

**IDENTIFICACION DE INDICADORES DE SERVICIOS AMBIENTALES:
EL CASO DE LA PROVISIÓN DE AGUA DULCE EN LA CUENCA DEL RÍO MAPE
(CAPV – ESPAÑA)**

Por:

MÓNICA BIBIANA BERDUGO MORENO

Tutor:

MIREN ONAINDIA

**DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA VEGETAL Y ECOLOGÍA
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO
LEIOA, SEPTIEMBRE DE 2008**

Palabras clave:

**SERVICIOS AMBIENTALES, INDICADORES, PROVISIÓN DE AGUA DULCE,
ECOHIDROLOGÍA, RÍO MAPE.**

1. RESUMEN

En la última década se ha difundido el concepto de "servicios ambientales" y la importancia de su conservación para mantener el bienestar de la sociedad; así mismo, se ha subrayado necesidad de identificar indicadores de su integridad, como paso crítico en la gestión consecuente con la oferta ambiental del territorio. En este trabajo, se presenta un análisis de la provisión de agua dulce en la cuenca del Río Mape (CAPV, España), mediante la modelación conceptual, cualitativa y cuantitativa del sistema, con un enfoque ecohidrológico, para identificar indicadores de su integridad funcional. Los indicadores propuestos son expresiones derivadas de la fase cuantitativa del análisis, particularmente del método de balance hídrico desarrollado por Trabucco *et al.* (2008), con el que se visualiza en el espacio el efecto del uso de la tierra sobre los flujos de agua en las cuencas hidrográficas. Se realizó una aproximación al balance hídrico mensual de sobre una posdición a 1991 y dos predicciones a 2013, para poner a prueba estos indicadores; en las predicciones se introdujo la variación debida al calentamiento global y se plantearon dos escenarios de uso de la tierra, uno inercial, consecuente con las tendencias de cambio identificadas en el período 1991 – 2002, y uno alternativo, proyectando la restauración de las riberas del sistema natural de drenaje. El cociente Evapotranspiración de real sobre evapotranspiración de referencia (ETP_R/ETP_0) y su inverso se perfilan como indicadores de la provisión anual de agua dulce a escala de cuenca y como alternativas al coeficiente de escorrentía, altamente difundido en estudios ecohidrológicos.

Palabras clave: *servicios ambientales, indicadores, provisión de agua dulce, ecohidrología, río Mape.*

2. INTRODUCCIÓN

Los servicios ambientales incluyen condiciones, procesos y productos inherentes y derivados del funcionamiento de los sistemas ecológicos, que son disfrutados de manera directa o indirecta por la sociedad (Daily *et al.* 1997, Márquez 1997, de Groot *et al.* 2002, Balvanera & Prabhu 2004); actualmente se reconoce una clara interdependencia entre el bienestar humano y la integridad funcional y estructural de los ecosistemas (Millennium Ecosystem Assessment 2005). En consecuencia, se puede afirmar que la circulación del agua a través de los ecosistemas y el agua misma pueden ser interpretados como servicios ambientales hídricos (de Groot *et al.* 2002, Guo & Gan 2003, Leguia *et al.* 2008) y que la gestión de los cuerpos de agua y del territorio afecta el bienestar de la sociedad.

Autores como Balvanera *et al.* (2001), Balvanera & Prabhu (2004), Balmford & Bond (2005) y Ptacnik *et al.* (2005) han señalado la necesidad de identificar indicadores de los servicios ambientales, para monitorear la integridad funcional de los ecosistemas, gestionar el territorio de manera consecuente con su oferta ambiental y regular la presión de uso en las áreas ambientalmente más frágiles.

El indicador de un servicio ambiental debe ser sensible a cambios significativos en los procesos que lo originan y/o regulan, debe adaptarse a las variaciones ecológicas y estacionales de estos procesos y debe ser adecuado para generar información en las escalas espacial y temporal previstas para la gestión del territorio (Millennium Ecosystem Assessment 2005).

Al igual que descriptores empleados en estudios ecológicos, es necesario que el indicador sea coherente con el modelo conceptual del sistema para el que está definido (Balmford & Bond 2005, Millennium Ecosystem Assessment 2005). Por lo tanto, un modelo conceptual

adaptado al territorio en estudio y el análisis de datos reales permitirá identificar un valor de referencia y delimitar el rango de posibles valores del indicador, así como acotar el alcance de sus interpretaciones (Millennium Ecosystem Assessment 2005, Izaguirre 2007). A diferencia de indicadores de procesos ecológicos, basta con que el indicador de servicios ambientales sea replicable en el tiempo no necesariamente se espera que sea repetible, pues la variabilidad espacial de los elementos involucrados en cada sistema pueden invalidar el uso del indicador en otro territorio (Pattanayak & Butry 2005). Tal vez la característica más importante del indicador de un servicio ambiental es que sea fácil de comprender por parte de los administradores y políticos (Millennium Ecosystem Assessment 2005), quienes tienen la responsabilidad de gestionar el territorio mediante la formulación y aplicación de normas.

Maass *et al.* (2005), Balmford & Bond (2005) y Lindenmayer *et al.* (2008), entre otros, han concluido que, en la búsqueda de indicadores de servicios ambientales, es necesario analizar las dinámicas de provisión y uso en cada situación particular, con el fin de asegurar la pertinencia de los mismos a las características biofísicas, sociales y económicas del territorio en estudio. En el caso de los servicios ambientales hídricos es necesario analizar el ciclo hidrológico en la escala espacial correspondiente (Trabucco *et al.* 2008).

A escala regional el ciclo hidrológico depende de factores como la posición geográfica (latitud, longitud, altitud), las fuerzas climáticas dominantes (estacionalidad, dirección e intensidad de los vientos, cercanía al mar) y, en menor medida, de la topografía, los biomas y las características edáficas y litológicas (Marini & Piccolo 2000, Oki & Kanae 2006, Jewitt 2006, Trabucco *et al.* 2008). Sin embargo, a escala local, la importancia relativa de estos factores cambia y características del suelo (valores de permeabilidad,

tipo de uso) pueden afectar de manera significativa descriptores hidrológicos de las cuencas, como son la precipitación efectiva, la evapotranspiración real o el coeficiente de escorrentía (Rokström & Gordon 2001, Zimmermann *et al.* 2006). Considerando que la unidad natural del territorio es la cuenca y que el agua es, en sí misma, un indicador de la oferta ambiental del territorio, los estudios que relacionan la cobertura y uso del suelo con las características hidrológicas de las cuencas tienen cada vez más vigencia, en el contexto del cambio global. A este tipo de aproximación se le conoce como ecohidrología (Andréassian 2004).

Instituciones como el banco mundial (WB & WWF 2003) y la FAO (UNASYLVA 2007), han elaborado informes de base ecohidrológica donde se concluye que las alteraciones en el cambio de uso del suelo y las decisiones de manejo del territorio afectan los procesos hidrológicos a diferentes escalas espaciales y temporales y en diferentes biomas alrededor del mundo. Así mismo, trabajos como el de Andréassian (2004) y Jewitt (2006) subrayan la importancia del tipo de cobertura y uso del suelo en la hidrología de las cuencas de diferente tamaño, desde el orden de 1 hasta 1000 km². Del análisis de este y otros estudios puede deducirse que los diferentes descriptores hidrológicos de las cuencas están relacionados con servicios ambientales hídricos particulares, como la capacidad de drenaje e irrigación natural, la retención de agua en los ecosistemas, el mantenimiento de la capacidad autodepuradora de los cuerpos de agua y la continuidad de la oferta del recurso hídrico a lo largo del año (de Groot *et al.* 2002, Guo & Gan 2003, Pizarro *et al.* 2006).

Las características hidrográficas de las cuencas ubicadas en el norte de la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV), han sido estudiadas desde diferentes enfoques, en parte como respuesta a lo estipulado en la Directiva 2000/60/CE Marco del Agua (CE

2000), pero a diferencia de otras regiones del estado Español, no desde un enfoque ecohidrológico. Dentro de los estudios más detallados en esta región están los desarrollados por:

- Eraso (1983), quien comparó las cuencas de los ríos Butrón, Oka, Lea y Artibai con base en una descripción de sus características morfométricas. Eraso encontró que las cuencas de los ríos Lea y Artibai son muy similares entre sí y contrastantes con la del río Butrón y que la cuenca del Oka puede describirse como una de características intermedias, dada la naturaleza de los materiales litológicos sobre los que se asienta, su orientación y madurez.
- Eraso & Antigüedad (1984) buscaron correlaciones entre las características morfométricas e hidrológicas de las cuencas de los ríos Gallartu, Dima, Izurza y Butrón y encontraron que para llegar a conclusiones más robustas es necesario realizar análisis con series históricas de, al menos, un par de décadas.
- Morales (1991) estudió cuatro sistemas hidrogeológicos del norte la CAPV y describió la climatología de la región utilizando las series históricas de mayor antigüedad y mejor continuidad para ese momento.
- La Agencia Vasca del Agua ha elaborado los estudios de oferta y demanda del sistema hidrológico Oka (Intecsa – Inarsa SA. 2003, Arquitectos e Ingenieros 2004), en éstos se describen las variaciones temporales a lo largo del año y se compara la oferta de agua, calculada utilizando el modelo TETIS, con los valores reportados por otros autores.

Sin embargo, en estos estudios se obvia la importancia de la gestión del uso del suelo en la permanencia o alteración de las características hidrológicas de la cuenca. Con el ánimo de identificar indicadores para el sistema de provisión de agua dulce, en este trabajo se

elabora un modelo conceptual de este servicio ambiental en la cuenca del río Mape (Vizcaya, España) y se describen las características hidrológicas bajo diferentes formas de uso de la tierra. Se parte de tres hipótesis: a.) Las particularidades del territorio redundan en la importancia relativa de los procesos que regulan el ciclo hidrológico local, b.) Los valores relativos de algunas características hidrológicas de las cuencas pueden ser utilizadas como indicador de la provisión de agua dulce y c.) La precisión de un indicador de este servicio ambiental depende de la importancia relativa de los procesos que regulan la provisión de agua dulce en un espacio particular. Se espera que los resultados y análisis presentados sean útiles en la gestión del territorio estudiado.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDIO.

El río Mape está ubicado al norte de la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV), está enmarcada por completo en la Reserva de la Biosfera de Urdaibai (RBU) y hace parte de la unidad hidrológica Oka (INTECSA – INARSA SA. 2003), sus aguas y las del Artola, su principal afluente, drenan en sentido occidente – oriente sobre la margen izquierda de la ría de Mundaka que vierte sus aguas al Mar Cantábrico (Figura 1).

3.1.1. Contexto biofísico

El clima predominante es atlántico, las precipitaciones oscilan entre los 900 y los 1650mm anuales; la humedad relativa, alrededor del 70% y la temperatura media anual, entre los 13º y los 14º C (INTECSA – INARSA SA. 2003). Hay entre 110 y 130 días de precipitación a lo largo del año, frecuentes eventos torrenciales y en invierno la nieve puede rondar los 500 m de altitud (EUSKALMET [En línea]). En la cuenca del Oka se reportan temperaturas

extremas que van, en promedio, desde los 0.4° a los 6.4° C en febrero, hasta los 20.7° C y 30.1° C en agosto y septiembre (Figura 2).

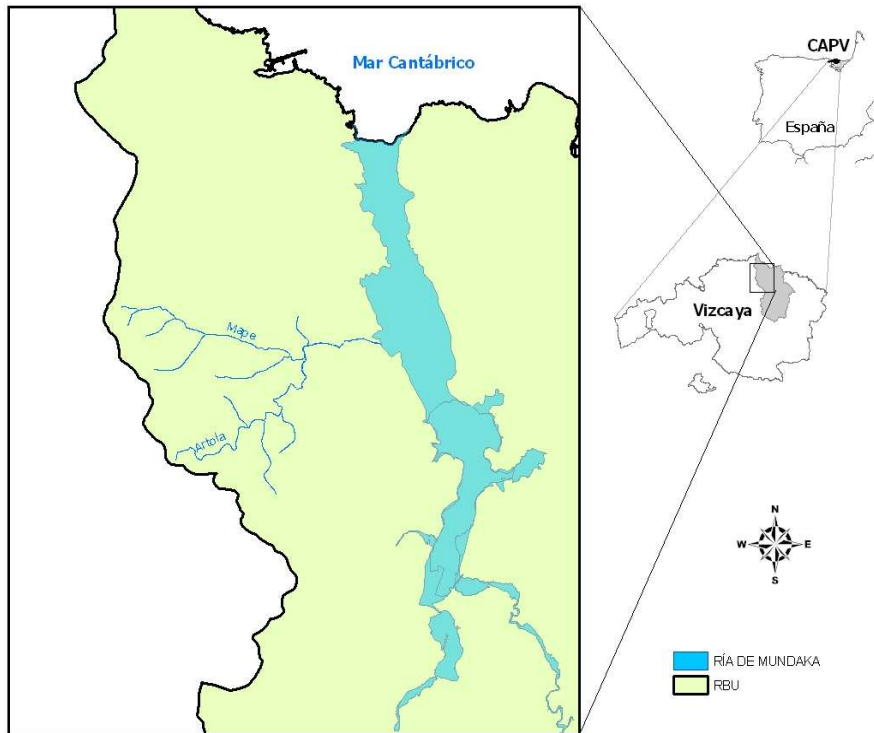


Figura 1. Ubicación de los ríos Mape y Artola en relación a la RBU. Elaborado a partir de la cartografía digital de la RBU.

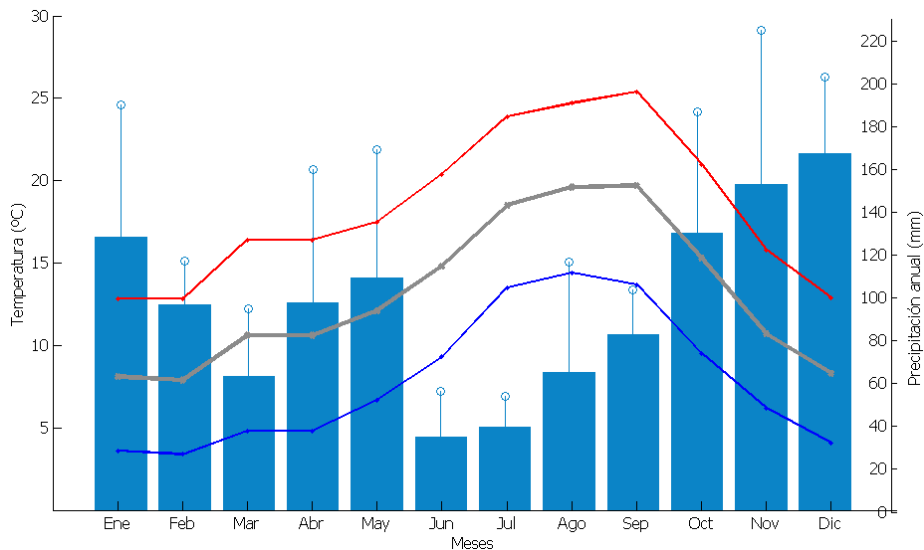


Figura 2. Climatograma multianual de la cuenca del Oka. Las curvas representan temperatura media (gris), mínima (azul) y máxima (roja), las columnas representan la precipitación mensual con barras de error que indican una desviación estándar. Elaborado

a partir de los registros diarios de 6 años, reportados en la estación Muxika (Código G063 – EUSKALMET).

Dada la historia de ocupación y aprovechamiento de la tierra en los terrenos colinos y montanos de Vizcaya (Measa *et al.* 2004), la vegetación actual es diferente de la original. La vegetación original incluyó formaciones vegetales boscosas dominadas por elementos típicamente eurosiberianos, como el robledal (*Quercus rubor*) y el hayedo (*Fagus sylvatica*), o por elementos mediterráneos adaptados al clima atlántico y favorecidos por suelos calcáreos, como el encinar cantábrico (*Quercus ilex*); en los acantilados y los suelos descubiertos aparecerían formaciones subarborescentes dominadas por elementos cosmopolita como *Pteridium aquilinum*, que aún en la actualidad domina el helechal, o eurosiberianos, como *Rubus ulmifolius*, *Erica* spp. o *Ulex* spp. que también en la actualidad dominan el zarzal, el brezal y el argomal, respectivamente; en las marismas, la vegetación original correspondió a las formaciones típicas de este ecosistema, dominadas por *Spartina* spp., *Halimione portulacoides* y *Sacocorina* spp., *Elymus pycnanthus* y *Juncus maritimus* principalmente (Aseginolaza *et al.* 1988).

La vegetación actual está claramente dominada por formaciones que corresponden a agroecosistemas dedicados a la producción forestal, dominada por especies comerciales foráneas como el pino de monterrey (*Pinus radiata*) y el eucalipto (*Eucalyptus globulus*), existen algunas manchas de vegetación secundaria compuestas por algunas especies dominantes de la vegetación original (*Quercus rubor*, *Quercus ilex*, *Rubus ulmifolius*, *Erica* spp. y *Ulex* spp.) y algunas especies propias de la vegetación potencial que incluye además de éstos, elementos corológicos de otras regiones fitogeográficas, como el castaño (*Castanea sativa*) en las formaciones boscosas (Rodríguez 2006) y en las

herbáceas y arbustivas, recientemente naturalizadas, la hierba de la pampa (*Miscanthus* spp.) y *Baccharis* spp.

