2014 para validar.

Existen dos etapas de calibración:

1^a etapa - Calibración Manual

- 1) Se ha analizado el balance global (SWAT Check). Para ello se ha comparado la precipitación, la evapotranspiración y la lámina de agua de salida del SWAT con los valores reales (se han consultado los planes hidrológicos de las confederaciones y bibliografía).
- 2) Se ha realizado la calibración para el punto de salida de la cuenca primero sin embalses y luego añadiendo los embalses de interés.

2^a etapa: Calibración de la dinámica (el perfil de caudales) a la salida de la cuenca.

Finalmente, se han ajustado los parámetros en las estaciones de aforo. Desde puntos de aguas arriba hacia puntos de aguas abajo cuando se han considerado varios puntos en la misma cuenca. Si es posible elegir los puntos de salida de las masas de agua y los puntos de aguas abajo de los embalses.

Evaluación de la calibración: para evaluar se han empleado los índices r^2 y Nash Sutcliffe (NS). Los criterios a emplear para determinar si la calibración es satisfactoria se encuentran en Moriasi et al., 2015. Se han empleado dos tipos de NS, uno para aguas bajas y otros para altas. Se ha considerado más importante tener una buena representación de las aguas bajas.

Afinación de parámetros: SWAT CUP (calibración automática después de la calibración manual: <https://swat.tamu.edu/software/swat-cup/>) se ha empleado para afinar la calibración (una 3^a etapa de calibración) y ha sido usado para finalizar el proyecto.

3.5.1. Hidrología

Algunos de los parámetros sensibles para la calibración de la hidrología han sido (CNRS):

Tabla	Parametros	Indication	Initialidad	Cambio	Impactos	Region
Hydrologico						
.mgt	CN2	per ocupacion	X	X+20%	Augmenta picos	Todos
.sol	SOL_AWC				Diminucion de Surface runoff	Francia
.bsn	SURLAG		4	10	Movimiento los picos	Francia
.bsn	IPET	ecuacion	Hman/Monterestley-Taylor		Diminucion de la evapotranspiracion	Espana
.gw	GW_REVAP		0.02	0.2	Influencia Return flow	Francia y Catalunia
.gw	RECHARG_DP				Influencia Deep groundwater	Francia
Bandas de altura						
.sub		Definicion de bandas				
.bsn	SFTMP	subcuencas con bandas	1	1.3	influye el deshielo	Cuencas con altura
.bsn	SMTMP	subcuencas con bandas	0.5	2		
.bsn	SMFMX	subcuencas con bandas	4.5	5		
.bsn	SMFMN	subcuencas con bandas	4.5	3		
.bsn	TIMP	subcuencas con bandas	1	0.14		
.bsn	SNOCOVMX	subcuencas con bandas	1	40		
.sub	TLAPS	subcuencas con bandas	0	100		
.sub	PLAPS	subcuencas con bandas	0	-4		
Presas						
.res	IRESCO	Average Monthly Outflow			Observaciones	
		Target Release		Min	hypotetica embases salida minima	
				Max	hypotetica embases salida maxima	
			0		Embalses superficie (ha)	
			0		Embalses volumen (10^4 m ³)	

Una vez calibrada la hidrología, se ha validado para el periodo 1/1/2005 a 30/09/2014 utilizando los mismos criterios e índices estadísticos que en la calibración. También se han validado las salidas de caudales del modelo SWAT comparándolas con las salidas del modelo SIMPA en régimen natural a la escala de los subsistemas de explotación. Esta última etapa ha permitido afinar la calibración de nuevo en los puntos donde no había datos de caudales y ha permitido también validar a escala de sistemas de explotación el régimen natural.

3.5.2. Nitratos

Para la calibración de los nitratos, se han establecido dos objetivos:

- Obtener una buena correlación para el flujo de nitratos
- Obtener un buen rango de concentración de nitratos

La primera etapa ha sido añadir las fuentes puntuales.

