

Gestión de riesgos y adaptación al cambio climático a nivel municipal: *Vulnerabilidad hídrica*

Lurraldearen urrakortasun hidrikoa
La vulnerabilidad hídrica del territorio

Iñaki Antigüedad
EHUko Geologia Saila



EUDELeke ekitaldi-aretoa
Ertzilla kalea 13, Bilbao



2025eko azaroaren 11 eta 12a



ZIENTZIA
ETA TEKNOLOGIA
FAKULTATEA
FACULTAD
DE CIENCIA
Y TECNOLOGÍA

50 URTE
AÑOS
1968 - 2018
Biba Zientzia!
Ciencia Viva





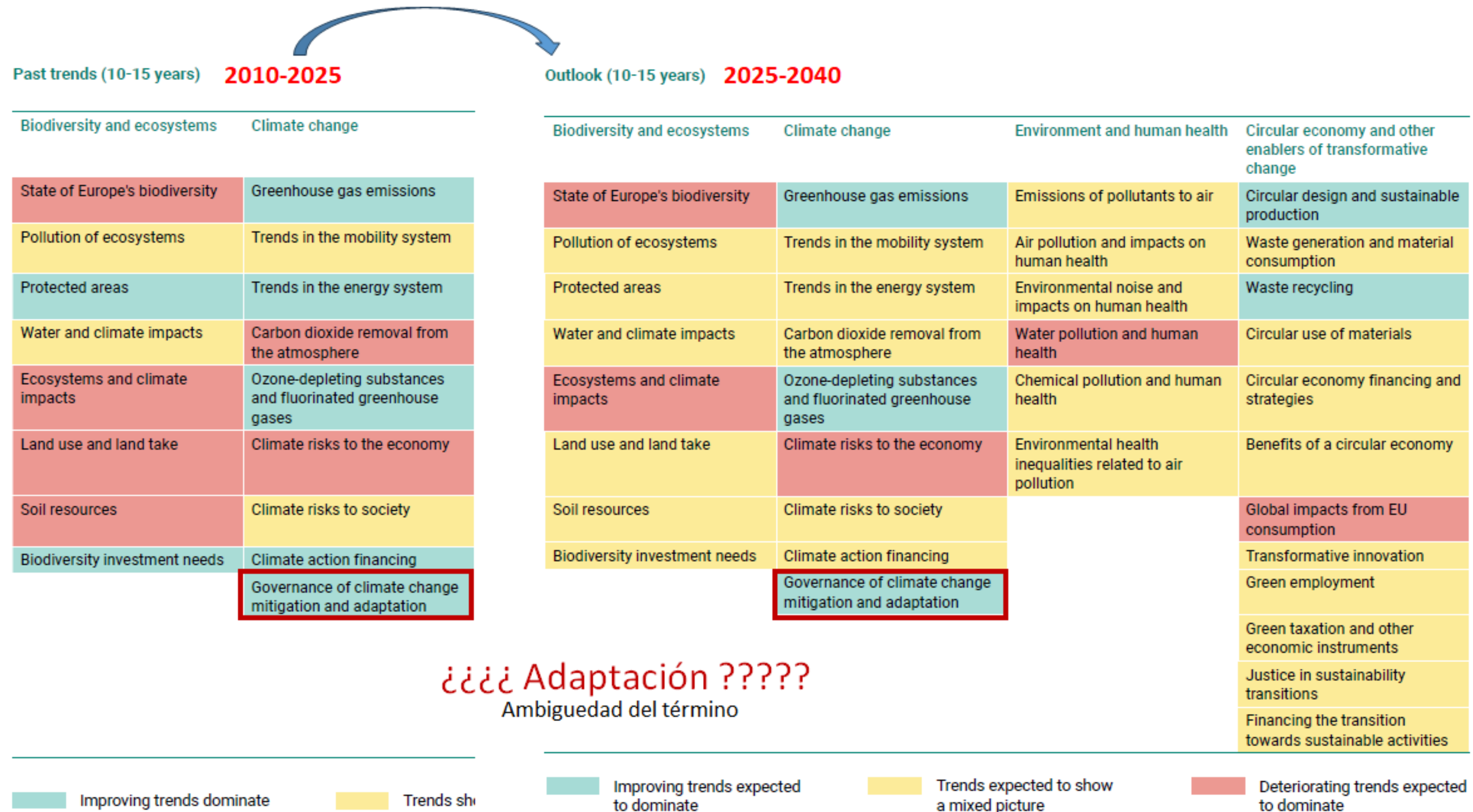
Past trends (10-15 years) 2010-2025

Biodiversity and ecosystems	Climate change	Environment and human health	Circular economy and other enablers of transformative change
State of Europe's biodiversity	Greenhouse gas emissions	Emissions of pollutants to air	Circular design and sustainable production
Pollution of ecosystems	Trends in the mobility system	Air pollution and impacts on human health	Waste generation and material consumption
Protected areas	Trends in the energy system	Environmental noise and impacts on human health	Waste recycling
Water and climate impacts	Carbon dioxide removal from the atmosphere	Water pollution and human health	Circular use of materials
Ecosystems and climate impacts	Ozone-depleting substances and fluorinated greenhouse gases	Chemical pollution and human health	Circular economy financing and strategies
Land use and land take	Climate risks to the economy	Environmental health inequalities related to air pollution	Benefits of a circular economy
Soil resources	Climate risks to society		Global impacts from EU consumption
Biodiversity investment needs	Climate action financing		Transformative innovation
	Governance of climate change mitigation and adaptation		Green employment
			Green taxation and other economic instruments
			Justice in sustainability transitions
			Financing the transition towards sustainable activities

Improving trends dominate

Trends show mixed picture

Deteriorating trends dominate