En cuanto a la topografía predominante en la costa norte del País Vasco, caracterizada por colinas con fuertes pendientes y valles más o menos encajados, Morales (1991) afirma que es consecuente con la disposición de las unidades geológicas principales y con el encajamiento progresivo de los valles que drenan hacia la vertiente Cantábrica. Así, la cuenca del Oka se delimita al sur por la divisoria de aguas del sinclinal de Vizcaya, constituido por materiales del terciario y el resto de la cuenca se asienta sobre materiales del Albiense y del Aptiense, conocidos como Flysch negro y complejo Urgoniano, respectivamente. El Flysch negro determina las formas de las subcuencas actuales, dada la historia de procesos erosivos impulsados principalmente por las variaciones en el nivel del mar, mientras que el complejo Urgoniano ocupa el fondo del valle y la margen derecha de la cuenca del Oka y se caracteriza por su origen predominantemente marino, con algunas apariciones de material continental sedimentario (Morales 1991).

3.1.2. Contexto socioeconómico

En la cuenca del Oka, se han encontrado registros de ocupación y uso del suelo desde la prehistoria. Estos registros indican picos de extracción de recursos forestales que coinciden con períodos como la edad media, el descubrimiento de América y la revolución industrial, momentos en que la explotación maderera fue dedicada directa o indirectamente a la expansión de áreas pobladas y a la empresa astillera (Meaza *et al.* 2004). Desde que la cuenca del Oka fue declarada RBU (1984), los usos del suelo incluyen Lugares de Interés Comunitario (LICs), Zonas de Especial Protección de Aves (ZEPAs) y zonas Ramsar; estas áreas conservadas se encuentran en una matriz de predios privados. En las áreas rurales el uso del suelo más extendido es la producción

forestal mientras que las actividades económicas predominantes en áreas urbanas se relacionan con la industria astillera y el comercio marino en Mundaka, Bermeo y Gernika (Arquitectos e Ingenieros 2004, San Juan *et al.* 2007, Rodríguez 2007, Aranburu 2007).

Aranburu (2007) analizó los censos poblacionales de 15 municipios de la cuenca del Oka desde 1900 hasta 2007 y la oscilación estacional de la densidad de población; concluyó que en escala anual, la densidad poblacional se ha mantenido más o menos constante y que hay fuertes oscilaciones a lo largo del año, siendo Sukarrieta el municipio que presenta una mayor diferencia entre estaciones (Figura 3).

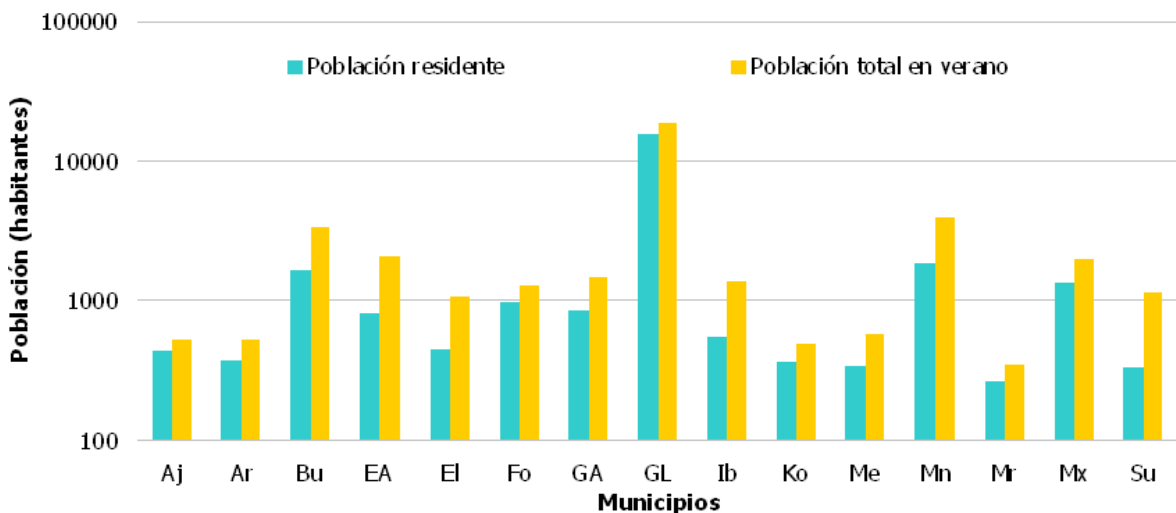


Figura 3. Comparación de la población residente y de la población total estimada en época estival en 15 municipios de la RBU: Aj = Ajangiz, Ar = Arratzu, Bu = Busturia, Ea, El = Elantxobe, Fo = Forua, GA = Gautebiz – Arteaga, GL = Gernika – Lumo, Ib = Ibarangelu, Ko = Kortezubi, Me = Mendata, Mn = Mundaka, Mr = Murueta, Mx = Muxika, Su = Sukarrieta. Elaborado a partir de datos de Aranburu (2007).

La cuenca del Mape abastece a casi 4000 personas residentes en días laborables y a más de 8300 personas, entre residentes y visitantes en época estival. La variación estacional en la demanda de agua se agudiza por el cambio en el consumo medio, que incrementa en más de 15 l/seg (Arquitectos e Ingenieros 2004, Aranburu 2007).

3.2. MODELACIÓN DEL SISTEMA.

3.2.1. Fase conceptual

Con base en una revisión de literatura se identificaron los flujos de entrada y salida de agua, las unidades de almacenamiento, los flujos que tienen lugar entre unidades de almacenamiento, los factores que determinan la intensidad de dichos flujos y la relación entre estos componentes. La abstracción del sistema físico fue representada en entorno Vensim ® PLE 5.7 (Ventana Systems 2008).

3.2.2. Fase cualitativa (espacio - temporal)

Se delimitó y describió la dimensión biofísica de la cuenca, utilizando ArcMAP 9.2 (ESRI 2006), a partir de la información cartográfica citada en la tabla 1.

Tabla 1. Fuentes de información cartográfica empleadas en la fase cualitativa de modelación del sistema de provisión de agua en la cuenca del río Mape (CAPV, España).

Tema	Escala	Autor	Fuente	
Relieve (Curvas de nivel cada 10 m)	1:1000	D.F.B.	Patronato de Urdaibai	
Cuencas visuales en la RBU				
Hidrografía en la RBU		P- R BU		
Sistema de riego de la RBU				
Unidades Ambientales de la RBU	1:25000	D.F.B	URA (2003)	
Suelo				
Litología				
Permeabilidad		Rodríguez 2007		Rodríguez (2007)
Vulnerabilidad de acuíferos				
Valor ecológico de la RBU				
Criterios empleados para la valoración ecológica de la RBU				
Estructura de la vegetación	NE	Rodríguez 2007	Rodríguez (2007)	
Control de la erosión				
Regulación del ciclo hidrológico				

D.F.B.: Diputación Foral de Bizkaia.

P-RBU: Patronato de Urdaibai.

NE: No especificada.

Los límites fueron definidos mediante análisis espacial del modelo digital del terreno, las cuencas visuales, la hidrografía y sistema de riego de la RBU; el área obtenida fue depurada suprimiendo las marismas del estuario y la ría de Mundaka. Las características biofísicas fueron contrastadas con descripciones previas del área (Eraso & Antigüedad 1984, SENER 1988, Morales 1991, INTECSA – INARSA SA 2003, Arquitectos e Ingenieros 2004, Rodríguez 2006, Aranburu 2007 y Rodríguez 2007).

El modelo adaptado a las condiciones de la cuenca del río Mape fue esquematizado sobre el territorio, como lo sugieren Maass *et al.* (2005) y alimentado con valores extremos para ilustrar la variabilidad temporal (Lindenmayer *et al.* 2008).

3.2.3. Fase cuantitativa

i. Parámetros morfológicos de la cuenca

Con la cuenca delimitada y utilizando ArcMAP 9.2 (ESRI 2006), se determinó su área (A), perímetro (P), longitud máxima desde el perímetro hasta la desembocadura (L) y pendiente media; se calcularon los índices de compacidad ($K_c = 0.28 P/\sqrt{A}$), alargamiento ($IA = E/\sqrt{A}$) y forma ($K_f = A / L^2$) y se elaboró la curva hipsométrica (Eraso 1984, Cote 2007).

ii. Parámetros morfológicos de la red de drenaje

Igualmente, se determinó la longitud del cauce principal (L_c), el orden de las corrientes (O) por el método de Strahler, la longitud de todos los cauces (I), la densidad de drenaje ($D_d = I / A$), el coeficiente de torrencialidad ($C_t = \text{corrientes de primer orden} / A$) y la relación de bifurcación (R_b), calculada como el cociente entre el número de corrientes de orden U y el número de corrientes de orden U+1 (Eraso 1984, Cote 2007) y se determinó la pendiente media y máxima del cauce principal.

Con base en las características morfológicas de la cuenca y del cauce principal se calculó el caudal base para la cuenca del Mape según la equivalencia $Q_b = 0.66 Dd^{-2}$, deducida por Carlston (Eraso 1984), esta estimación se aplicó también a la cuenca alta del río Oka, previamente delimitada por URA (2004), con el fin de verificar la precisión del cálculo en la cuenca del río Mape.

iii. Características climáticas

En ausencia de estaciones hidrometeorológicas para la cuenca del Mape (EUSKALMET [En línea]), se utilizaron los registros de la estación G063 – Muxika; esta fuente de datos se consideró oportuna por la continuidad y precisión de sus datos y por ser la estación no costera más antigua ubicada en la unidad hidrológica Oka Morales (1991).

iv. Cálculos de provisión de agua

Se aplicó el balance hídrico mensual desarrollado por Trabucco *et al.* (2008), a la cartografía digital para 2002, modificando el cálculo de la evapotranspiración real de acuerdo con los datos disponibles, así:

- La evapotranspiración de referencia se calculó por el método FAO Penman-Monteinth, con la ecuación $ETP_0 = 0.0023 \cdot RA \cdot (T^o_{media} + 17.8) \cdot \Delta T^o^{0.5}$; RA es la radiación solar en MJ, T^o_{media} la temperatura media mensual y ΔT^o el rango de temperaturas para el mes. Se utilizó un único valor de radiación, 69.57MJ/m² (EUSKALMET 2003).
- La evapotranspiración real, $ETP_R = ETP_0 \cdot K_{veg} \cdot K_{suelo}$. El coeficiente K_{veg} se consultó en la tabla publicada por la FAO (FAO 2007), haciendo equivalencias para las coberturas no incluidas, con base en el porte y la arquitectura de las especies dominantes. El coeficiente de reducción K_{suelo} varía entre 0 y 1 y depende del

estado de saturación del suelo, el valor mensual fue único para toda el área y se estimó con base en el valor de precipitación del mes inmediatamente anterior, como se muestra en el anexo 1.

- Precipitación efectiva, se define como la diferencia entre el grueso de la precipitación y la interferencia ($E_{prec} = G_{prec} - Int$). La interferencia depende de las características morfológicas y poblacionales de las coberturas, expresadas con el coeficiente K_{int} ($Int = G_{prec} - K_{int}$), consultado en estudios ecohidrológicos previos (Valente *et al.* 1997, Ataroff & Sánchez 2000, Cantú & González 2005, Pizarro *et al.* 2006).
- Incremento en el vapor de agua: $IV = ETP_R + Int$.

3.3. IDENTIFICACIÓN DE INDICADORES

Se realizaron dos ensayos para identificar indicadores de la integridad del sistema de provisión de agua dulce. En el primero se comparó la media frente al promedio ponderado por el área, para los coeficientes K_{veg} y K_{int} , utilizando la expresión porcentual y la diferencia aritmética. En el segundo ensayo, se calculó el cociente de cada elemento del balance hídrico respecto a los demás, como se presenta en la tabla 2 y se seleccionó como posibles indicadores aquellas expresiones cuyo valor se encuentra entre cero y uno, con el fin de homogenizar los valores para realizar una comparación objetiva, utilizando el coeficiente de similaridad, definido como $CS_{A-B} = (1 - |A - B|) / \text{rango}$, donde el rango es igual a uno.

Para poner a prueba los indicadores propuestos, se realizaron una proyección temporal hacia el pasado (posdicción) y dos hacia el futuro (predicciones), con el fin de evaluar su sensibilidad a cambios en el régimen climático, el uso de la tierra y al calentamiento global.

Tabla 2. Matriz para el cálculo de cocientes entre elementos del balance hídrico desarrollado por Trabucco *et al.* (2008). X: expresiones con valor entre 0 y 1.

		Dividendos						
		Gprec	Eprec	ETP ₀	ETP _R	Esc	Int	IV
Divisores	Gprec	1	X	X	X	X	X	X
	Eprec		1	X	X	X	X	X
	ETP ₀			1	X			
	ETP _R				1			
	Esc			X	X	1	X	X
	Int			X	X		1	
	IV			X	X		X	1

3.3.1. Proyección temporal hacia el pasado: 1991

En ausencia de registros hidroclimáticos para la cuenca del Oka (Arquitectos e Ingenieros 2004, EUSKALMET [En línea]), se comparó la correlación entre registros de las estaciones G063 – Muxika y 082 – Sondika, mediante la aplicación de regresiones lineales para 6 años (2002 a 2007). La estación 082 – Sondika se seleccionó por ser la más antigua para la costa norte del País Vasco, por presentar la mejor continuidad desde el año 1947 (Morales 1991, INTECSA – INARSA SA. 2003) y por compartir características de posición geográfica con la estación G063 – Muxika, como altitud y ausencia de barreras orográficas (Morales 1991). Así mismo, se tuvo en cuenta la variación en la radiación solar en el período 1990 – 1999 reportada por Belmonte *et al.* (2002), 7.6% menor al principio de la década. De nuevo, se aplicó el balance hídrico descrito sobre la cartografía de vegetación para el año 1991.

3.3.2. Proyecciones temporales hacia el futuro: 2013

Se utilizó una única predicción climáticas basada en los valores de modelación futura empleados por López Bermúdez (Universidad de Murcia, *Com. pers.*) para el estado español, incrementando los valores de temperatura (media, mínima y máxima mensual) en 1.5°C y disminuyendo la precipitación mensual en 15%. Se modificó la cartografía de

2002 en dos escenarios para aplicar el balance hídrico, uno siguiendo las tendencias de cambio de uso del suelo entre los años 1991 y 2002, previa creación de la matriz de probabilidades de transición de las coberturas, con lo que se recreó el escenario inercial y otro, el escenario alternativo, proyectando el cambio de uso de la tierra a la protección de las riberas para mantener la oferta hídrica de la cuenca, de acuerdo con la normativa (Gobierno Vasco 2003). En ambos casos la edición de las coberturas consideró las relaciones de vecindad y el tamaño de la mancha original, como lo sugieren Paegelow *et al.* (s.f.) y Henríquez *et al.* (2006).

4. RESULTADOS

4.1. Fase conceptual

El modelo general representa la complejidad de las relaciones entre los factores que regulan el flujo de agua a través de los compartimentos ambientales en cualquier cuenca hidrológica. Se consideran la función de transporte del agua, el principio de conectividad, entre los ecosistemas terrestres y acuáticos y el principio de continuidad, entre las cabeceras y las zonas bajas. Este es un sistema abierto, aunque el volumen de agua que entra a la cuenca llegará a la atmósfera, allí las fuerzas meteorológicas pueden favorecer la pérdida (o ganancia) neta de agua. La entrada de agua es la precipitación, que llega directamente a casi todos los compartimentos ambientales de la cuenca en cada evento de lluvia, granizo o nieve. Los compartimentos en que se almacena el agua son: el suelo, la vegetación, las redes de acueducto y saneamiento, los cuerpos de agua superficiales lénticos, la atmósfera y los acuíferos. Entre estos compartimentos, el agua fluye a través de procesos como la percolación, la capilaridad, la evaporación y la escorrentía. La red hidrológica superficial incluye los drenajes naturales, los cuerpos de agua lénticos y los ecosistemas lóticos (corrientes de todos los ordenes). Además, hay flujos de agua que ocurren de manera puntual en el espacio, como la escorrentía vertical, dependiente de la

estructura de la vegetación y en el tiempo, como la escorrentía eventual (asociada a los eventos de precipitación), la transpiración (dependiente del estatus hídrico de las plantas) y la captación y descarga realizada por las redes de aprovechamiento de agua dulce. Cada uno de estos flujos está regulado por diferentes factores, dentro de los que sobresalen la vegetación y el suelo, porque intervienen en varios de ellos, al menos, de manera indirecta (Figura 4).