Los pasos seguidos han sido:

1. Añadir la auto-irrigación y la auto-fertilización
 - a. Nota: en PAST (pasto) añadir autofertilización en pendientes de 0-9%
2. Añadir los inputs de las ciudades
3. Verificar los rendimientos
4. Usar LOADEST cuando existe alta variabilidad en el rango de datos observados (datos medidos en caudales altos medios y bajos).
5. Verificar los órdenes y magnitudes de NO₃ a la salida
 - a. Si no está en el orden de magnitud: Calibrar partes naturales
 - i. Carbono orgánico de los suelos
 - ii. Coeficiente de mineralización de los suelos: CMN (*bsn)

- iii. Mirar si con esto es suficientes en la parte baja de la cuenca-> ok
- iv. Si no es ok-> verificar los inputs:
 - 1. Autofertilización
 - 2. Ciudades, inputs de vertido
- v. Si es ok-> empezar la calibración con los parámetros que se ven en la tabla de debajo.

Los valores de NO₃ que se presentan en las salidas de SWAT se presentan en valores de N-NO₃, por lo que se ha tenido que hacer transformación de unidades para comparar los valores correctamente. Si los valores observados se han encontrado en (mg NO₃/L), ha habido que ajustar los valores de salida de SWAT a esas unidades. Para ello:

1. De los valores de salida del output.rch, emplear NO₃_OUTkg y FLOW_OUTcms para calcular una concentración media mensual de N-NO₃
2. Hacer transformación a concentración media mensual de NO₃
3. Comparar con las observaciones

En la siguiente tabla se puede observar algunos parámetros que se han tocado para la calibración del Garonne como ejemplo de parámetros sensibles:

File	Parameters	Definition	Default	Calibrated value
.bsn	NPERCO	Nitrate percolation coefficient	1	0.58
	CMN	Rate factor for humus mineralization of active organic nutrients (N & P)	0.0001	0.001
	SDNCO	Denitrification threshold water content	1	1.5
.rte	BC1	Rate constant for biological oxidation of NH3 (1/days)	0.1	1
	BC2	Rate constant for biological oxidation of NO2 to NO3 (1/days)	0.1	2
	BC3	Rate constant for hydrolysis of organic N to NH4 (1/days)	0.02	0.21
	CH_ONCO_BSN	Channel organic nitrogen concentration in basin (ppm)	0	25
	RSDCO	Residue decomposition coefficient	0.05	0.1
	N_UPDIS	Nitrogen uptake distribution parameter	20	40
	CH_ONCO	Channel organic nitrogen concentration in channel (ppm)	0	15
.swq	BC1	Rate constant for biological oxidation of NH4 to NO2 in the reach at 20°C (1/days)	0.55	1
	BC2	Rate constant for biological oxidation of NO2 to NO3 in the reach at 20°C (1/days)	1.1	2
	BC3	Rate constant for biological oxidation of N to NH4 in the reach at 20°C (1/days)	0.21	0.21
	RS3	Benthic source rate for NH4-N in the reach at 20°C (mgNH4-N/(m2.day))		
	RS4	Rate coefficient for organic N settling in the reach at 20°C (1/days)	0.05	0.001
.wwq	A11	Fraction of algal biomass that is nitrogen (mgN/mg alg)	0.08	0.09
.chm	AGRL SOL_NO3	Initial NO3 concentration in the soil layer (ppm)	0	19
	AGRL SOL_ORGN	Initial organic N concentration in the soil layer (ppm)	0	30
.mgt	AGRL fertilization application			
	NME DWFERT PHUACC	Fertilizer name Amount of fertilizer applied Plant heat units accumulated	-	15-15-15
			-	400
			-	0.2
	AGRL Tillage			
	HI_UPD	Updated harverst index	-	70

En la siguiente tabla se pueden ver los parámetros tocados en la calibración de la zona norte de España:

Archivo	Parámetro	Valor	Notas
		Inicial	Asignado
.bsn	RCN	0	5
			Concentración de N en la lluvia ($\text{mg N}\cdot\text{L}^{-1}$)
	CMN	0.0003	0.003
			Velocidad de reacción de la mineralización del N orgánico
	CDN	1.4	0.5
			Coeficiente en la velocidad de reacción de la desnitrificación
	N_UPDIS	20	30
			Coeficiente de distribución del N en el suelo
	N_PERCO	0.2	0.7
			Coeficiente de percolación del N

	RSDCO	0.05	0.1	Coeficiente de descomposición del residuo
.gw	SHALLST_N	0	50	Concentración inicial de nitrato en el acuífero
.chm	SOL_NO3	Layer #1 = 0 Layer #2 = 0	Layer #1 = 20 Layer #2 = 10	Concentración de nitratos en el suelo
.sol	CBN_ORG		X5*	Concentración de carbono orgánico en el suelo
.wwg	Aio, A1, Humax			Son parámetros del río, son los últimos en calibrar y si es posible no cambiar