MITIGACION: hacer que los efectos del cambio climático sean menos graves evitando o reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera. Es una intervención humana que **reduce las fuentes de emisiones** de GEI o **mejora los sumideros**.

- Se actúa sobre el **CARBONO** (políticas energéticas, sobre todo)
- Escala **local y global**

La Atmósfera nos iguala

ADAPTACION: prever los efectos perjudiciales del cambio climático y **adoptar las medidas apropiadas para prevenir o minimizar los daños** que puedan causar, o **aprovechar las oportunidades** que pueden surgir. El proceso de ajuste a los efectos actuales y futuros del cambio climático.

- El eje de la adaptación debería ser el **AGUA** (políticas hidrológicas, sobre todo)
- Escala **local** (la **cuenca fluvial** como unidad **territorial** de la adaptación)

El Territorio nos diferencia



European
Environment
Agency

La **ADAPTACION** no es sólo *necesidad* (mucho menos *resignación*); es una **oportunidad de transformación socio-territorial**, hacia la **sostenibilidad** de los territorios ("*adaptación progresiva*" y "*adaptación transformacional*"). Complejidad y **robusta flexibilidad**.



1. EL CAMBIO CLIMÁTICO EN ESPAÑA: IMPACTOS Y RIESGOS

1.1. UNA REALIDAD INEQUÍVOCA

Disminución de los **caudales medios** de los ríos

1.2. CAMBIOS PROYECTADOS

Disminución moderada de las **precipitaciones**
Aumento de la **evapotranspiración potencial** en toda España
Disminución de los **caudales medios** de los ríos
Disminución de la **recarga de los acuíferos**
Incremento de las **sequías**
Aumento de episodios de lluvias torrenciales e **inundaciones**

1.3. IMPACTOS Y RIESGOS DERIVADOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Disminución de los recursos hídricos (incidencia en cantidad y calidad)
Deterioro de los ecosistemas (pérdida de diversidad y resiliencia de los servicios ecosistémicos)
Aumento del peligro de incendios (incremento de la sequedad del suelo o las temperaturas elevadas)