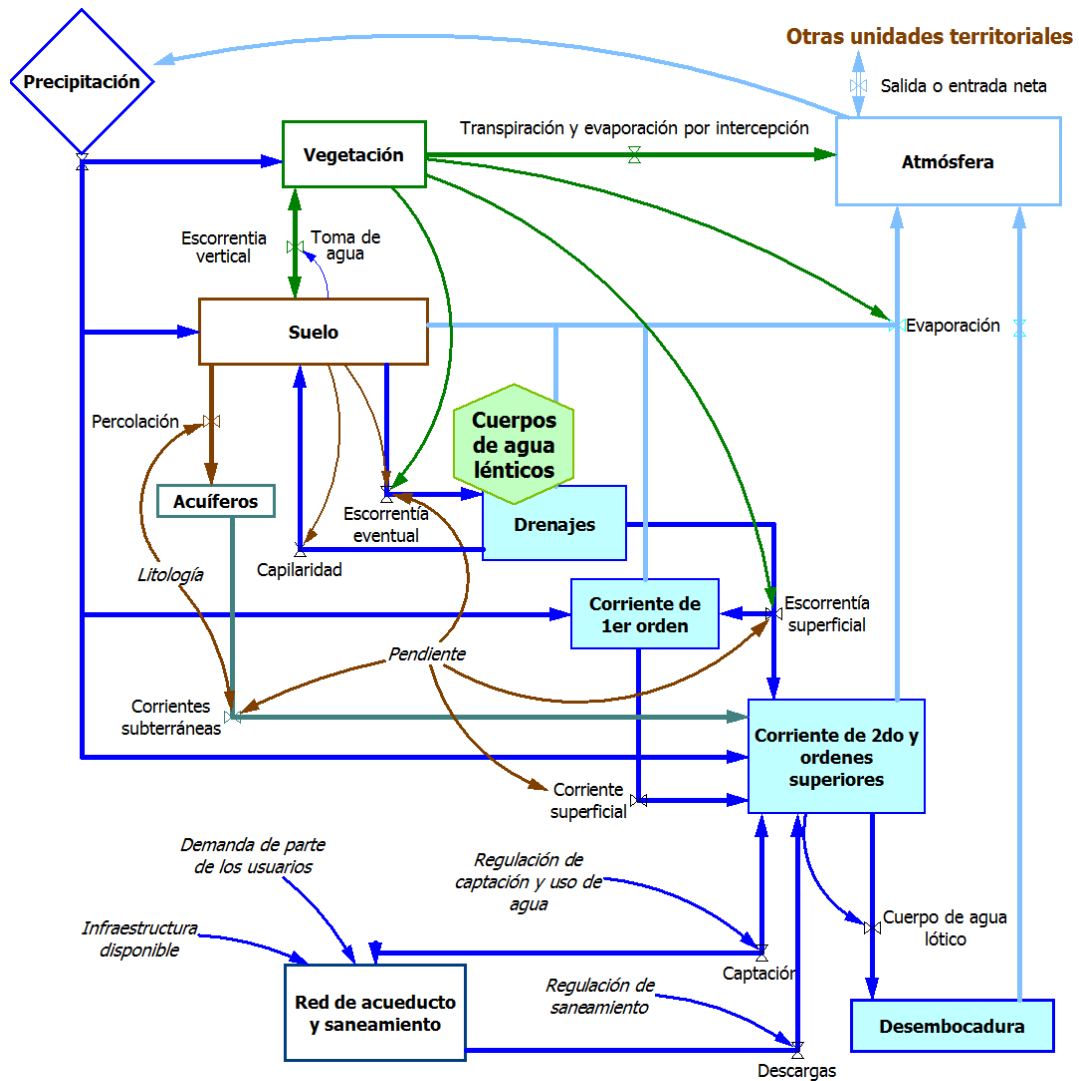


Figura 4. Modelo del ciclo hidrológico en una cuenca hidrográfica. Entrada (diamante), flujos (líneas rectas), factores de regulación (líneas curvas) y unidades de almacenamiento de agua. Colores diferentes indican unidades ambientales diferentes, las figuras coloreadas indican la red hidrológica superficial (ver texto). Elaboración propia.

4.2. Fase cualitativa

La cuenca del Mape incluye parte del territorio de 6 municipios vizcaínos (Figura 5 A), comprende un gradiente altitudinal que va desde el nivel del mar, bordeando la ría de Mundaka, hasta los 686 m de altitud en el monte Sollube, ubicado en su extremo occidental. De acuerdo con las características litológicas, edáficas y de permeabilidad, la cuenca puede dividirse en dos porciones que casi coinciden con la división de las unidades ambientales de la RBU: los barrancos y el valle (Figura 5 B).

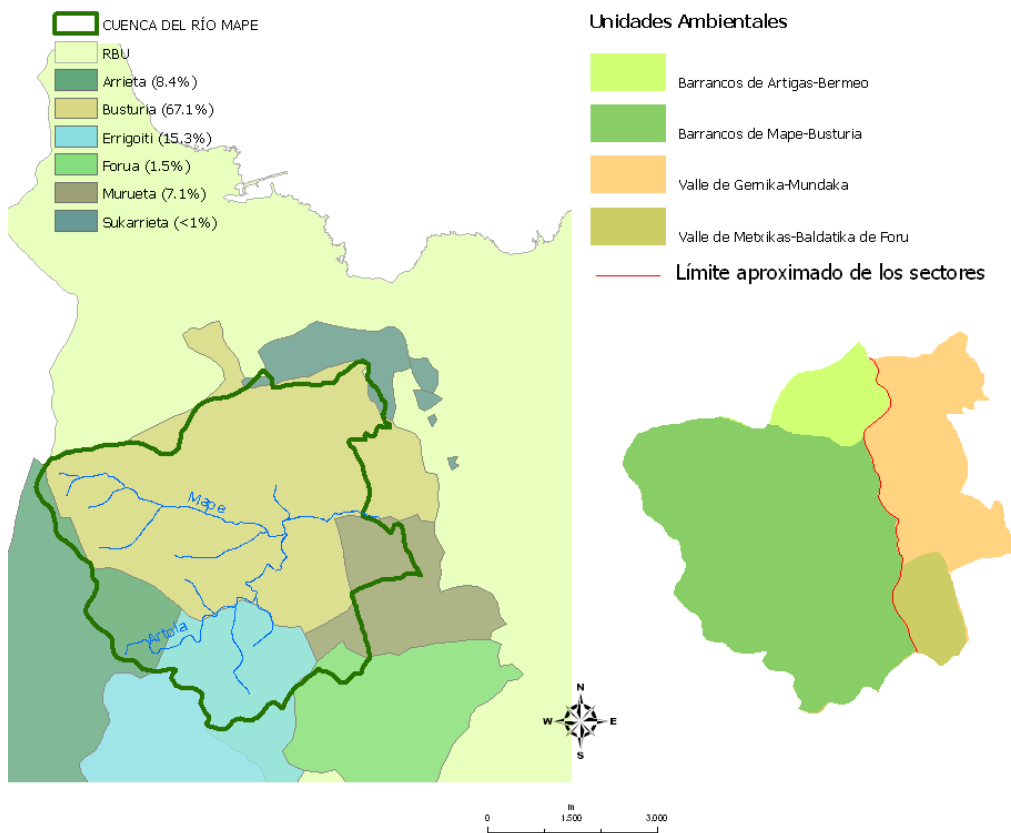


Figura 5. Municipios incluidos en el territorio de la cuenca del río Mape (A) y sectores definidos con base en características litológicas, edáficas y de permeabilidad (B). En A se indica entre paréntesis el porcentaje del territorio ocupado por cada municipio. Elaborado a partir de la cartografía digital de la RBU.

En los barrancos el suelo predominante es el cambisol, que se asienta sobre rocas areniscas y que tiene, en general, permeabilidad media a baja. En los valles, los suelos que ocupan una mayor extensión son de tipo litosol y luvisol desarrollados sobre margas y calizas, por lo que presentan una mayor permeabilidad (media alta a alta).

El valor ecológico propuesto y calculado por Rodríguez (2007) integra la valoración cualitativa de varios criterios. De acuerdo con este indicador, la cuenca del Mape es muy similar al resto de la RBU, en ambas el valor ecológico predominante es medio (68% y 62%, respectivamente), seguido de valores bajos y muy altos, que ocupan el 12.5% y 10.1% del área en la cuenca del Mape y 12.1% y 9.5% en la RBU. En la cuenca del Mape, la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación es baja en el 74,2% del territorio; el uso del suelo corresponde a vegetación con estructura muy simple (49.2%) o simple (30.7%) y se considera que un 84.8% de su superficie tiene implicaciones medias o bajas sobre la regulación del ciclo hidrológico (Figura 6).

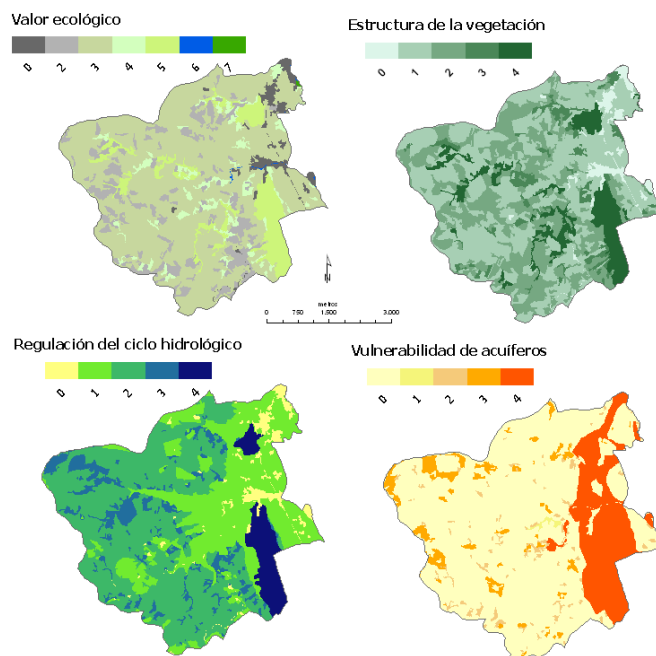


Figura 6. Distribución espacial del valor ecológico calculado por Rodríguez (2007) y algunos de los criterios para calcularlo. Elaborado a partir de la cartografía digital generada por Rodríguez (2007).

El sistema de aprovechamiento de agua dulce capta las aguas superficiales de la cuenca para dotar el subsistema BUSPEMUN del Consorcio de Aguas de Busturialdea, a través de siete puntos de captación localizados en el área de barrancos de la cuenca (Figura 7 A). El agua tratada en la ETAP es conducida y distribuida a los municipios de Busturia y Sukarrieta y a la porción del municipio de Mundaka que se encuentra en la margen izquierda de la Ría (SENER 1988 y Aranburu 2007). Las aguas servidas son colectadas y luego vertidas al cauce principal en el valle de la misma cuenca. Las variación estacional de la demanda de agua, generan tal presión de consumo sobre el agua del Río Mape que, en ocasiones, es necesario realizar trasvases desde la cuenca de Bermeo (Aranburu *Com. prer.*).

Considerando estas características, el modelo depurado se compone de los elementos de un balance hídrico simplificado, acoplado a un sistema de consumo (Figura 7). La entrada de agua (precipitación efectiva) depende del régimen climático (precipitación total) y del tipo de uso del suelo (interceptación) y es regulada por la evapotranspiración; el flujo generado (escorrentía) va a las corrientes de agua, centro del sistema de provisión. El agua dulce es entonces aprovechada por los sistemas ecológicos y por la sociedad; los ecosistemas la aprovechan de manera difusa a través de corrientes (incluye flujos por capilaridad e infiltración), mientras que la sociedad los aprovecha de manera puntual mediante las captaciones (consumo), cuyos volúmenes responden a la demanda (función del tamaño de la población y del consumo medio). El flujo de agua desde la sociedad a los ecosistemas aguas abajo ocurre mediante las descargas, proporcionales al volumen almacenado en infraestructura (comunidades humanas) y con un retraso debido al tiempo de retención; a la escala de estudio (decenas de kilómetros cuadrados) los ecosistemas aguas abajo constituyen el sumidero de los flujos de agua que viajan a través de la cuenca (Figura 7 A).

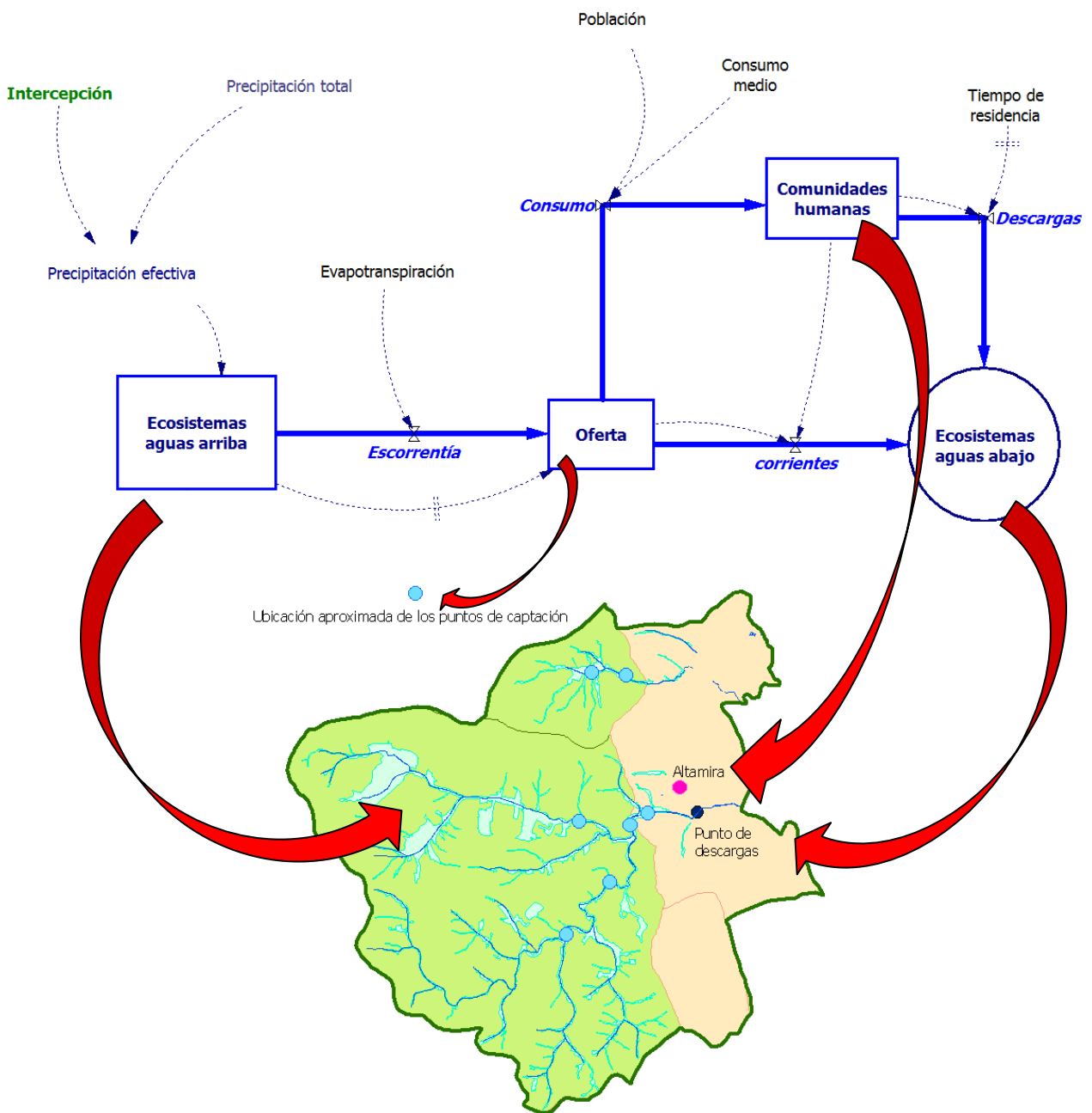


Figura 7 A. Representación cualitativa del sistema de provisión de agua dulce en la cuenca del río Mape en el espacio. Se identifican las corrientes superficiales, los puntos de captación, procesamiento y descarga del subsistema BUSPEMUN. Elaboración propia.

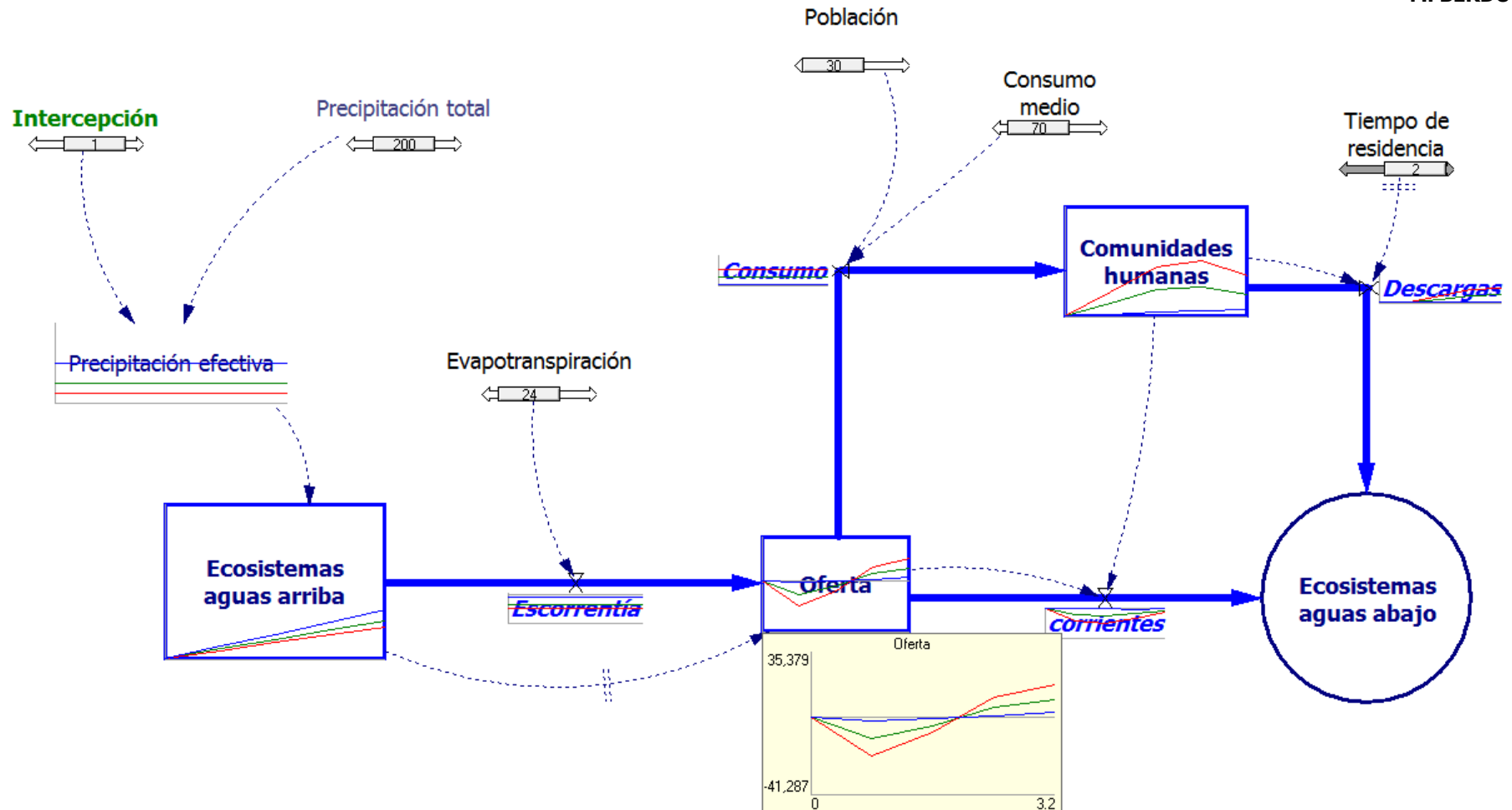


Figura 7 B. Representación cualitativa del sistema de provisión de agua dulce en la cuenca del río Mape en el tiempo (B), ilustrando los flujos de agua dulce bajo las situaciones de línea base (curva verde), alta presión de uso en condiciones estivales (curva roja) y baja presión de uso en condiciones húmedas (curva azul).