3.6. Resultados / Résultats / Resultados

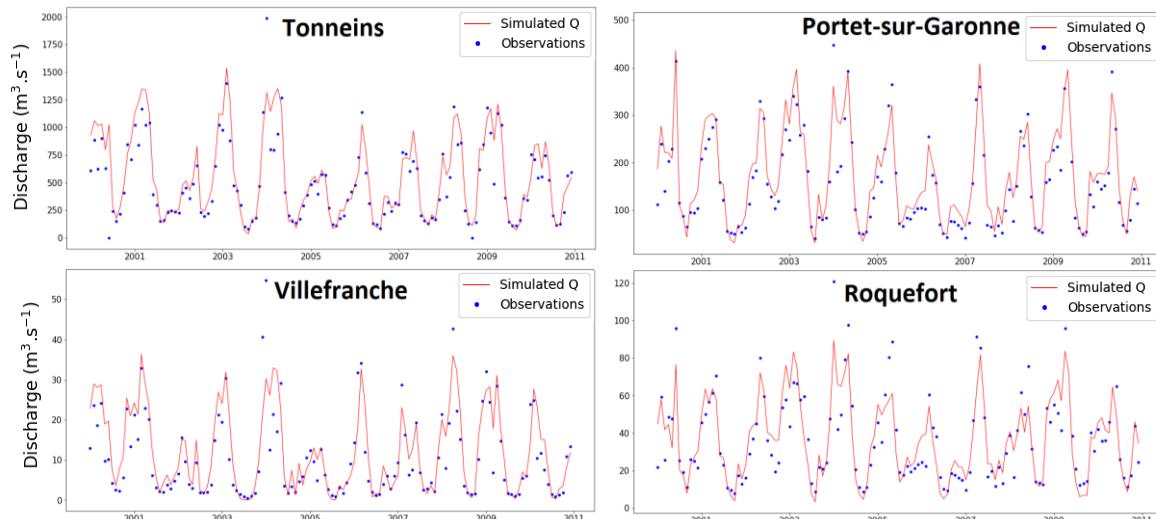


Figura 3: Ejemplo de resultados de caudal mensual para el periodo de calibración (2000-2006) y de validación (2006-2010) para el modelo SWAT (A) Garona a la salida, Tonneins, (B) Garona en Portet-sur-Garonne al final de los pirineos, (C) Aveyron (un tributario) en Floriac, (D) Salat (tributario) en Roquefort.

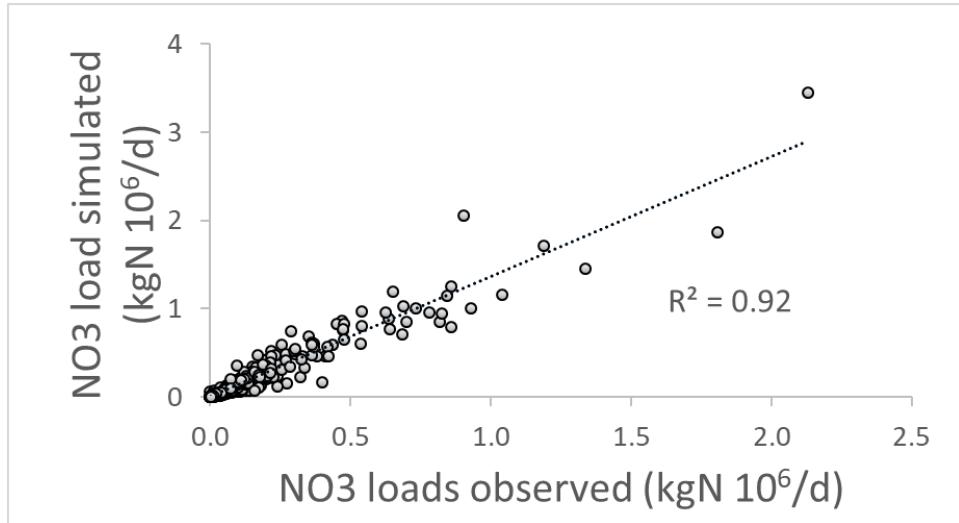


Figura 4: Relación entre la simulación de los flujos de nitratos por el módulo Loadest comparado con los datos observados (2000-2010) para 4 estaciones en la Garona (Francia): Tonneins, Portet-Sur-Garonne, Villefranche, Roquefort que representan diferentes zonas pedo-climático.