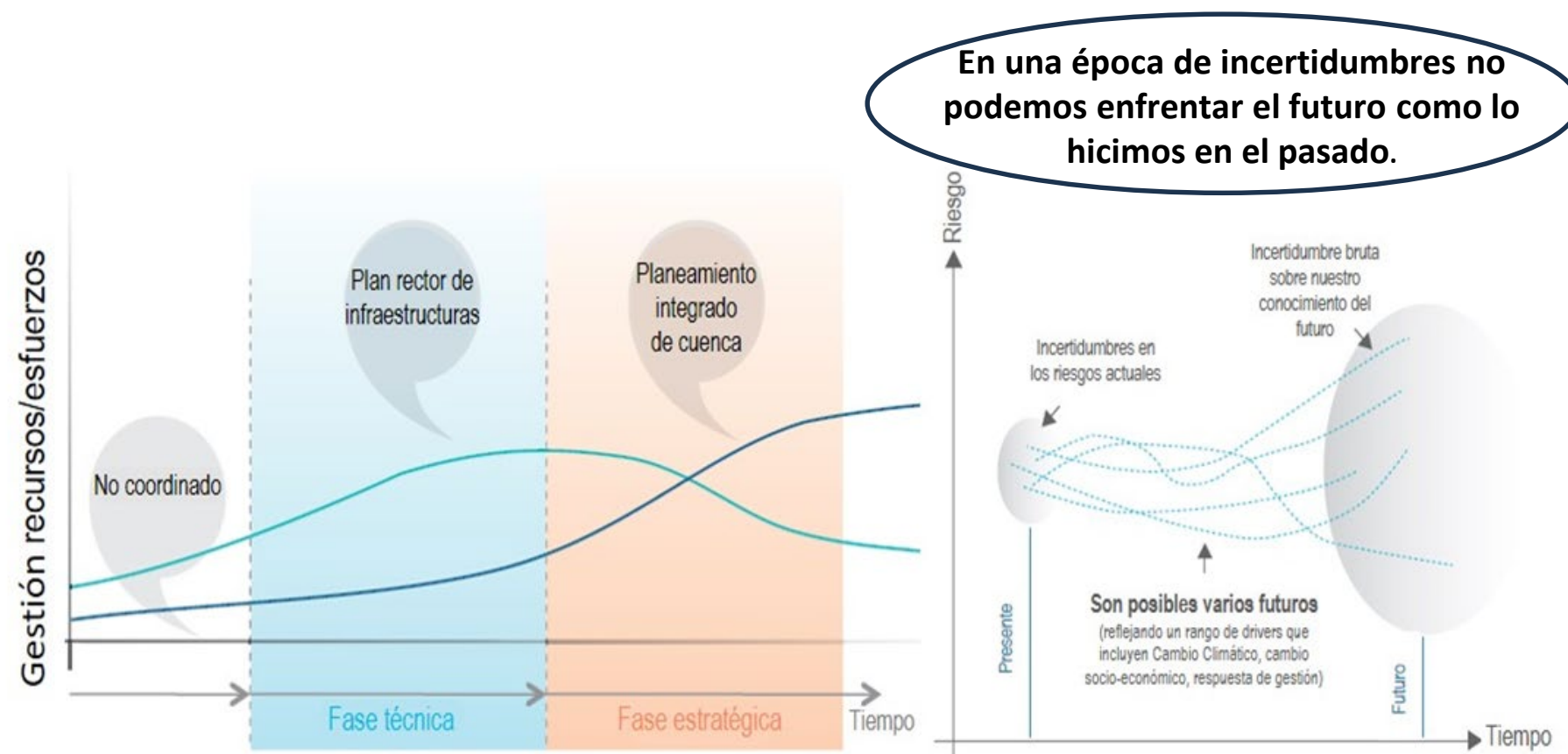
Variabilidad hidrológica
espacial, (territorial) y
temporal
(estacionalidad)

RETO: Adaptarse hoy al incierto clima(s) de mañana

... desde el Territorio (transición justa)

RETO: Superar la infravaloración del Territorio (*continuum dinámico*) en la Adaptación.

El **TERRITORIO** no es un mero receptor de los impactos del cambio climático. Lo que hacemos en el Territorio puede mitigar o agravar/añadir impactos. (Territorio >>> servicios ecosistémicos) (**SUELO:** usos, gestión, alteración)