Los datos para ilustrar las tendencias temporales (Figura 7 B) corresponden a:

- En la línea base, las estimaciones mundiales de precipitación y evapotranspiración elaboradas por Oki & Kanae (2006) y expresadas como porcentaje respecto a la precipitación terrestre media mundial, mientras que las tendencias de consumo se basan en las descripciones reportadas para los municipios de la cuenca del Oka en días laborables (SENER. 1988, Aramburu 2007).
- En la situación de alta presión de uso en condiciones estivales, la precipitación se redujo a la mitad, la evapotranspiración se duplicó y la interceptación se incrementó al límite superior (1,3) debido a que éste factor es inversamente proporcional a la intensidad de las lluvias cuando se mantiene la cobertura vegetal, los valores de consumo y precipitación fueron expresados en términos porcentuales, con base en los reportes del Consorcio de Aguas de Busturialdea (SENER 1988, Aramburu 2007).
- En la situación de baja presión de uso en condiciones húmedas, la precipitación se incrementó un 100%, para expresar el clima húmedo atlántico propio del área de estudio, se dio un valor intermedio a la interceptación (1), y un valor bajo a la evapotranspiración (24%), se redujo la población hasta un 30% y como valor de consumo medio se utilizó el estándar de consumo mínimo definido por la UNESCO (20 l/habitante).

4.3. Fase cuantitativa

i. Descripción de la cuenca y la red de drenaje

De acuerdo con sus descriptores morfológicos (Anexo 2), la cuenca del río Mape es más o menos regular, casi cuadrada y compacta, con lo que su forma se define como oval oblonga a rectangular oblonga; el valor de su pendiente media (31.1%) sugiere que

puede darse un buen drenaje por efecto de la gravedad. La curva hipsométrica (Figura 8) muestra un perfil moderadamente maduro, con ausencia de plataformas en las cotas altitudinales mayores, encajamientos cerca de la desembocadura y un valle más o menos colmatado; la altura media de la cuenca (295.3m) se encuentra en el rango de altitudes que ocupa cerca de 8.2 Km², es decir, casi una tercera parte de la misma.

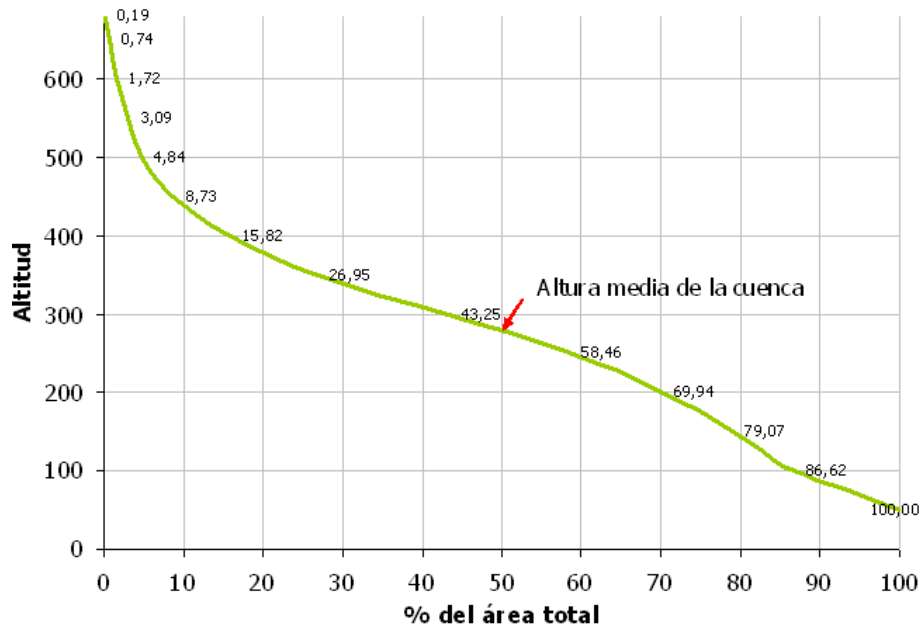


Figura 8. Curva hipsométrica de la cuenca del río Mape (CAPV, España).

El sistema de drenaje obtenido a partir de la modelación digital del terreno difiere del presentado en la cartografía oficial, en el primero se identifica una corriente sobre el área dominada por calizas de alta permeabilidad, se calcula una menor longitud del cauce principal y una mayor longitud de toda la red de drenaje, debida a corrientes de primer orden de longitud media (alrededor de 400 m), por lo cual se prefirió la cartografía oficial para calcular la mayoría de sus descriptores (Anexo 3); sin embargo, con el análisis espacial de ambas fuentes cartográficas el orden máximo de las corrientes es el mismo (4).

La densidad de drenaje calculada (1.4 Km/Km²) indica que el sistema tiene una irrigación media, con lo que se espera que la disponibilidad de agua sea media a baja; el coeficiente

de torrencialidad sugiere que las corrientes de primer orden tienen un tiempo de concentración largo y las relaciones de bifurcación calculadas son consecuentes con la ley de bifurcación de Horton, por lo que se puede afirmar que la cuenca del Mape tiene un sistema de drenaje maduro. Las pendientes media y máxima del cauce principal (20.1 y 58.1) indican que los materiales de su lecho son duros y que éste no tiene un potencial erosivo importante.

El caudal base, estimado por el método de Carlson, para la cuenca del Mape es de 0.34 m³/s y para la cuenca alta de Oka es de 0.15 m³/s.

ii. Características climáticas

En la estación de Muxika el año 2002 empezó con un superávit hídrico, debido a las precipitaciones de finales de diciembre de 2001 (EUSKALMET 2002). Hubo 202 días de lluvia y se registró una precipitación anual de 1287mm, los meses extremos fueron diciembre (229.9mm) y marzo (28.7mm); la temperatura media fue de 14°C, enero reportó la temperatura mínima media (4°C) y agosto la máxima media (24 °C).

iii. Oferta hídrica

Considerando la cobertura vegetal en los barrancos de la cuenca del Mape para el 2002, dominada en un 79% por plantaciones forestales (la tercera parte corresponde plantaciones de eucalipto) y con presencia de cultivos (12%), robledales (7%), bosque ripario y matorrales, la oferta hídrica para el año 2002 (Figuras 9 y 10) fue de 987.4mm, el 77% de la precipitación anual.

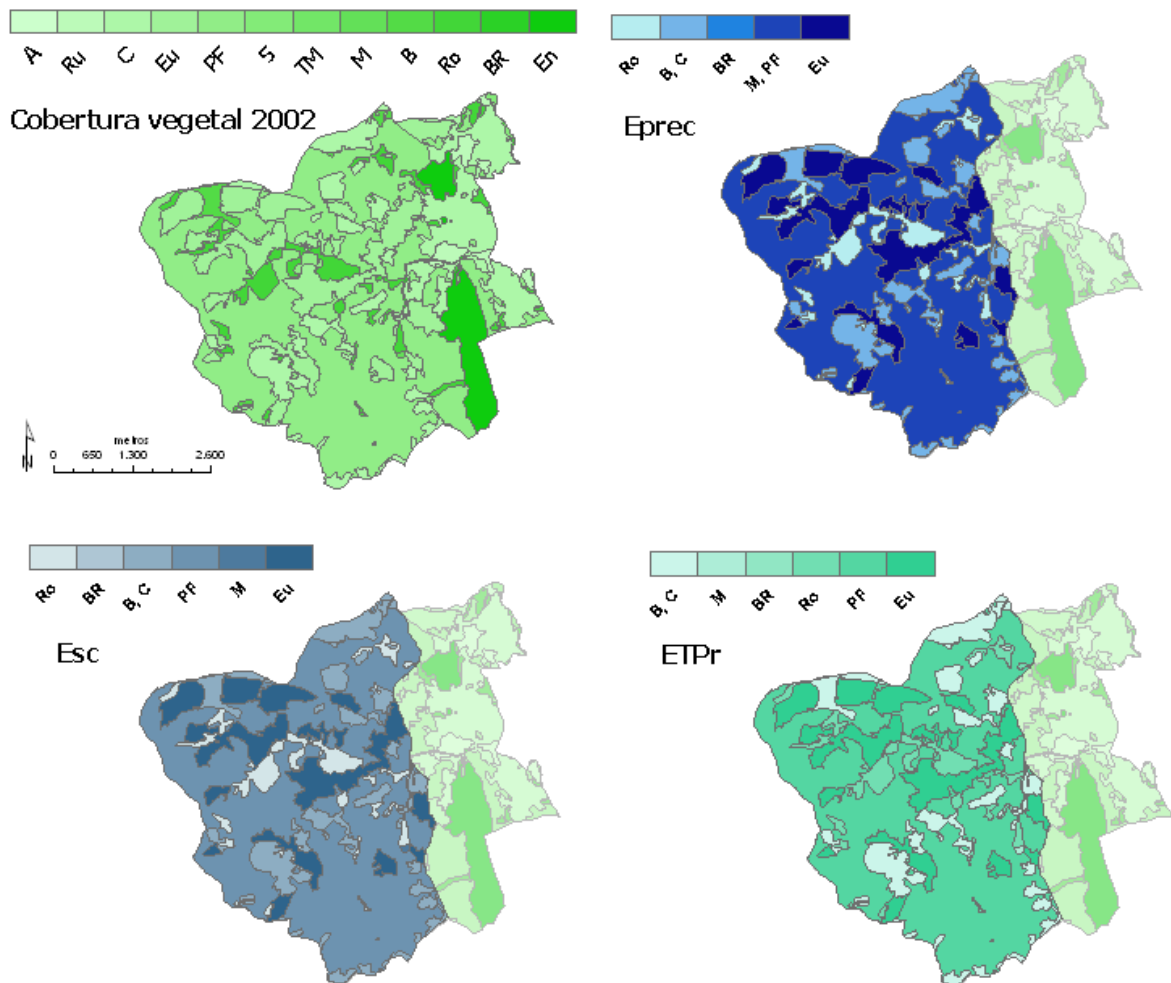


Figura 9. Cobertura vegetal de la cuenca del río Mape (CAPV, España) en 2002 y distribución espacial de los componentes principales del balance hídrico en la zona de barrancos. La intensidad del color es proporcional a la valoración cualitativa de la estructura de la vegetación y a los valores medios anuales de la precipitación efectiva (Eprec), la escorrentía (Esc) y la evapotranspiración real (ETPr) calculados para cada tipo de vegetación. A: arenasles, B: brezales, BR: bosque ripario, C: Cultivos, En: Encinar, Eu: plantaciones de eucalipto, M: matorral, PF: plantaciones forestales, Ro: robledal, Ru: vegetación ruderal, S: vegetación dominada por Sauce y TM: vegetación típica de marismas. Elaboración propia.

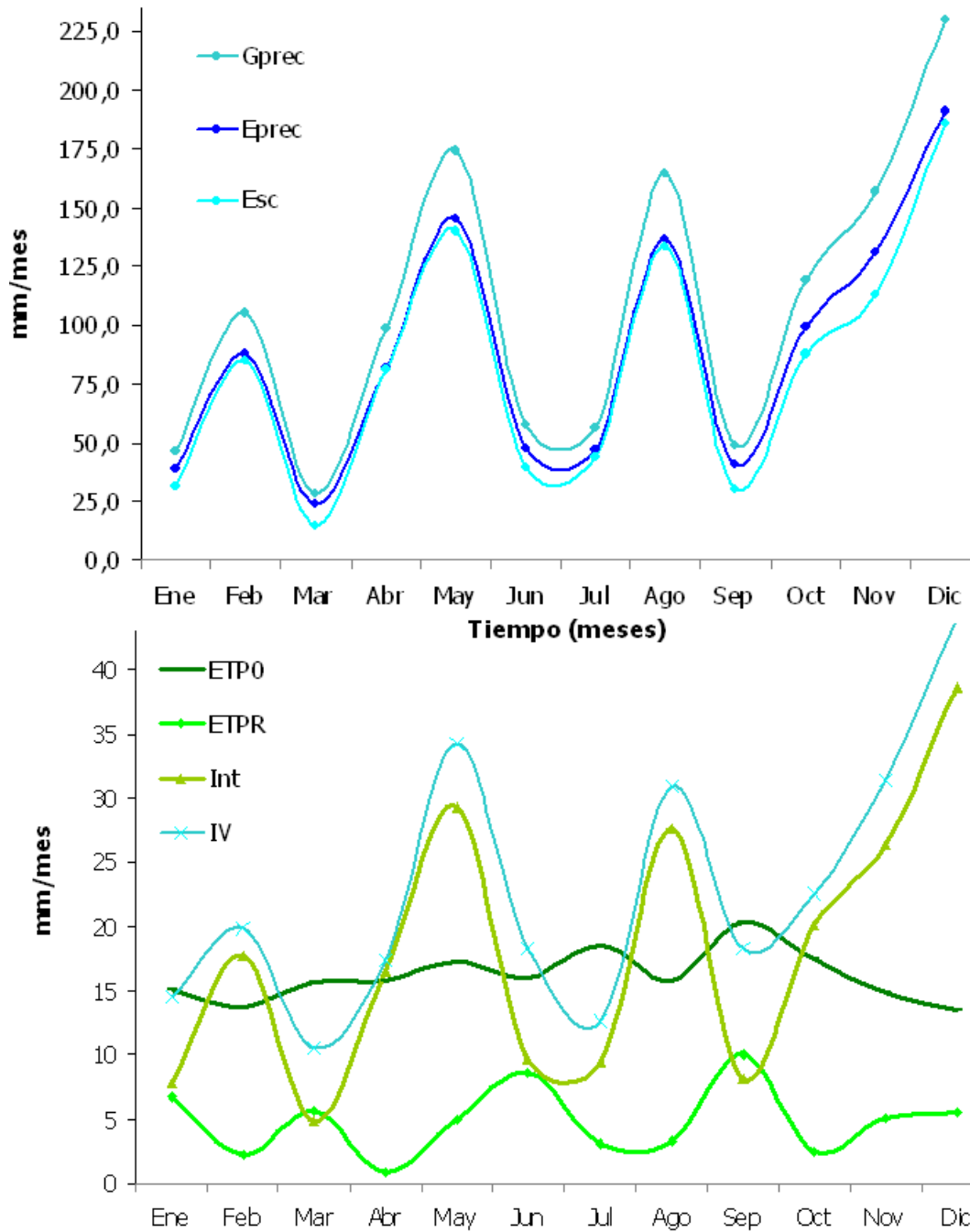


Figura 10. Distribución temporal de los componentes del balance hídrico en la zona de barrancos de la cuenca del río Mape (CAPV, España) durante 2002. Gpre: grueso de la precipitación, Eprec: Precipitación efectiva, Esc: escorrentía, ETP₀: Evapotranspiración de referencia, ETP_R: evapotranspiración real, Int: Interferencia, IV: Incremento en el vapor de agua. Elaboración propia.

4.4. Indicadores propuestos

4.4.1. Proyección temporal hacia el pasado: 1991

De acuerdo con el ajuste de la regresión lineal entre los registros de las estaciones (Anexo 4), resulta oportuno utilizar los datos de la estación de Sondika para rellenar a serie climática de la estación Muxika y describir el clima de la cuenca del Mape en el año 1991. Con esto, se puede afirmar que 1991 fue un año más lluvioso que el 2002, con una precipitación total estimada de 1407.2mm, siendo diciembre el mes más seco (5.22mm) y abril el más lluvioso (245.9mm); la temperatura media fue de 13 °C, con el mínimo medio en enero (3 °C) y el máximo medio en agosto (25 °C). Este régimen climático y el uso de la tierra originaron un balance hídrico en el que la escorrentía fue de 1098.8mm, es decir, el 78% de la precipitación anual (Figuras 11 y 12).

4.4.2. Predicciones para el 2013: Escenarios alternativos

El régimen climático previsto, indica que el 2013 será un año más cálido y seco de lo que se ha registrado en los seis años de funcionamiento de la estación G063 – Muxika. La temperatura media se proyecta en 16°C, la mínima media en 5°C (enero), la máxima media en 26°C (septiembre) y la precipitación anual en 1094.5mm.