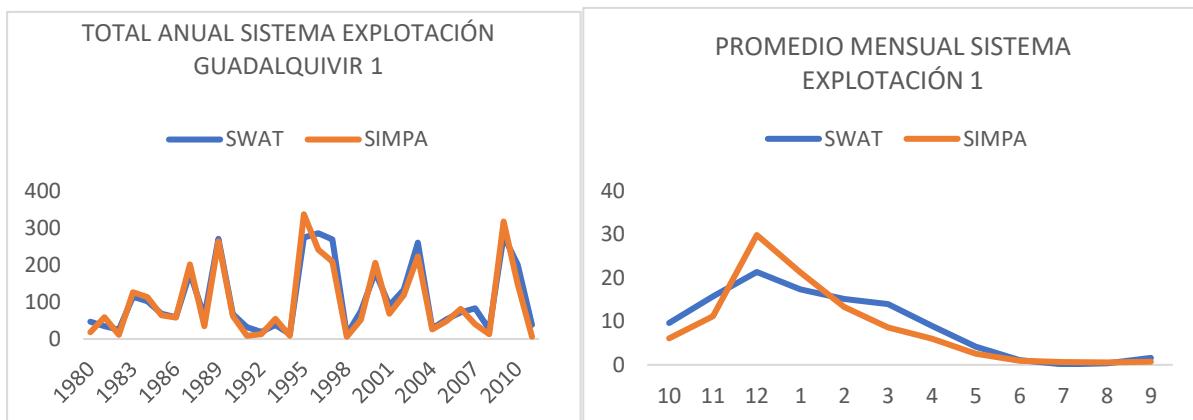


Figura 5: Ejemplo de comparación (para validación) del régimen natural simulado por SWAT y por SIMPA en el sistema de explotación 1 del Guadalquivir.

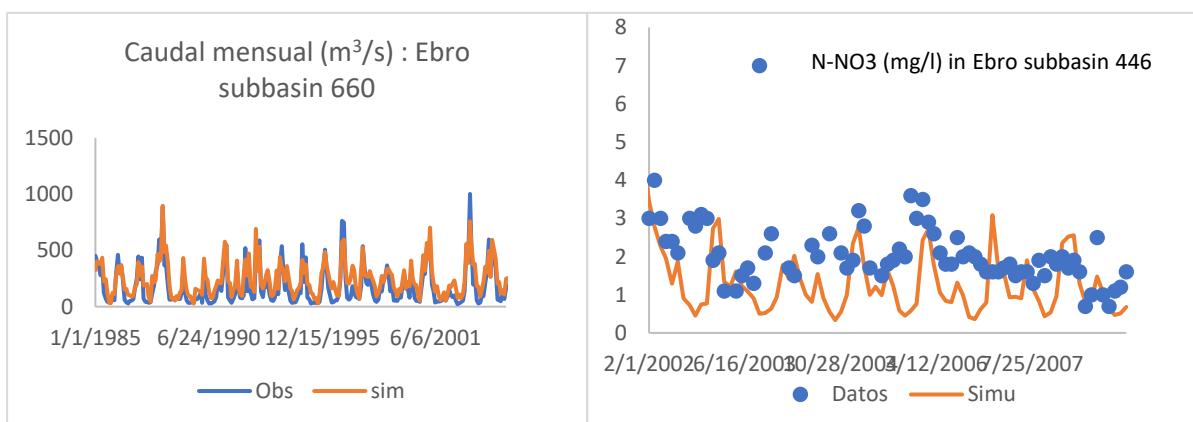


Figura 6: Ejemplo de comparación de datos simulados y observados de caudal y de N-NO₃ en el Ebro a escala mensual.

