

## Resumen

Las investigaciones que profundizan en el conocimiento integral de las relaciones entre el agua superficial y subterránea, en el marco de la gestión conjunta de recursos de sistemas hídricos complejos, requiere establecer nuevas herramientas y métodos que permitan evaluar conjuntamente los procesos naturales de sistemas hidrológicos. Cuando se evalúan los recursos hídricos de un sistema con interacción intensa de aguas superficiales y subterráneas, el enfoque de evaluación con carácter de uso conjunto es el ideal para evitar la duplicidad de recursos simulados en un sistema complejo.

Esta tesis propone una metodología genérica para integrar modelos de acuífero en sistemas de uso conjunto, mediante la evaluación eficiente del intercambio de agua dado en las relaciones río-acuífero de un sistema con interacción intensiva de sus aguas superficiales y subterráneas.

El objetivo principal de esta tesis es proponer una metodología útil para la integración de acuíferos en sistemas de uso conjunto, evaluando eficientemente el intercambio de flujo entre masas superficiales y subterráneas de una cuenca hidrológica. Los objetivos particulares son: (i) revisar y sintetizar el estado del arte sobre metodologías de evaluación de relaciones río-acuífero en modelos de uso conjunto; (ii) desarrollar una metodología genérica de evaluación conjunta de recursos hídricos en cuencas complejas; (iii) adecuar una herramienta de estimación de aportaciones superficiales y subterráneas; (iv) implementar una rutina matemática para la evaluación de condiciones de contorno no lineales (en términos de la técnica de Autovalores); (v) implementar una herramienta de aproximación de parámetros hidrogeológicos para acuíferos integrados en sistemas de uso conjunto; (vi) integrar y aplicar distintas técnicas, métodos y herramientas en la evaluación de casos de estudio; (vii) evaluar el efecto del cambio climático regionalizado sobre masas subterráneas del modelo de acuífero del caso de estudio principal. La implementación metodológica considera los siguientes aspectos:

- i. Evitar duplicidad de recursos, obteniendo conjuntamente aportaciones superficiales e infiltración en un mismo modelo hidrológico.
- ii. Proponer y validar el funcionamiento de una herramienta de evaluación del intercambio de flujo por relaciones río-acuífero, mediante la evaluación eficiente de condiciones de contorno no lineales.
- iii. Proponer una herramienta para generar y evaluar parámetros hidrogeológicos para su uso en modelos de acuífero por Autovalores.
- iv. Proponer y evaluar una metodología particular para analizar el impacto del cambio climático regionalizado sobre las masas subterráneas del acuífero del caso de estudio.

En esta tesis se implementaron herramientas auxiliares para la modelación y simulación conjunta de recursos hídricos de una cuenca compleja, caso de estudio: Cuenca hidrológica del Río Duero, España.

Los resultados de implementar la metodología, sus herramientas y métodos particulares sobre un caso de estudio complejo han sido satisfactorios, al lograr validar la metodología y las adecuaciones sobre herramientas y métodos pre-existentes. El uso de modelos lluvia escorrentía de tipo conceptual y semi-distribuido permite la separación de las componentes de flujo superficial y la recarga selectiva a masas subterráneas del mismo sistema hidrológico, evitando duplicidad en la evaluación del recurso hídrico. En particular, el aporte de las soluciones numéricas aproximadas han demostrado ser una propuesta potente y mejora eficiente del proceso de evaluación del uso conjunto de recursos hídricos en modelos de acuífero sencillos y complejos, demostrado en los casos de estudio del Acuífero Beniardá-Polop y el Acuífero del Duero. El análisis del impacto de cambio climático regionalizado sobre masas subterráneas del Duero está asociado al impacto sobre el valor medio de recarga para los escenarios climáticos del AR5 del IPCC (RCP 4.5, 6.0 y 8.5, de periodos 2046-2065 y 2081-2100).

## RESUM

Les investigacions que profundisen en el coneiximent integral de les relacions entre l'aigua superficial i subterranea, en el marc de la gestio conjunta de recursos de sistemes hídrics complexos, requerix establir noves ferramentes i metodos que permeten evaluar conjuntament els processos naturals de sistemes hidrologics. Quan s'evalüen els recursos hídrics d'un sistema en interaccio intensa d'aigües superficials i subterranees, l'enfocament d'evaluacio en caràcter d'us conjunt es l'ideal per a evitar la duplicitat de recursos simulats en un sistema complex.

Esta tesis propon una metodologia generica per a integrar models d'acuífero en sistemes d'us conjunt, mitjançant l'evaluacio eficient de l'intercanvi d'aigua donat en les relacions riu-acuífero d'un sistema en interaccio intensiva de les seues aigües superficials i subterranees.

L'objectiu principal d'esta tesis es propondre una metodologia util per a l'integracio d'acuíferos en sistemes d'us conjunt, evaluant eficientment l'intercanvi de decorriment entre masses superficials i subterranees d'una conca hidrologica. Els objectius particulars son: (i) revisar i sintetisar l'estat de l'art sobre metodologies d'evaluacio de relacions riu-acuífero en models d'us conjunt; (ii) desenrollar una metodologia generica d'evaluacio conjunta de recursos hídrics en conques complexes; (iii) adequar una ferramenta d'estima d'aportaments superficials i subterranees; (iv) implementar una rutina matematica per a l'evaluacio de condicions de rodalia no llinials (en termes de la tecnica d'Autovalores); (v) implementar una ferramenta d'aproximacio de parametros hidrogeològics per a acuíferos integrats en sistemes d'us conjunt; (vi) integrar i aplicar distintes teciques, metodos i ferramentes en l'evaluacio de casos d'estudi; (vii) evaluar l'efecte del canvi climatic regionalisat sobre masses subterranees del model d'acuífero del cas d'estudi principal.