De acuerdo con las tendencias de cambio de uso de la tierra entre 1991 y 2002 (Anexo 5), en este año la cuenca del río Mape estará cubierta en un 99% por cuatro coberturas: plantaciones forestales (del cual un 37% estaría plantado con eucalipto), cultivos (19%), robledales (6%) y encinares (6%) y en el restante 1% estarán distribuida la vegetación típica de marisma, los arenales, el bosque ripario, los brezales y matorrales originando una escorrentía de la 861.6mm; en el escenario alternativo, donde las riberas (50m a cada lado de los cauces) estén cubiertas principalmente por bosque ripario y robledal, la oferta hídrica sería levemente inferior, 847.8mm (Figuras 13 y 14).

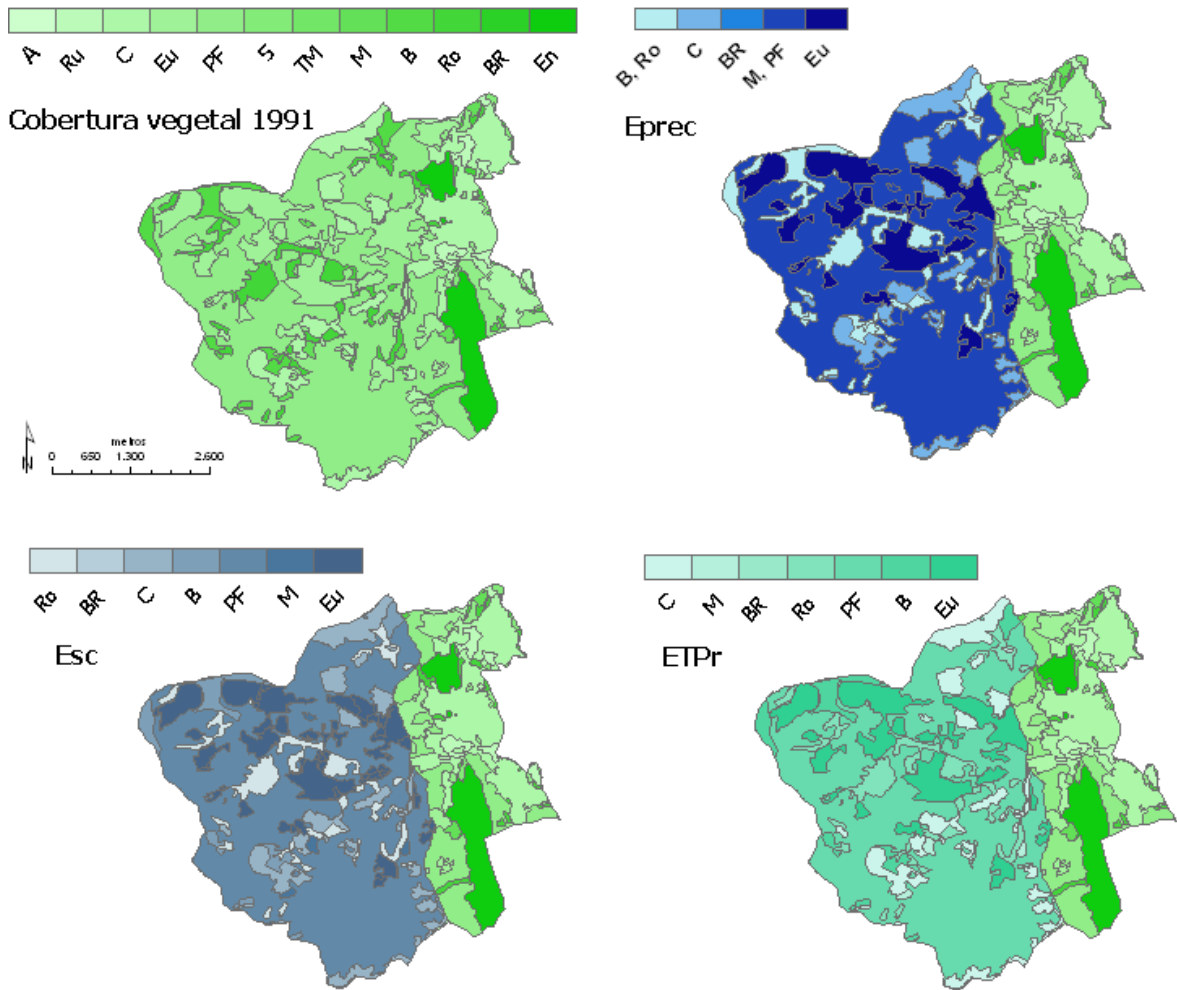


Figura 11. Cobertura vegetal de la cuenca del río Mape (CAPV, España) en 1991 y distribución espacial de los componentes principales del balance hídrico en la zona de barrancos. La intensidad del color es proporcional a la valoración cualitativa de la estructura de la vegetación y a los valores medios anuales de la precipitación efectiva (Eprec), la escorrentía (Esc) y la evapotranspiración real (ETPr) calculados para cada tipo de vegetación. A: arenales, B: brezales, BR: bosque ripario, C: Cultivos, En: Encinar, Eu: plantaciones de eucalipto, M: matorral, Pf: plantaciones forestales, Ro: roble, Ru: vegetación ruderal, S: vegetación dominada por Sauce y TM: vegetación típica de marismas. Elaboración propia

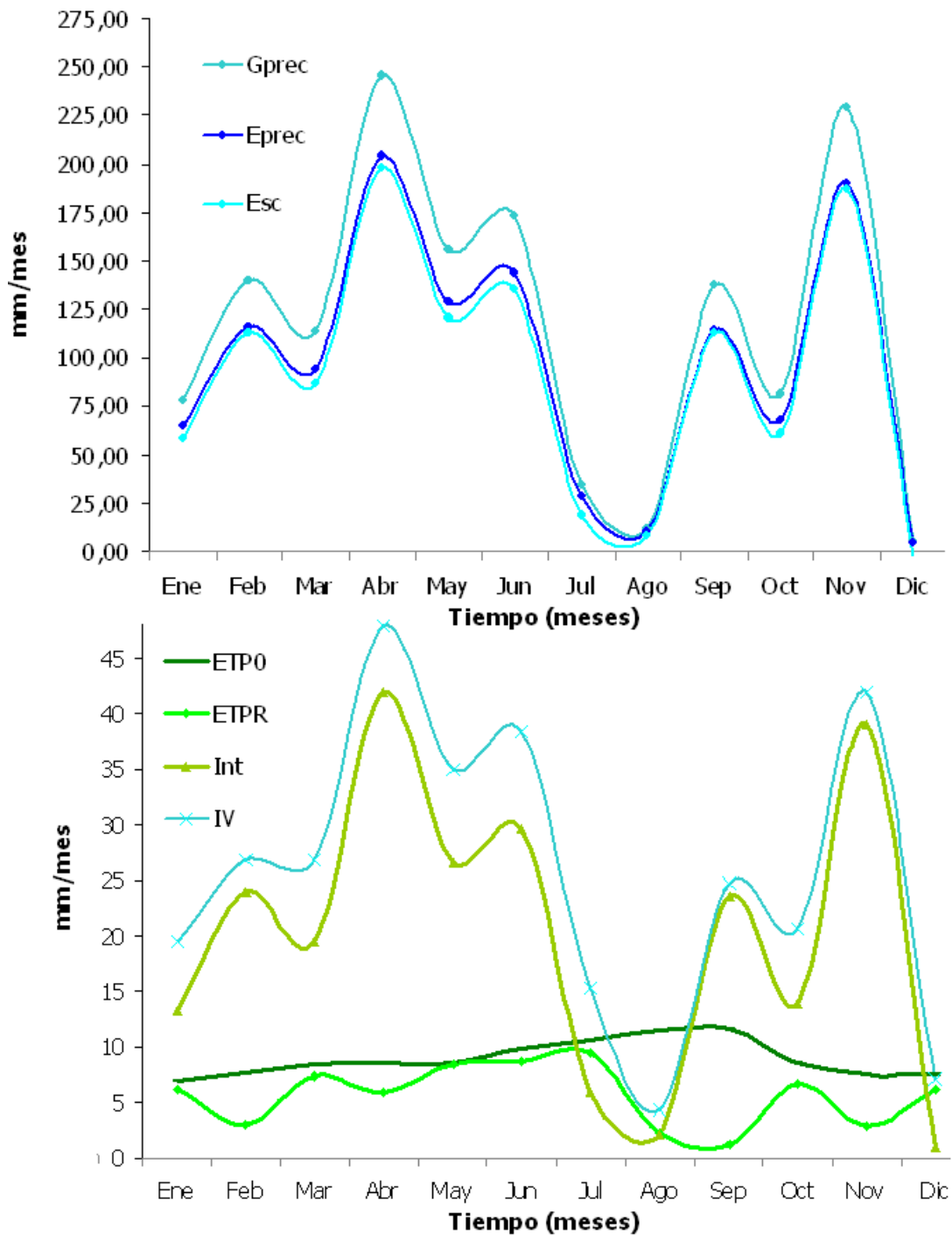


Figura 12. Proyección de la distribución temporal de los componentes del balance hídrico en la zona de barrancos de la cuenca del río Mape (CAPV, España) durante 1991. Gpre: grueso de la precipitación, Eprec: Precipitación efectiva, Esc: escorrentía, ETP₀: Evapotranspiración de referencia, ETP_R: evapotranspiración real, Int: Interferencia, IV: Incremento en el vapor de agua. Elaboración propia.

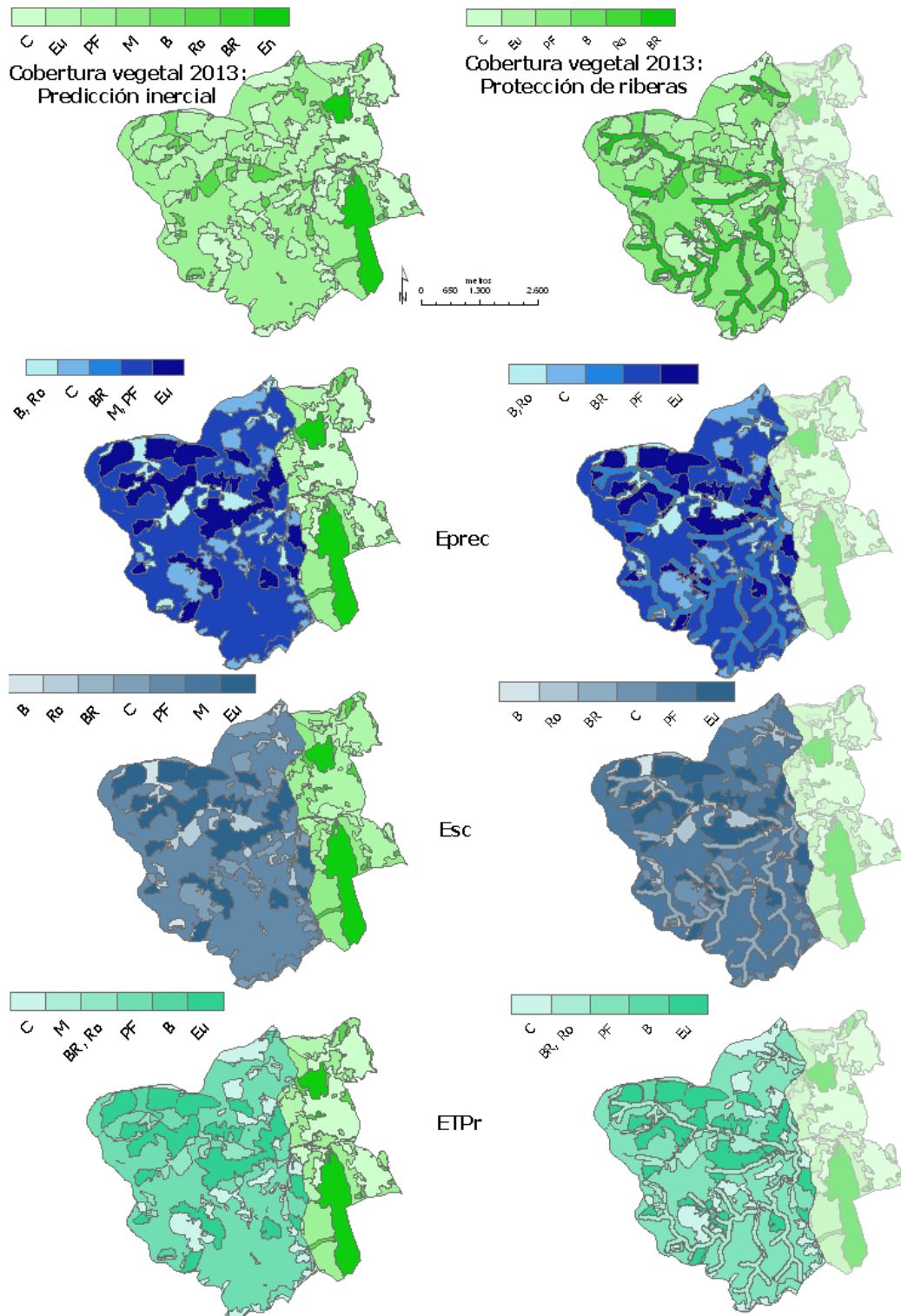


Figura 13. Distribución espacial de los componentes principales del balance hídrico en la zona de barrancos de la cuenca del río Mape (CAPV, España) en el escenario inercial 2013 (izquierda) y de protección de riberas (derecha). La intensidad del color es proporcional a la valoración cualitativa de la estructura de la vegetación y a los valores medios anuales de la precipitación efectiva (Eprec), la escorrentía (Esc) y la evapotranspiración real (ETPr) calculados para cada tipo de vegetación. A: arenales, B: brezales, BR: bosque ripario, C: Cultivos, En: Encinar, Eu: plantaciones de eucalipto, M: matorral, PF: plantaciones forestales, Ro: robledal, Ru: vegetación ruderal, S: vegetación dominada por Sauce y TM: vegetación típica de marismas. Elaboración propia.

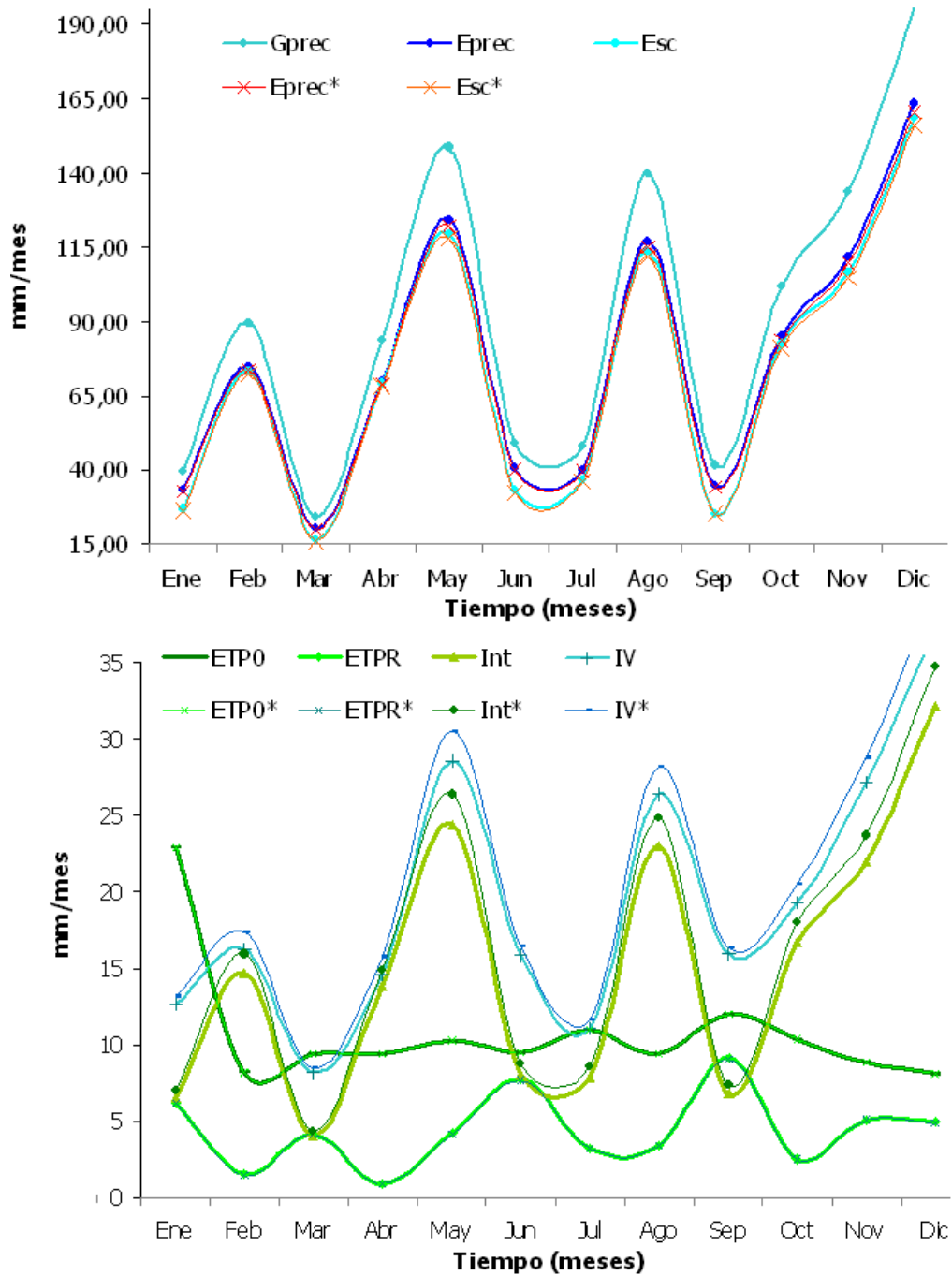


Figura 14. Proyección de la distribución temporal de los componentes del balance hídrico en la zona de barrancos de la cuenca del río Mape (CAPV, España) durante 2013. Gprec: grueso de la precipitación, Eprec: Precipitación efectiva, Esc: escorrentía, ETP₀: Evapotranspiración de referencia, ETP_R: evapotranspiración real, Int: Interferencia, IV: Incremento en el vapor de agua; el asterisco (*) indica los elementos del balance hídrico en el horizonte alternativo. Elaboración propia.