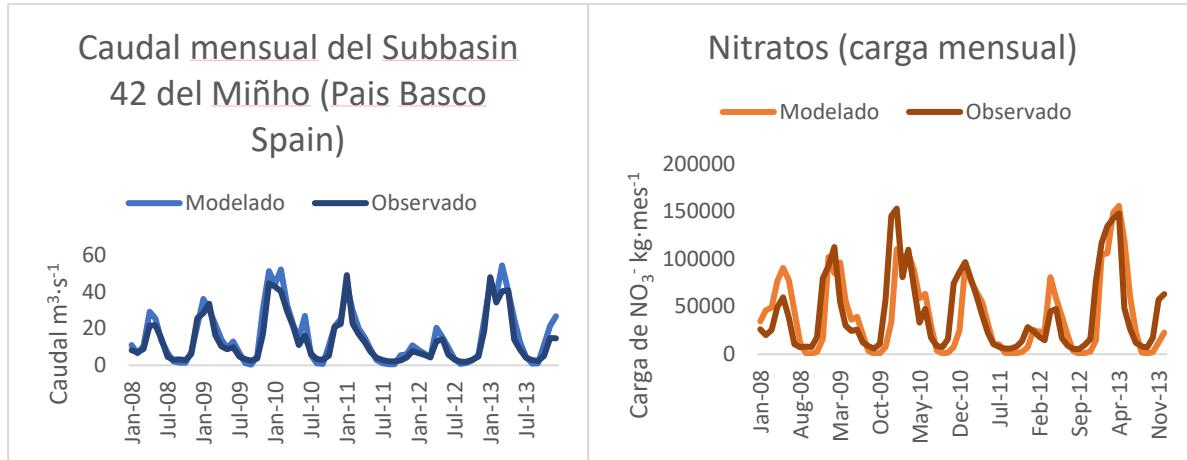


Figura 7: Ejemplo de comparacion de datos simulados y observados de caudal y de N-NO₃ en la cuenca del Miño-Sil(Noroeste de la Península Ibérica) a escala mensual.

Los modelos han sido calibrados y validados a las 3 escalas de trabajo espaciales (masas de agua, explotación, demarcación hidrográfica) y a escala mensual sobre el periodo 1985-2014.

3.7. Formato e localización dos resultados no servidor AGUAMOD / Format et emplacement des résultats sur le serveur AGUAMOD / Formato y localización de los resultados en el servidor AGUAMOD

El protocolo detallado de las diferentes estapas descrita en este entregable se encuentra accessible en el link siguiente :

<https://docs.google.com/document/d/13IHFBK0IPtAjNt3lIKEIMJxQqfotxwT9KV5Xw8bopss/edit?usp=sharing>

Los proyectos calibrados y validados, así como los resultados están en la carpeta /aguamod/swat_models del servidor AGUAMOD localizado en el CSIC (Zaragoza) y con copia en el CNRS (Toulouse).

3.8. Conclusões / Conclusions / Conclusiones

Los modelos se han sido calibrado y validado en las 3 escalas de trabajo espaciales (masas de agua, sistema de explotación, demarcación hidrográfica) y a escala mensual para el periodo 1985-2014.

Los proyectos calibrados y validos pueden ser utilizados para el siguiente paso, que es calcular los indicadores que se han definido con los actores en la reunión de Lisboa y que actualmente están revisando. Además, también se utilizarán para evaluar los

servicios ecosistémicos y por último, para evaluar el impacto del cambio climático en el territorio SUDOE, se utilizarán los proyectos modificando los escenarios climáticos que han sido definidos con los actores en la reunión de Lisboa. Estos tres apartados son parte de los siguientes entregables.

Simulación para los Servicios ecosistémicos:

Los proyectos SWAT creados, calibrados y validados, se emplearán para obtener una serie de resultados para evaluar los Servicios Ecosistémicos.

Una lista de los resultados de interés de los Servicios Ecosistémicos se puede obtener de las simulaciones y se encuentra en el siguiente [enlace](#).

Simulación para los escenarios en contexto de cambio climático:

A la escala local se trabajará con SAFRAN.

	Dato meteorológico	Proyección climática
Francia	SAFRAN (8km)	DRIAS (8 km)
España	SAFRAN (5km)	
Portugal	SAFRAN (5km)	
Europa	MESAN (12 km)	BC-CORDEX (12 km)

Se utilizará la base de datos MESAN y BC-CORDEX (resolución 12km), de interés para hacer las proyecciones del cambio climático (CC) a escala SUDOE.

Las bases de datos de MESAN y SAFRAN (Francia) tiene unos resultados similares a la salida de 931 cuencas en Francia usando el modelo hidrológico GR4J. Esta comprobación se hizo también en el Miño (Norte Oeste de España y los resultados eran similares, falta realizar otras pruebas en otras zonas en España y Portugal, y usando el modelo SWAT. Se hará un ejercicio, con los proyectos incorporando los datos MESAN para comprobar si existe una gran diferencia entre ambas bases de datos.