L'implementación metodologica considera els següents aspectes:

- i. Evitar duplicitat de recursos, obtenint conjuntament aportaments superficials i infiltracio en un mateix model hidrologic.
- II. Propondre i validar el funcionament d'una ferramenta d'evaluacio de l'intercanvi de decorriment per relacions riu-acuífero, mitjançant l'evaluacio eficient de condicions de rodalia no llinials.
- III. Propondre una ferramenta per a generar i evaluar parametros hidrogeològics per al seu us en models d'acuíferos per Autovalores.
- IV. Propondre i evaluar una metodologia particular per a analisar l'impacte del canvi climatic regionalisat sobre les masses subterranees de l'acuífero del cas d'estudi.

En esta tesis se implementaron ferramentes auxiliars per a la modelación i simulación conjunta de recursos hídrics d'una conca complexa, cas d'estudi: Conca hidrologica del Riu Duero, Espanya.

Els resultats d'implementar la metodologia, les seues ferramentes i metodos particulars sobre un cas d'estudi complex han segut satisfacts, al conseguir validar la metodologia i les adequacions sobre ferramentes i metodos pre-existents. L'us de models pluja escorrentía de tipo conceptual i semi-distribuit permet la separacio de les components de decorriment superficial i la recarrega selectiva a masses subterranees del mateix sistema hidrologic, evitant duplicitat en l'evaluacio del recurs hídrico. En particular, l'aporte de les solucions numeriques aproximades han demostrat ser una proposta potent i millor eficient del proces d'evaluacio de l'us conjunt de recursos hídrics en models d'acuífero senzills i complexos, demostrat en els casos d'estudi de l'acuífero Beniardá-Polop i l'acuífero del Duero. L'analisi de l'impacte de canvi climatic regionalisat sobre masses subterranees del Duero està associat a l'impacte sobre el valor mig de recarrega per als escenaris climatics de l'AR5 de l'IPCC (RCP 4.5, 6.0 i 8.5, de Periodos 2046-2065 i 2081-2100).

## SUMMARY

Investigations related to the comprehensive understanding of the relationship between surface and groundwater under the conjunctive water management of complex water resource systems requires establishing new tools and methods to jointly assess the natural processes of hydrological systems. When the water resources of a system with strong interaction of surface water and groundwater are evaluated, the approach in terms of conjunctive use is ideal for avoiding the duplication of resources in a simulated complex system.

This thesis proposes a generic methodology for integrating models of aquifer into systems with conjunctive use, through efficient water exchange evaluation given in the river-aquifer interactions, with intensive interaction of surface water and groundwater.

The main objective of this thesis is to propose a useful methodology for integrating aquifers into systems with conjunctive use, efficiently evaluating the flow exchange between surface and ground masses of a basin. The specific objectives are: (i) review and summarize the state of the art of the methodologies used to assess the river-aquifer relationships into models with conjunctive use; (ii) develop a generic methodology of conjunctive water resource management in complex basins; (iii) adapt a tool for estimating surface and groundwater flow contributions; (iv) implementing a mathematical routine for evaluating nonlinear boundary conditions (in terms of the Eigenvalues technique); (v) implement a tool of approximation of hydrogeological parameters for aquifers integrated on conjunctive use systems; (vi) integrate and apply different techniques, methods and tools in the evaluation of case studies; (vii) evaluate the regionalized effect of climate change on groundwater masses of the aquifer model of the main case study. The implementation methodology considers the following aspects:

- i. Avoid duplication of resources, conjunctively getting surface and infiltration contributions in the same hydrological model.
- ii. Propose and validate the operation of an assessment tool to evaluate the interchange flow given into river-aquifer interactions, through the efficient evaluation of nonlinear boundary conditions.
- iii. Propose a tool to generate and evaluate hydrogeological parameters for its use in models of Eigenvalues aquifers.
- iv. Propose and evaluate a particular methodology for analyzing the regionalized impact of climate change on groundwater masses on the case study aquifer.

On this thesis auxiliary tools were implemented for modeling and simulating the conjunctive water resources in a complex basin such as the case study: the Duero River Basin, Spain.

The results of implementing the methodology, tools and specific methods on a complex case study were satisfactory, to achieve the validation of the methodology and adaptations of pre-existing tools and methods. The use of semi-distributed and conceptual rainfall-runoff models allow to selectively separate the components of surface flow and underground recharge into masses of a same water system, avoiding duplication in the evaluation of water resources. In particular, the contribution of the approximated numerical solutions have proven to be a powerful and efficient improvement proposal into the evaluation process of conjunctive water resources use in simple and complex aquifer models, demonstrated in the case studies of Beniardá- Polop and the Duero aquifers. The analysis of the regionalized impact of climate change on groundwater masses of the Duero Basin is associated with the impact on the average recharge obtained respect to the climate scenarios of the IPCC AR5 (RCP 4.5, 6.0 and 8.5, periods 2046-2065 and 2081-2100).