En la figura 15 se presentan las comparaciones de los coeficientes K_{int} y K_{veg} para las proyecciones temporales y para el año 2002. En todas, el promedio ponderado de K_{int} es menor que la media ($79\% \pm$ un punto porcentual) y el promedio ponderado de K_{veg} es mayor que su media ($104\% \pm$ un punto porcentual).

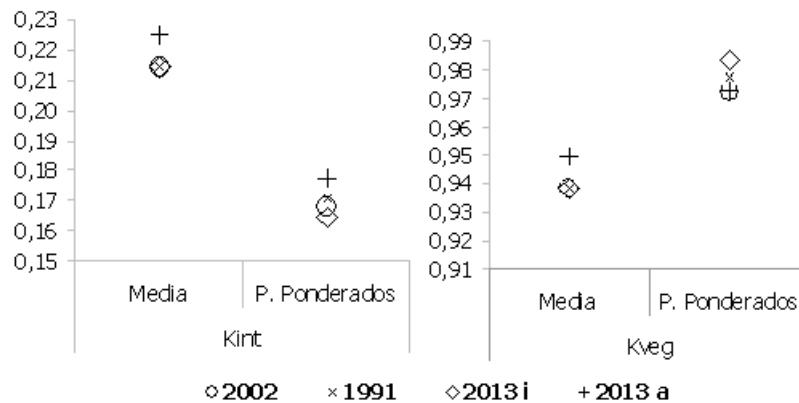


Figura 15. Comparación de los valores medios y promedios ponderados de los coeficientes K_{int} y K_{veg} empleados en el balance hídrico de 2002 y de las proyecciones temporales a 1991, 2013 i: predicción inercial y 2013 a: predicción alternativa, para la cuenca del Mape (CAPV, España).

En cuanto a los cocientes de los componentes del balance hídrico (Anexo 6), en las seis comparaciones posibles (2002 – 1991, 2002 – 2013 inercial, 2002 – 2013 alternativo, 1991 – 2013 inercial, 1991 – 2013 alternativo y 2013 inercial – 2013 alternativo) sólo los cocientes ETP_R/ETP_0 , ETP_0/Int y ETP_0/IV presentaron coeficientes de similitud inferiores a 0.8 y a 0.7 (Anexo 7). Los coeficientes de similitud inferiores a 0.7 se presentaron únicamente en la comparación 2002 – 1991, mientras que los inferiores a 0.8 se presentaron para los cocientes ETP_0/Int y ETP_0/IV en las comparaciones 2002 – 1991 y 1991 – 2013 inercial, y para el cociente ETP_R/ETP_0 en las comparaciones entre 2002 – 1991, 1991 – 2013 inercial, 1991 – 2013 alternativo.

5. DISCUSIÓN

Los principios de conectividad (ecosistemas terrestres – ecosistemas acuáticos) y continuidad (cabeceras – zonas bajas) presentados en el modelo general del ciclo hidrológico, han sido descritos desde el siglo I (Andréassian 2004) y han sido recientemente recalcados en estudios ecológicos e hidrológicos por autores como Ptacnik *et al.* (2005), Oki & Kanae (2006) y Wipfli *et al.* (2007). En este modelo se manifiesta que, al ser un sistema físico, los factores biofísicos que regulan los flujos de agua en las cuencas hidrográficas (vegetación, suelos, litología, pendiente, capilaridad, clima) cambian en el espacio para un mismo momento, como lo contemplan los modelos de Témez y TETIS (Arquitectos e Ingenieros 2004) y de la misma forma, los factores antrópicos (demanda, infraestructura, normas), dependen del contexto socioeconómico y varían en el espacio aunque a una escala mayor, de acuerdo con entes administrativos territoriales de diferente orden.

En cuanto al tiempo, este modelo sugiere que las corrientes y cuerpos de agua que alimentan las redes de acueducto, determinan la escala de análisis, dado que la presencia de cuerpos de agua lénticos (naturales o antrópicos) representan almacenes de agua de fácil acceso, mientras que los acuíferos se recargan en mayores lapsos y el agua subterránea fluye a una escala temporal mucho mayor que el agua superficial. Por otro lado, en escala temporal ecológica (y humana), la vegetación y las propiedades del suelo son los factores que cambian en breves lapsos, como lo contemplan los estudios que relacionan la esorrentía líquida y la esorrentía sólida, que corresponde al material arrastrado por el efecto erosivo de las lluvias (Lasanta *et al.* 2000, García-Ruiz 2008) y balances hídricos con la aproximación de "agua verde" (Jewitt *et al.* 2006). En éstos, además de considerar como entradas la precipitación, las aguas de esorrentía y la

infiltración, típicas en análisis hidrológicos tradicionales (Rokström & Gordon 2001), se considera el “agua verde”, es decir, el vapor de agua transpirado por las plantas, el agua interceptada por la vegetación y el agua que es evaporada directamente del suelo y los cuerpos de agua (Rokström & Gordon 2001, Jewitt *et al.* 2006).

Aunque los análisis de ganancias o pérdidas netas de precipitación generalmente se relacionan con situaciones extremas, como el fenómeno del niño en localidades con susceptibilidad a la sequía o a las inundaciones (Adger *et al.* 2007), las previsiones de calentamiento global y el continuo avance de otros factores del cambio global, como el cambio de uso del suelo y crecimiento poblacional (Lana-Renault *et al.* 2002) llevan a considerar su presencia en contextos favorecidos por factores biofísicos y socioeconómicos, como la costa norte vizcaína.

5.1. Dinámica de provisión de agua asociada a la cuenca del río Mape

La extensa caracterización previa de la zona de estudio permite identificar en el espacio los elementos del sistema de provisión de agua dulce y depurar el modelo general a las condiciones de la cuenca del río Mape, particularmente en la aproximación cualitativa. Para un futuro desarrollo de la fase cuantitativa y específicamente para realizar el balance hídrico con mayor fidelidad, sería óptimo contar con datos puntuales como la capacidad de carga de los diferentes tipos de suelo y, sobre todo, con datos hidroclimáticos de la cuenca, pues teniendo registros diarios de caudal del río o del caudal captado por la ETAP del subsistema BUSPEMUN se podría, incluso, determinar la dinámica estacional de la oferta hídrica real de la cuenca, así como monitorear los niveles del caudal ecológico aguas abajo de los puntos de captación.

5.1.1. Fase cualitativa

El límite norte de la cuenca del Mape coincide, en parte, con los límites del área de aforo y las cuencas visuales definidos por la Agencia Vasca del Agua (Intecsa – Inarsa SA. 2003), la diferencia se explica porque en se han incluido la porción suroriental de los Barrancos Artigas – Bermeo y una porción norte de los valles de Guernika – Mundaka, con base en el análisis de modelación digital del terreno, desarrollado a partir de la topografía (curvas de nivel cada 10m).

La sectorización de la cuenca con base en las unidades ambientales se corresponde con lo reportado por Morales (1999) acerca del tipo de material predominante en cada porción del paisaje, con la valoración de la vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación (Rodríguez 2007) y con la variabilidad espacial de las lluvias descrita por URA (Intecsa – Inarsa SA. 2003) para la RBU, elaborada con base en Polígonos de Thiessen, según la cual, las lluvias disminuyen en la medida en que se asciende por los barrancos. En cuanto a las características biofísicas expresadas con base en la valoración cualitativa de Rodríguez (2007), no se observa una sectorización clara, dado el mosaico de coberturas y usos del suelo, que determinan buena parte de los criterios empleados en el cálculo de este indicador (Figura 6).

La ubicación de los puntos de captación del subsistema BUSPEMUN y la ausencia de cuerpos de agua lénticos y de acuíferos en los barrancos de la cuenca del Mape, permiten concluir que las corrientes ubicadas en la parte alta de la cuenca son, en si mismas, la oferta hídrica de este territorio. Los cuerpos de agua subterránea presentes en la cuenca están en el valle, al lado sur del Mape y corresponden a una pequeña porción (2Km² aprox.) de la unidad hidrogeológica Guernika (Morales 1991) que vierte sus aguas directamente a la ría de Mundaka (Rozas *et al.* 2006).

Aunque las tendencias temporales de oferta y consumo acopladas al modelo simplificado (Figura 7 B) se elaboraron con datos extremos que pueden no representar la dinámica real en la cuenca del Mape (SENER 1988 y Aramburu 2007), esta representación cualitativa sugiere que la porción de los sistemas ecológicos comprendida entre los puntos de captación y el punto de descarga puede ser afectada en la situación de alta presión de uso en condiciones estivales. El efecto consistirá en la drástica reducción del caudal, al punto de afectar la funcionalidad del río como ecosistema, aún a pesar de que la cuenca tenga influencia del clima atlántico, caracterizado por no presentar una época de sequía (Rozas *et al.* 2006).

5.1.2. Fase cuantitativa

El valor de la pendiente máxima de la cuenca (Anexo 2) puede estar errado debido a que se determinó mediante el análisis del modelo digital del terreno; sin embargo, la media puede reflejar las condiciones reales con una precisión aceptable, dado que los valores superiores a 100% ocupan menos del 1% de la extensión total de la cuenca.

La diferencia entre el sistema de drenaje reportado en la cartografía oficial y el obtenido en el análisis digital, refleja la influencia del acuífero sobre el ciclo hidrológico, como lo sugiere las valoraciones de este criterio en la cartografía elaborada por Rodríguez (2007) (Figura 6), pero dado que los puntos de captación de agua se hallan aguas arriba del punto de convergencia hipotética de esta corriente con el cauce principal, esta modelación digital del terreno no afecta de manera drástica el resto de análisis desarrollados.

En conjunto, las características morfológicas de la cuenca y de la red de drenaje del río Mape permiten afirmar que éste es un sistema hidrológico con una tendencia media a presentar crecientes, por lo que se puede describir como torrencial, debido a que su caudal varía en, al menos, un orden de magnitud (Jossette *et al.* 1999) en presencia de precipitaciones leves continuas o intensas (Maneta *et al.* 2008).

El caudal base, estimado para la cuenca alta de Oka es consecuente con los valores reportados por la agencia vasca de meteorología (Euskalmet 2003 y 2004), por lo que el valor estimado para el Mape se puede considerar aceptablemente preciso. En estos reportes de Euskalmet (2003 y 2004) se puede observar el rápido incremento de los caudales en respuesta a las precipitaciones, en comparación con sistemas hídricos propios del mediterráneo (Maneta *et al.* 2008), lo que sugiere que la cuenca alta del Oka es también un sistema hídrico torrencial y que en ambas cuencas los elementos más importantes para monitorear la respuesta del río a las precipitaciones son, el número de días de lluvia a lo largo del año, las características del evento de precipitación (intensidad y duración) y el número de días anteriores a la respuesta de la corriente de agua (Maneta *et al.* 2008).

Lo anterior resulta útil para planificar mediciones en campo, más aún cuando en la evaluación de los recursos hídricos totales de la CAPV (Arquitectos e Ingenieros. 2004) se concluye que el análisis de dobles masas es deficiente para describir las características hidrológicas de la cuenca alta del Oka, es decir, en esta cuenca no hay una proporcionalidad entre el valor de las precipitaciones y el caudal aforado en la estación Muxika. Considerando la cercanía entre la cuenca alta del Oka y la del Mape, se deduce que este análisis será poco preciso también para describir las dinámicas hídricas de la segunda cuenca. El análisis de dobles masas es una herramienta muy frecuente en los

estudios de ecohidrología cuando se tienen registros históricos de, al menos, una década (Cote 2007, Andréassian 2004). Por lo anterior, para el caso del Mape, es arriesgado.

En concordancia con el reporte anual del clima de Vizcaya (Euskalmet 2003), la correlación entre los datos de las estaciones 082 – Sondika y G063 – Muxika y la evaluación multianual de la estación Sondika (Morales (1999), permiten afirmar que el 2002 fue un año muy seco en la costa central vizcaína. La precipitación anual fue de aproximadamente 938mm en la estación de Sondika donde los años típicamente secos reportan precipitaciones de entre 789mm y 940mm y sin embargo, éste fue el año más lluvioso de los seis de funcionamiento de la estación G063 – Muxika (EUSKALMET [En línea]).

De acuerdo con la cobertura vegetal, la cuenca del Mape es un territorio atípico dentro de la CAPV. Según Palacios (2007) las plantaciones de eucalipto representan sólo el 3% de las plantaciones forestales en la cartografía de 2002 para toda la autonomía. Por lo tanto, la discriminación de esta cobertura se consideró oportuna para aplicar los cálculos de balance hídrico; la mayor parte del territorio está cubierto por vegetación de estructura simple y que la vegetación con mayor estructura está ubicada en los valles de la cuenca y corresponde al encinar cantábrico (Figuras 9, 11 y 13).

Tanto en 2002 como en las tres proyecciones, las zonas cubiertas con plantaciones de eucalipto reportan los mayores volúmenes de precipitación efectiva, escorrentía y evapotranspiración (Figuras 9, 11 y 13).

En cuanto a la distribución temporal, es evidente la dependencia de los valores de precipitación efectiva, escorrentía, interferencia e incremento en el vapor de agua con

respecto al grueso de la precipitación, aunque los últimos dos parámetros se describen con una escala un orden de magnitud inferior (Figuras 10, 12 y 14).

5.2. Identificación de indicadores ambientales

La comparación porcentual entre la media y el promedio ponderado de coeficientes K_{veg} y K_{int} no resulta informativa, pues no varía más que en un punto porcentual entre las diferentes situaciones descritas. En general, la diferencia aritmética entre la media y el promedio ponderado de estos coeficientes (Figura 15), describe la vegetación predominante en el área de estudio, al menos, en lo referente a su estructura y fisiología tipo. Esta comparación, pone en evidencia que el territorio está dominado por vegetación con poca estructura, dada la relación directa entre el coeficiente K_{int} y la complejidad de las formaciones vegetales (Martínez – Fernández *et al.* 2005) y caracterizada por mayores tasas de transpiración; esta observación es consecuente con lo reportado por Trabucco *et al.* (2008) cuando compara las zonas dominadas por plantaciones de eucaliptos frente al bosque secundario.

Esto se puede corroborar, observando los mapas de cobertura vegetal y de evapotranspiración real para 2002 y las proyecciones temporales (Figuras 9, 11 y 13). En los mapas de cobertura vegetal de 2002, 1991 y el escenario inercial de 2013 se identifican sólo un par de manchas con el verde más intenso (correspondientes al encinar) en la zona de valles, mientras que en la proyección alternativa de 2013, en la zona de barrancos se observa una mancha de bosque ripario (con el mayor valor de estructura) ubicada en las riberas del sistema hidrológico de la parte alta de la cuenca. En los cuatro mapas de evapotranspiración real, las manchas con color más intenso corresponden a las zonas con plantación de eucalipto, cobertura que por su tasa de crecimiento y de

transpiración influye significativamente en la escorrentía superficial cuando se encuentra en grandes extensiones (Valente *et al.* 1997, Robertson & Wunder 2005).

Por otro lado, se puede afirmar que los cocientes:

- Evapotranspiración real / Evapotranspiración de referencia (ETP_R/ETP_0)
- Evapotranspiración de referencia / Interferencia (ETP_0/Int) y
- Evapotranspiración de referencia / incremento en el vapor de agua (ETP_0/IV)

Son notablemente sensibles a las variaciones en el régimen climático (Anexo 7), dado que en 2002 la precipitación oscila de manera similar entre los lapsos marzo a junio y julio a agosto (Figura 10) mientras que en 1991 las oscilaciones en la precipitación a lo largo del año son mucho menos armónicas (Figura 12). Las características del clima en 1991 indican que este es un año medio, de acuerdo con el análisis multianual de la estación de Sondika (Morales 1999).

El cociente ETP_0/Int fue el que reportó más frecuentemente (en cuatro de las seis comparaciones realizadas) coeficientes de similaridad inferiores a 0.8, seguido por ETP_R/ETP_0 y ETP_0/IV (Anexo 7). Para las comparaciones de los cocientes ETP_0/Int entre 2002 – 2013 alternativo y entre 1991 los dos escenarios de 2013 inercial, sugieren que este cociente es sensible a las diferencias derivadas de las sinergias entre las alteraciones en el régimen climático y el calentamiento global, entre el régimen climático y el cambio de uso de la tierra y entre estos tres factores.

Sin embargo, dada la simplicidad y completitud de ETP_R/ETP_0 éste cociente se perfila como una expresión sensible a las variaciones en el régimen climático y medianamente sensible a la sinergia del cambio en el régimen climático con los efectos del calentamiento global o con las variaciones en el uso de la tierra, dado que:

- Indica cuánto del volumen que se puede evaporar y transpirar realmente se evapotranspira.
- Se calcula involucrando de manera indirecta datos tanto del clima (radiación incidente, temperatura media, mínima y máxima) como de la vegetación y del suelo (K_{veg} , K_{suelo}).
- Es independiente del volumen de precipitación total (G_{prec}).

Finalmente, los datos permiten afirmar que las variaciones en el cambio de uso de la tierra para un mismo contexto climático no son captadas por ninguno de los cocientes calculados, los coeficientes de similaridad para la comparación entre el escenario inercial y el alternativo para 2013 siempre estar por encima de 0.94. De igual forma, el coeficiente de escorrentía (E_{sc}/G_{prec} o E_{sc}/E_{prec}) es una expresión muy poco sensible al cambio en los factores evaluados en las seis comparaciones, pues siempre presentó coeficientes de similaridad mayores a 0.98 (Anexo 7).