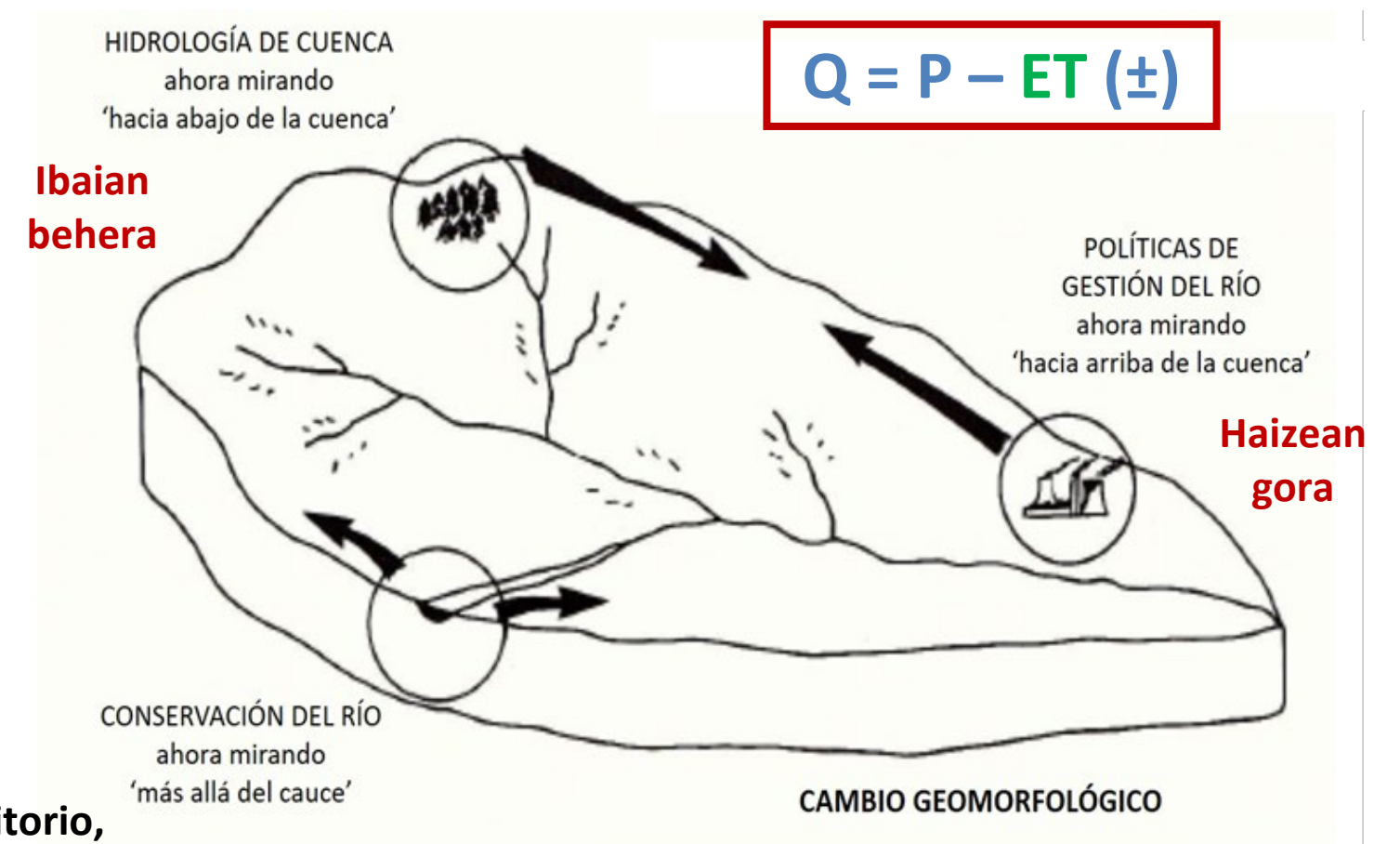


(Izquierda) Fases en la evolución temporal de la gestión de cuencas. (Derecha) Aumento de la incertidumbre en el tiempo (Pegram et al, 2013. modificado).

La planificación hidrológica debe considerar la funcionalidad hidrológica de las diferentes partes del territorio, también la territorial. La planificación territorial debe ser parte de la planificación hidrológica, y tanto una como la otra deben ser la base de la *adaptación* desde el territorio.

El Suelo es el término más olvidado de la planificación hidrológica-territorial.
La Evapotranspiración es el término más olvidado del balance hídrico.

El objetivo es la adaptación del Territorio desde su funcionalidad hidrológica, priorizando zonas de la cuenca que proporcionan servicios hidrológicos (provisión de agua, en cantidad y calidad, en espacio y tiempo)
➔ Espacios de Prioridad Hidrológica (servicios hidro-ecosistémicos).