5.3. Discusión general

De acuerdo con Vandewiele *et al.* (1993) en cuencas donde la extracción o adición de volúmenes de agua no es importante, donde no hay cuerpos de agua lénticos naturales ni artificiales y en donde no hay presencia continua de nieve, se pueden aplicar al menos cuatro tipos de balances hídricos con resolución a escala mensual. La cuenca del río Mape se ajusta parcialmente a esta descripción y es la información contenida en las caracterizaciones previas lo que permite depurar el modelo y determinar el tipo de balance hídrico consecuente con los datos disponibles. Así, los elementos correspondientes al sistema que en el modelo general representaban una pequeña porción, en el modelo adaptado al sistema de la cuenca del Mape cobran importancia, dado que afectan significativamente los flujos de agua de manera directa por el consumo

(Figura 7 B) y de manera indirecta por la gestión del territorio, expresada en el tipo de cobertura vegetal. Sin embargo, una mayor caracterización del área permitiría desarrollar más la fase cuantitativa e identificar las sinergias (positivas o negativas) entre la vegetación y el suelo sobre la modulación diferencial de los flujos de agua. En un desarrollo posterior de la fase cuantitativa, se podría aplicar la verificación de datos mediante "*Proxy - basin test*", para parametrizar y aplicar modelos hidrológicos de base empírica, como el número de curva, SWAT o SIMPA (Com. pers Francés Gallard¹).

Aunque para los estudios ecohidrológicos e hidroclimáticos se utiliza preferentemente el año hidrológico, es decir, 365 días contados a partir del 1 de septiembre de 2002 (Morales 1999), la carencia de datos climáticos para la cuenca del Mape y la consecuente dependencia de caracterizaciones en otros puntos (Muxika y Sondika) llevaron a desarrollar los balances hídricos en años naturales (1 de enero a 31 de diciembre), lo que en el contexto de la costa norte de Vizcaya no es relevante para los análisis, dada la ausencia de una estación seca claramente definida.

La descripción de las condiciones en 2002 y las tres proyecciones temporales permiten evaluar varios tipos de sensibilidad de los indicadores propuestos:

- Alteraciones en el régimen climático, comparando 1991 (año climáticamente normal) con 2002 (año climáticamente seco).
- El incremento en la temperatura y la disminución de la precipitación, asociados al calentamiento global, comparando 2002 y los escenarios proyectados para 2013 (en esta comparación sólo se tiene en cuenta el calentamiento global, dado que la proyección se basa en el régimen del año 2002).
- Los cambios de uso de la tierra comparando cada descripción con las otras tres.

¹ Francesc Gallart. Institut de Ciències de la Terra Jaume Almera (CSIC) Barcelona.

Aunque la comparación de los promedios ponderados con los valores medios de los cocientes K_{int} y K_{veg} no es sensible a estos cambios cuando se contrastan las situaciones descritas, la diferencia aritmética de cada en cada escenario informa acerca la equitatividad de la extensión ocupada por las diferentes coberturas vegetales.

En único cociente medianamente sensible a los tres tipos de cambio es ETP_R/ETP_0 . Aunque en su cálculo no está incluido el valor de la precipitación (G_{prec} ni E_{prec}) refleja alteraciones en el régimen climático, posiblemente por la relación inversa entre los valores de temperatura (media, mínima y máxima) y la precipitación a escala mensual (Figura 2). Este cociente responde a la pregunta ¿cuánto de la evapotranspiración de referencia realmente se evapora? y su inverso (ETP_0/ETP_R) puede estar relacionado con la eficiencia del uso del agua del conjunto de las coberturas para diferentes condiciones de pluviosidad (Anexo 6). ETP_0/ETP_R varía en dos órdenes de magnitud entre la descripción de la situación en 2002 (3,3) y la posdicción (1,6) y en un par de décimas entre las predicciones (2,442 en el escenario inercial y 2,469 en el escenario alternativo), por lo cual se perfila como un indicador integral, fácil de calcular.

Aunque el coeficiente de escorrentía (Esc/E_{prec} o Esc/G_{prec}) es frecuentemente utilizado en los estudios ecohidrológicos e hidroclimáticos (Andréassian 2004, Cote 2007), en ninguna de las seis comparaciones (Anexo 7) sus coeficientes de similaridad están por debajo de 0.8, es decir, ninguna de éstas expresiones éste es sensible a alteraciones en el régimen climático, el incremento en la temperatura, la disminución de la precipitación, ni los cambios de uso de la tierra cuando se comparan diferentes escenarios para un mismo territorio.

Finalmente, es necesario recalcar que aunque en el escenario inercial los valores de precipitación efectiva y esorrentía son ligeramente mayores a los proyectados para el escenario alternativo de 2013, esto NO indica una desventaja del tipo de uso proyectado para la protección de las riberas sobre las características hidrológicas de la cuenca del Mape. Al contrario, dada la correspondencia entre los volúmenes de esorrentía sólida con la esorrentía líquida (la analizada en este trabajo), el escenario alternativo de 2013 sugiere un control de la erosión y por tanto una mejor calidad del agua en las corrientes.

6. CONCLUSIONES

- La construcción concienzuda del modelo conceptual para un servicio ambiental, constituye una herramienta para su adaptación a las condiciones particulares de un territorio.
- Este modelo será más o menos útil en la medida en que haya información disponible para el área de interés; para el caso estudiado, permite ubicar en el espacio los elementos del sistema de provisión de agua dulce y seleccionar la aproximación de balance hídrico consecuente con los datos disponibles.
- La diferencia aritmética entre la media y el promedio ponderado de los cocientes K_{int} y K_{veg} es un indicador de la equitatividad de ocupación de las coberturas vegetales presentes en un territorio.
- De acuerdo con las comparaciones realizadas, el cociente ETP_R/ETP_0 es útil para comparar el balance hídrico a escala anual cuando varía el régimen climático, se incrementa la temperatura, disminuye la precipitación o cambia el uso de la tierra.
- Esta expresión (ETP_R/ETP_0) se perfila como un indicador alternativo al coeficiente de esorrentía (calculado como $Esc/Epec$ o como $Esc/Gprec$) para comparar la provisión de agua a escala de cuenca, de un mismo territorio bajo diferentes escenarios climáticos y de uso de la tierra.

- La delimitación de la cuenca del Mape y la descripción de sus parámetros morfométricos es un aporte valioso de este estudio, que puede ser optimizado con una fase de verificación de datos en campo.
- En la cuenca del Mape la vegetación con mayor estructura se ubica en la zona de valles y corresponde al encinar cantábrico. El análisis multitemporal sugiere que el incremento en el área plantada con eucalipto en la zona de barrancos favorece una disminución en la oferta hídrica de este territorio.
- Considerando el contexto biofísico y socioeconómico de la cuenca del Mape, puede afirmarse que esta no es un área susceptible a la escasez de agua, pues hay un aporte continuo determinado por las fuerzas climáticas regionales y existen infraestructura y gestión suficientes para suplir las deficiencias de la cuenca bajo condiciones estivales.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Adger, N. S. Agrawala & M. Quader.** 2007. Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity. *In*: Climatic Change: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental panel on climatic change. Eds. Cambridge University press. Cambridge, UK.
- Andréassian, V.** 2004. Water and forest: from historical controversy to scientific debate. *J. Hydrol* 291: 1-27. [DOI: 10.1016/j.hydrol.2003.12.015].
- Aranburu, B.** 2007. Estudio de la población, ganadería e industria actual y futura: estudio de demandas actual y futura. Consorcio de Aguas de Busturialdea. Busturia.
- Arquitectos e Ingenieros.** 2004. Estudio de la demanda de abastecimiento de la cuenca del Oka. Gobierno Vasco [Disponible en línea: http://www.uragentzia.euskadi.net/u81-0003/es/contenidos/informacion/fuente/es_fuente/estudios.htm].
- Asesinolaza, C, D. Gómez, X. Lizaur, G. Monserrat, G. Morante, M. Salaverria & P. Uribe-Echebarria.** 1988. Vegetación de la comunidad Autónoma del País Vasco. Administración de la comunidad Autónoma de Euskadi. Departamento de urbanismo, vivienda y medio ambiente. Central de publicaciones del Gobierno Vasco. Vitoria-Gasteiz.
- Ataroff, M & L. A. Sánchez.** 2000. Precipitación, intercepción y escorrentía en cuatro ambientes de la cuenca media del río El Valle, Estado Táchira, Venezuela. *Rev. Geog. Venez.* 41 (1): 11-31.
- Balmford, A. & W. Bond.** 2005. Trends in the state of nature and their implications for human wellbeing. *Ecology Letters* 8:1218 –1234.
- Balmford, A. & W. Bond.** 2005. Trends in the state of nature and their implications for human wellbeing. *Ecology Letters* 8: 1218 –1234.
- Balvanera, P, G. Daily, P. Ehrlich, T. Ricketts, S-A Bailey, S. Kark, C. Kremen & E. Pereira.** 2001. Conserving biodiversity and ecosystem services (Editorial). *Science* 291: 2047.
- Balvanera, P. & R. Prabhu.** 2004. Ecosystem services: The basis for global survival and development. Commissioned Issue Paper of the UN Millennium Project Task Force on Environmental Sustainability:1 –46.
- Belmonte, F., F. Gomariz, R. Gallego & E. Carmona.** 2002. Radiación y temperatura en el período 1990- 1999 en el campo experimental de "el Ardal" (Murcia): Estudio preliminar. *Papeles de geografía* 35: 17-25.
- Cantú, I & H. González.** 2005. Pérdidas por intercepción de la lluvia en tres especies del matorral submontano. *Ciencia UANL* (1): 80-85.
- CE.** 2000. del parlamento Europeo y del consejo por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de las aguas. Bruselas, 18 de julio de 2000.
- Cote, F.** 2007. Análisis exploratorio de la influencia de los cambios en la cobertura vegetal sobre los caudales medios en la cuenca alta del río Quindío (CARQ) entre 1989 y 2005. Trabajo de grado para optar al título de Ecólogo. Facultad de estudios ambientales y rurales, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
- Daily, G., S. Alexander, P. R. Ehrlich, L. Goulder, J. Lubchenco, P. A. Matson, H. A. Mooney, S. Postel, S. H. Schneider, D. Tilman & G. M. Woodwell.** 1997. Ecosystem Services: Benefits Supplied to Human Societies by Natural Ecosystems *Issues in ecology* (2):1-16.

- de Groot, R., M. A. Wilson & R. M. J. Boumans.** 2002. A typology for the classification, description and evaluation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* 41 (SPECIAL ISSUE: The Dynamics and Value of Ecosystem Services: Integrating Economic and Ecological Perspectives) 393–408.
- Eraso, A & I Antigüedad.** 1948. Estudio de la transformación «precipitación-aportación» en relación con los parámetros físicos de las cuencas hidrográficas. : aplicación a cuatro cuencas de Bizkaia. *Lurralde* 7: 173.195.
- Eraso, A.** 1983. Estudio morfométrico de las cuencas de los ríos Butrón, Oka, Lea y Artibai (Bizkaia). *Lurralde* 6: 35-80.
- ESRI Inc.** 2006. ESRI ® ArcMAP™ 9.2, License type: ArcInfo.
- EUSKALMET** [En línea: <http://www.euskalmet.euskadi.net/s07-9032/es/>].
- EUSKALMET.** 2002. Características meteorológicas del año 2001. [En línea: <http://www.euskalmet.euskadi.net/s07-9032/es/>].
- EUSKALMET.** 2003. Características meteorológicas del año 2002. [En línea: <http://www.euskalmet.euskadi.net/s07-9032/es/>].
- FAO.** 2007. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO de riego y drenaje 56. Roma.
- García-Ruiz, J M. D. Regüés & B Alvera.** 2008. Flood generation and sediment transport in experimental catchments affected by land use changes in the central Pyrenees. *Journal of Hydrology* 56: 245– 260.
- Gobierno Vasco.** 2003. Plan Rector de Uso y Gestión de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai. Texto refundido. Vitoria- Gasteiz, 2004.
- Guo Z. & Y. Gan.** 2003. Spatial pattern of ecosystem function and ecosystem conservation. *Environmental management* 32(6):682-692.
- Henríquez, C, G. Azócar & M Aguayo.** 2006. Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Angeles, VIII Región del Biobío, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande* 36: 61-74.
- Intecsa – Inarsa SA.** 2003. Estudio de Evaluación de los recursos hídricos totales en el ámbito de la CAPV. Gobierno Vasco. Departamento de ordenación del Territorio y medio ambiente, Dirección de aguas. Memoria. [Disponible en línea: http://www.uragentzia.euskadi.net/u81-0003/es/contenidos/informacion/fuente/es_fuente/estudios.htm].
- Izaguirre, O.** 2007. Periphyton and metabolism in Basques streams. Ph.D. Thesis. Universidad del País Vasco. Leioa.
- Jewitt, G.** 2006. Integrating blue and green water flows for water resources management and planning. *Phys. Chem. Earth* 31: 753 – 762. [DOI: 10.1016/j.pce.2006.08.033].
- Jossette G., B Leporcq, N Sanchez & Philippon.** 1999. Biogeochemical mass-balances (C, N, P, Si) in three large reservoirs of the Seine basin (France). *Biogeochemistry* 47 (2): 119-146 [DOI 10.1007/BF00994919].
- Lana-Renault N., P Serrano-Muela, E Nadal-Romero, A Navas, J. Latron, C Martí-Bono & J. Arnáez.** 2002. Con los pies en la Tierra: la degradación del suelo y el desarrollo sostenible en Europa. Un desafío del siglo XXI. *Problemas medioambientales* nº 16. Agencia Europea de Medio Ambiente – PNUMA. Copenhagen.
- Lasanta, T., J.M. García-Ruiz, C. Pérez-Rontomé & C. Sancho-Marcén.** 2000. Runoff and sediment yield in a semi-arid environment: the effect of land management after farmland abandonment. *Catena* 38: 265–278
- Leguía, E. J., B. Locatelli, P. Imbach, C. J. Pérez & R. Vignola.** 2008. Servicios ecosistémicos e hidroenergía en Costa Rica. *Ecosistemas* 17 (1):16 –23. [En línea: URL: <http://www.revistaecosistemas.net/articul.asp?Id=524>]

- Lindenmayer, D., R. J. Hobbs, R. Montague-Drake, J. Alexandra, A. Bennett, M. Burgman, P. Cale, A. Calhoun, V. Cramer, P. Cullen, D. Driscoll, L. Fahrig, J. Fischer, J. Franklin, Y. Haila, M. Hunter, P. Gibbons, S. Lake, G. Luck, Ch. MacGregor, S. McIntyre, R. MacNally, A. Manning, J. Miller, H. Mooney, R. Noss, H. Possingham, D. Saunders, F. Schmiegelow, M. Scott, D. Simberloff, T. Sisk, G. Tabor, B. Walker, J. Wiens, J. Woinarski & E. Zavaleta.** 2008. A checklist for ecological management of landscapes for conservation. *Ecology Letters*, (2008)11:78 –91. [DOI:10.1111/j.1461-0248.2007.01114.x]
- Maass, J., P. Balvanera, A. Castillo, G. C. Daily, H. A. Mooney, P. Ehrlich, M. Quesada, A. Miranda, V. J. Jaramillo, F. García-Oliva, A. Martínez-Yrizar, H. Cotler, J. López-Blanco, A. Pérez-Jiménez, A. Búrquez, C. Tinoco, G. Ceballos, L. Barraza, R. Ayala & J. Sarukhán.** 2005. Ecosystem services of tropical dry forests: insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. *Ecology and Society* 10(1):17 [En línea: [http://www.ecologyandsociety.org/vol10/iss1/art17/.](http://www.ecologyandsociety.org/vol10/iss1/art17/)]
- Maneta, M., S. Schnabel & V. Jetten.** 2008. Continuous spatially distributed simulation of surface and subsurface hydrological processes in a small semiarid catchment. *Hydrol. Proc.* 22 (13): 2196-2214.
- Marini M. & M. Piccolo.** 2000. El balance hídrico en la cuenca del río Quequén Salado, Argentina.
- Márquez, G.** 1997. Ecosistemas estratégicos, bienestar y desarrollo. En: Educación para la gestión ambiental: una experiencia con los funcionarios del Sistema Nacional Ambiental en la Sierra Nevada de Santa Marta.103-115.
- Martínez – Fernández, J., A. Ceballos, S. Casado, & V. Hernández.** 2005. Runoff and soil moisture relationships in a small forested basin in the Sistema Central ranges (Spain). In: R. J. Batalla & C. García (Eds.). *Geomorphological Processes and Human Impacts in River Basins*. IAHS Publ. 299: 31 - 36.
- Meaza, G., M. Aguirre, M^a. J. Ainz, J. Arbaiza, J. A. Cadiñanos, L. Gómez, A. Gogeochea, M^a J. González, M^aJ. Iriarte, J. C. López, P. Lozano, C. Muñoz, O. Ormaetxea, P. Ramil & L. Zapata.** 2004. Biogeografía cultural de los espacios forestales de la reserva de la biosfera de Urdaibai. Informe final del Proyecto de Investigación. Diciembre de 2004.
- Millennium Ecosystem Assessment.** 2005. Ecosystems and human well-being: Synthesis. Island Press, Washington, D.C.
- Morales, T.** 1991. Estudio hidrogeológico de la zona norte de Vizcaya. Tesis Doctoral. Departamento de Estratigrafía, Geodinámica y Paleontología, Facultad de Ciencias, Universidad del País Vasco.
- Oki, T, & S. Kanae.** 2006. Global hydrological cycles and world water resources. *Science* 313, 2068. [DOI: 10.1126/science.1128845].
- Paegelow, M., M. T. Camacho & J. Menor.** S.f. Modelización prospectiva del paisaje mediante sistemas de información geográfica. Laboratorio GEODE. Universidad de Toulouse Le Mirail. Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Granada Dpto. de Territorio y Patrimonio Histórico. Universidad de Jaén.
- Palacios, I.** 2007. Criterios ecológicos para la gestión sostenible del territorio: análisis del paisaje forestal de la C.A.P.V. Dpto. Biología Vegetal y Ecología. Facultad de Ciencias y Tecnología. UPV/EHU.
- Pattanayak, S. & D. T. Butry.** 2005. Spatial complementarity of forest and farms: Accounting for ecosystem services. *Amer. J. Agr. Econ.* 87 (4):995-1008.
- Pizarro, R. M. Tapia, L Román, C. Díaz & C. Farías.** 2006. Coeficientes de escorrentía instantáneos para la cuenca del río Tutuvén VII Región Maule, Chile. *Bosque* 27 (2): 83-91.

- Ptacnik, R. , G.D. Jenerette, A. M. Verschoor, A. F. Huberty, A. G. Solimini & J. D. Brookes.** 2005. Applications of ecological stoichiometry for sustainable acquisition of ecosystem services. *OIKOS* 109: 52 –62.
- Robertson, N & S. Wunder.** 2005. Fresh tracks in the forest: assessing incipient payment for environmental services initiatives in Bolivia. CIFOR. Jakarta.
- Rockström, J & L. Gordon.** 2001. Assessment of green water flows to sustain major biomes of the world: Implications for future ecohydrological landscape management. *Phys. Chem. Earth* 26 (11 – 12): 843_851.
- Rodríguez, G.** 2007. Aplicación de la metodología para la determinación del valor ecológico en el territorio basada en unidades ambientales al caso piloto de la reserva de la Biosfera de Urdaibai.
- Rodríguez, G.** 2006. Dinámica del paisaje y efecto de la fragmentación en la diversidad de la vegetación y en la diversidad funcional del suelo en la Reserva de la Biosfera de Urdaibai. Tesis doctoral. Departamento de Biología Vegetal y Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad del País Vasco.
- Rozas, M, X. Arana & J. Sesma.** 2006. Ficha técnica de los humedales de Ramsar (FIR). Gobierno Vasco, Dirección de Biodiversidad. Gernika.
- San Juan, C., L. Vozmediano, J. L. de la Cuesta & A. Vergara.** 2007. Inventario de conflictos socioambientales e imagen social del delito ecológico en la red espacios naturales de la C.A.P.V.: hacia una propuesta de políticas de desarrollo sostenible. Instituto Vasco de Criminología. Donosita.
- SENER.** 1988. Estudio de las demandas actual y futura en el territorio de Consorcio de Aguas de Busturialdea. Busturia.
- Trabucco A., R. J. Zomer, D. A. Bossio, O. van Straaten & L. V. Verchot.** 2008. Climate change mitigation through afforestation / reforestation: A global analysis of hydrologic impacts with four case studies. *Agric Ecosyst Environ* 126 (1-2): 81–97. [DOI:10.1016/j.agee.2008.01.015].
- UNASYLVA – FAO –.** 2007. Revista internacional de silvicultura e industrias forestales 229 (varios artículos).
- Valente, F, J. S. David & J. H. C. Gash.** 1997. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. *J. Hidrol.*190: 141-162.
- Vandewiele, G. L. Ch. Y. Xu. & Ni-Lar-Win.** 1993. Methodology for constructing monthly water balance models on basin scales. Second edition. Vrije Universiteit Brussel.
- Vélez. J. J., F. López, M. Puricelli & F. Francés.** 2007. Parameter extrapolation to ungauged basins with a hydrological distributed model in a regional framework 2007 *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 4: 909–956
- Ventana Systems Inc.** 2008. Vensim. The ventana simulation environment. Vensim@PLE for Windows Versión 5.7.
- Wipfli, M. S., J. S. Richardson & R. J. Naiman.** 2007. Ecological linkages between headwaters and downstream ecosystems: Transport of organic matter, invertebrates, and wood down headwater channels. *J. Am. Wat. Res. Ass.* 43 (1): 72-85.
- WWF & World Bank.** 2005. Global forest alliance Annual Report. Washington D.C.
- Zimmermann, B., H. Elsenbeer J. De Moraes.** 2006. The influence of land – use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. *Forest Ecology and Management* 222: 29 – 38. [DOI: 10.1016/j.foreco.2005.10.070].

ANEXO 1. Determinación del Kveg con base en la precipitación del mes anterior.

Los valores mensuales de precipitación mensual registrados para la estación G063 – Muxika se ordenaron de manera ascendente; se calculó la mediana de la precipitación (90mm) y se adjudicó el valor intermedio de Kveg (0.5) a los dos valores más cercanos a la mediana. Finalmente se asignaron los valores de Kveg que se presentan a continuación:

Año	Mes	Precipitación	Ksuelo	Año	Mes	Precipitación	Ksuelo
2005	6	9,1	0	2006	2	91,6	0,5
2002	3	28,7	0,1	2002	4	98,5	0,6
2004	6	20,9	0,1	2003	2	96,3	0,6
2004	8	26,5	0,1	2004	4	92,2	0,6
2005	7	15,4	0,1	2005	9	93,7	0,6
2007	7	25,9	0,1	2006	3	97,0	0,6
2003	7	30,9	0,2	2006	10	94,8	0,6
2003	8	36,0	0,2	2002	2	105,2	0,7
2005	5	34,5	0,2	2002	10	119,6	0,7
2006	6	30,3	0,2	2004	2	110,4	0,7
2006	7	39,8	0,2	2004	3	104,1	0,7
2006	8	34,4	0,2	2004	10	106,5	0,7
2007	10	36,8	0,2	2005	1	116,9	0,7
2002	1	46,5	0,3	2005	2	113,5	0,7
2002	6	57,5	0,3	2006	9	110,1	0,7
2002	7	56,4	0,3	2003	5	131,0	0,8
2002	9	48,8	0,3	2004	11	122,0	0,8
2003	3	44,8	0,3	2006	1	125,6	0,8
2003	4	46,3	0,3	2006	11	132,8	0,8
2004	7	48,4	0,3	2006	12	128,7	0,8
2007	5	56,2	0,3	2007	1	136,9	0,8
2007	6	42,1	0,3	2007	2	130,6	0,8
2007	11	57,8	0,3	2002	5	174,6	0,9
2003	6	62,1	0,4	2002	8	164,7	0,9
2003	11	78,9	0,4	2002	11	157,2	0,9
2004	5	68,3	0,4	2003	10	158,5	0,9
2004	9	75,4	0,4	2003	12	177,8	0,9
2005	3	62,8	0,4	2004	12	162,0	0,9
2005	8	69,1	0,4	2005	12	164,2	0,9
2005	10	69,9	0,4	2007	8	174,3	0,9
2006	4	60,8	0,4	2002	12	229,9	1
2006	5	67,6	0,4	2003	1	194,7	1
2007	4	75,3	0,4	2004	1	201,7	1
2007	9	67,2	0,4	2005	4	217,2	1
2007	12	80,5	0,4	2005	11	290,2	1
2003	9	88,3	0,5	2007	3	228,4	1

ANEXO 2. Descriptores morfológicos de la cuenca del río Mape (CAPV, España).

Área (Km ²)	26.1
Perímetro (Km)	25.7
Longitud máxima (Km)	6.9
Índice de compacidad	1.4
Índice alargamiento	1.1
Índice de forma	0.6
Pendiente media (%)	31.1
Pendiente máxima (%)	131.8
Rango de pendientes (%)	131.8

ANEXO 3. Descriptores morfológicos de la red de drenaje del río Mape (CAPV, España).

Orden de las corrientes	4
Longitud del cauce principal (Km)	6.3
Longitud de todos los caudales (Km)	35.3
Densidad de drenaje (Km/ Km ²)	1.4
Coefficiente de torrencialidad (#1/A)	1.0
Relación de bifurcación Orden 1	4.2
Relación de bifurcación Orden 2	3.0
Relación de bifurcación Orden 3	2.0
Pendiente media del cauce principal (%)	20.1
Pendiente máxima del cauce principal (%)	59.8

ANEXO 4. Descriptores de la regresión lineal entre los datos de las estaciones G063 – Muxika y 082 – Sondika, para los parámetros climáticos básicos. * * Alta similitud entre los datos. Los análisis de regresión se realizaron en SPSS Versión 15.1².

Parámetro	R ²	Ecuación de la recta	Datos analizados	P ajuste
Temperaturas (°C)				
máxima	0.947	$Y = 0.897X + 0.556$	2191	**
media	0.894	$Y = 0.918X - 0.775$	2159	**
mínima	0.889	$Y = 0.959X - 1.596$	2191	**
Precipitación (mm/mes)	0.791	$Y = 1.031X - 11.280$	71	**

² **SPSS Inc.** 2006. SPSS 15.0 para Windows.

ANEXO 5. Matriz de probabilidades de transición para los tipos de uso del suelo en la cuenca del río Mape (CAPV, España) entre 1991 y 2002.

Los encabezados marcados en gris indican coberturas de sistemas de explotación directa; en la diagonal y en negrilla la probabilidad de cada cobertura de mantener la extensión inicial; espacios en blanco indican que no hay transición entre coberturas; los ceros en gris indican que la transición es inferior a una hectárea (por lo tanto, no fue tomada en cuenta para las predicciones a 2013).

	A	BR	B	C	En	Eu	M	PF	Ro	Ru	S	TM
A	1											
BR		1		0				0	0			
B			0,34	0,31		0,02		0,32	0,02			
C		0	0,01	0,94	0			0,02	0,01	0,02	0	
En				0	0,99	0		0,01	0		0	
Eu			0	0,02	0	0,72		0,23	0,02			
M				0,12	0,24	0	0,07	0,31	0,26			
PF		0	0	0,02	0	0,09	0	0,88	0,01	0		
Ro			0	0,01	0	0,07	0	0,14	0,78	0		
Ru		0		0					0	1		
S				0	0,22			0	0		0,78	
TM												1

A: Arenales, BR: Bosque ripario, B: Brezales, C: Cultivos, En: Encinares, Eu: Eucalipto, M: Matorrales, PF: Plantaciones forestales, Ro: Robledales, Ru: Vegetación ruderal S: Vegetación dominada por Sauce y TM: Vegetación típica de marisma.

ANEXO 6. Cocientes calculados a partir del balance hídrico aplicado a la zona de barrancos de la cuenca del río Mape (CAPV, España) para 2002, 1991 y los escenarios inercial y alternativo de 2013.

		Valores mm						
		1287,6	1071,4	194,1	58,9	987,4	216,2	275,0
2002		Gprec	Eprec	ETP ₀	ETP _R	Esc	Int	IV
	Gprec	1	0,832	0,151	0,046	0,767	0,168	0,214
	Eprec	1,202	1	0,181	0,055	0,922	0,202	0,257
	ETP ₀	6,634	5,52	1	0,303	5,088	1,114	1,417
	ETP _R	21,878	18,205	3,298	1	16,778	3,673	4,673
	Esc	1,304	1,085	0,197	0,06	1	0,219	0,279
	Int	5,956	4,956	0,898	0,272	4,568	1	1,272
	IV	4,682	3,896	0,706	0,214	3,59	0,786	1

		Valores mm						
		1407,2	1166,9	107,2	68,0	1098,8	240,3	308,3
1991		Gprec	Eprec	ETP ₀	ETP _R	Esc	Int	IV
	Gprec	1	0,829	0,076	0,048	0,781	0,171	0,219
	Eprec	1,206	1	0,092	0,058	0,942	0,206	0,264
	ETP ₀	13,128	10,887	1	0,635	10,252	2,242	2,876
	ETP _R	20,685	17,153	1,576	1	16,153	3,532	4,532
	Esc	1,281	1,062	0,098	0,062	1	0,219	0,281
	Int	5,856	4,856	0,446	0,283	4,573	1	1,283
	IV	4,564	3,785	0,348	0,221	3,564	0,779	1

		Valores mm						
		1094,5	914,5	129,2	52,9	861,6	180,0	232,8
2013 inercial		Gprec	Eprec	ETP ₀	ETP _R	Esc	Int	IV
	Gprec	1	0,836	0,118	0,048	0,787	0,164	0,213
	Eprec	1,197	1	0,141	0,058	0,942	0,197	0,255
	ETP ₀	8,473	7,080	1	0,409	6,67	1,393	1,803
	ETP _R	20,695	17,293	2,442	1	16,293	3,403	4,403
	Esc	1,27	1,061	0,15	0,061	1	0,209	0,27
	Int	6,082	5,082	0,718	0,294	4,788	1	1,294
	IV	4,7	3,928	0,555	0,227	3,700	0,773	1

		Valores mm						
		1094,5	900,1	129,2	52,3	847,8	194,3	246,6
2013 alternativo		Gprec	Eprec	ETP ₀	ETP _R	Esc	Int	IV
	Gprec	1	0,822	0,118	0,048	0,775	0,178	0,225
	Eprec	1,216	1	0,144	0,058	0,942	0,216	0,274
	ETP ₀	8,473	6,969	1	0,405	6,564	1,504	1,910
	ETP _R	20,919	17,205	2,469	1	16,205	3,714	4,714
	Esc	1,291	1,062	0,152	0,062	1	0,229	0,291
	Int	5,632	4,632	0,665	0,269	4,363	1	1,269
	IV	4,437	3,649	0,524	0,212	3,437	0,788	1

ANEXO 7. Matriz de coeficientes de similaridad para las comparaciones del balance hídrico en la zona de barrancos de la cuenca del río Mape (CAPV, España) entre las diferentes situaciones descritas (2002, 1991, 2013 inercial y 2013 alternativo). Sólo se presentan las comparaciones para aquellos cocientes cuyo valor oscila entre 0 y 1. En rojo los valores inferiores a 0.7, en azul los valores inferiores a 0.8 y superiores a 0.7.

**Comparación 2002 – 1991
(Cambio en el régimen climático)**

	Eprec	ETP ₀	ETP _R	Esc	Int	IV
Gprec	0,997	0,925	0,998	0,986	0,997	0,995
Eprec		0,911	0,997	0,98	0,996	0,993
ETP ₀		1	0,668			
ETP _R			1			
Esc		0,901	0,998	1	1	0,998
Int		0,548	0,989		1	
IV		0,642	0,993		0,993	1

**Comparación 2002 – 2013 inercial
(Calentamiento global)**

	Eprec	ETP ₀	ETP _R	Esc	Int	IV
Gprec	0,996	0,967	0,998	0,980	0,996	0,999
Eprec		0,960	0,997	0,980	0,995	0,998
ETP ₀		1,000	0,894			
ETP _R			1,000			
Esc		0,953	0,999	1,000	0,990	0,991
Int		0,820	0,978		1,000	
IV		0,849	0,987		0,987	1,000

**Comparación 2002 – 2013 alternativo
(Calentamiento global, cambio de uso del suelo)**

	Eprec	ETP ₀	ETP _R	Esc	Int	IV
Gprec	0,990	0,967	0,998	0,992	0,990	0,989
Eprec		0,963	0,997	0,980	0,986	0,983
ETP ₀		1,000	0,898			
ETP _R			1,000			
Esc		0,955	0,998	1,000	0,990	0,988
Int		0,767	0,997		1,000	
IV		0,818	0,998		0,998	1,000

Matriz de coeficientes de similaridad para las comparaciones del balance hídrico en la zona de barrancos de la cuenca del río Mape (CAPV, España) entre las diferentes situaciones descritas (2002, 1991, 2013 inercial y 2013 alternativo). Sólo se presentan las comparaciones para aquellos cocientes cuyo valor oscila entre 0 y 1. En rojo los valores inferiores a 0.7, en azul los valores inferiores a 0.8 y superiores a 0.7. (Continuación).

Comparación 1991 – 2013 inercial
(Cambio en el régimen climático, calentamiento global)

	Eprec	ETP ₀	ETP _R	Esc	Int	IV
Gprec	0,993	0,958	1,000	0,994	0,993	0,994
Eprec		0,951	1,000	1,000	0,991	0,991
ETP ₀			0,774			
ETP _R				1,000		
Esc		0,948	0,999	1,000	0,990	0,989
Int		0,728	0,989		1,000	
IV		0,793	0,994		0,994	1,000

Comparación 2013 inercial – 2013 alternativo
(cambio de uso del suelo)

	Eprec	ETP ₀	ETP _R	Esc	Int	IV
Gprec	0,986	1,000	1,000	0,988	0,986	0,988
Eprec		0,997	1,000	1,000	0,981	0,981
ETP ₀			0,996			
ETP _R				1,000		
Esc		0,998	0,999	1,000	0,980	0,979
Int		0,947	0,975		1,000	
IV		0,969	0,985		0,985	1,000

Comparación 1991 – 2013 alternativo
(Cambio en el régimen climático, calentamiento global y cambio de uso del suelo)

	Eprec	ETP ₀	ETP _R	Esc	Int	IV
Gprec	0,993	0,958	1,000	0,994	0,993	0,994
Eprec		0,948	1,000	1,000	0,990	0,990
ETP ₀			0,770			
ETP _R						
Esc		0,946	1,000		0,990	0,990
Int		0,781	0,986			
IV		0,824	0,991		0,991	