Newson (1992)

Cuenca fluvial: unidad básica de gestión.
Funcionalidad hidrológica del territorio

Visión CUENCA, mirar la cuenca desde el río
(una política hidrológica más que hidráulica)

RETO: Superar la infravaloración del Territorio (continuum dinámico) en la Adaptación.

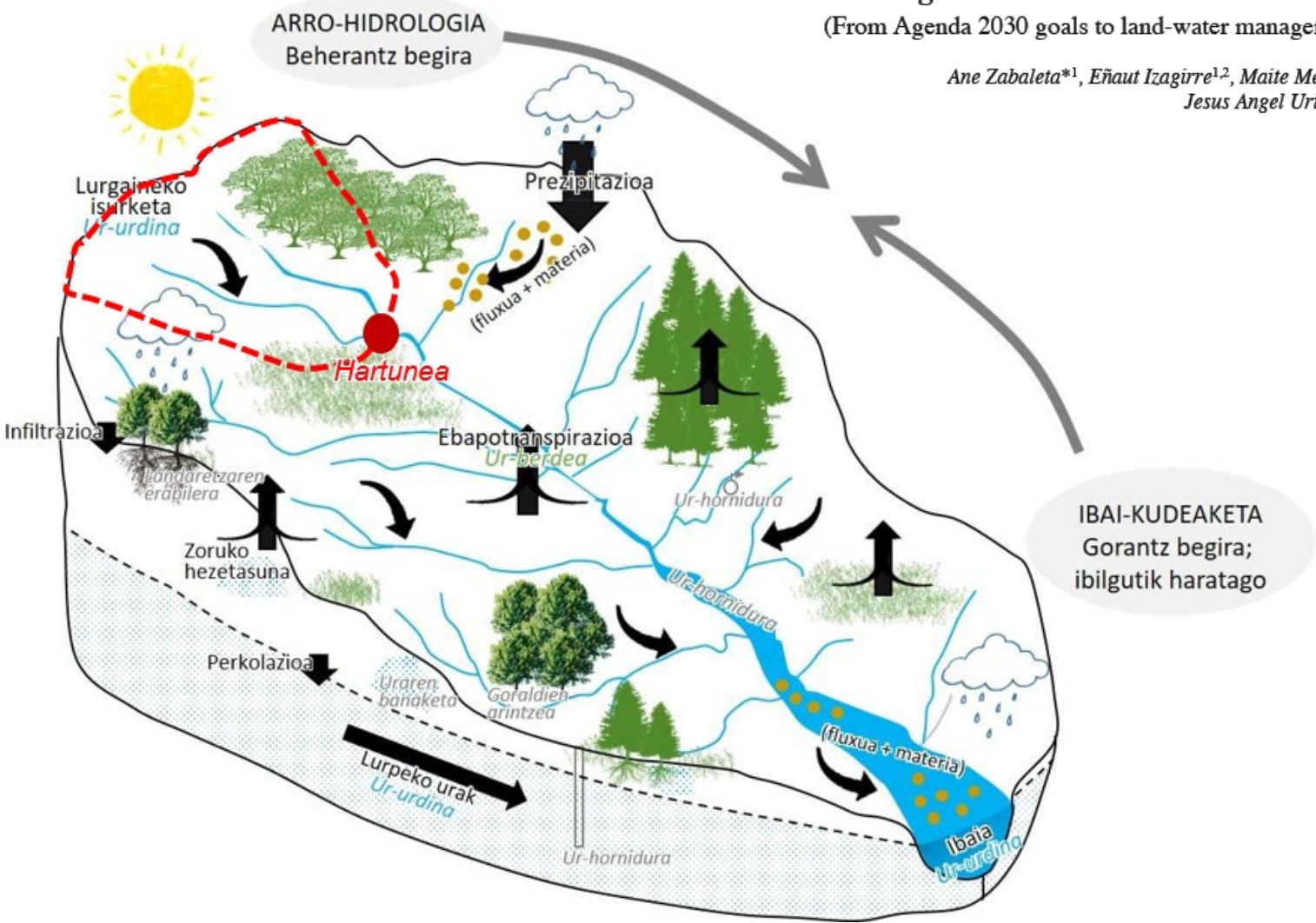
$Q = P - ET (\pm)$

Ekala, ale berezia 2021, 229-246
https://doi.org/10.1387/ekala.22113

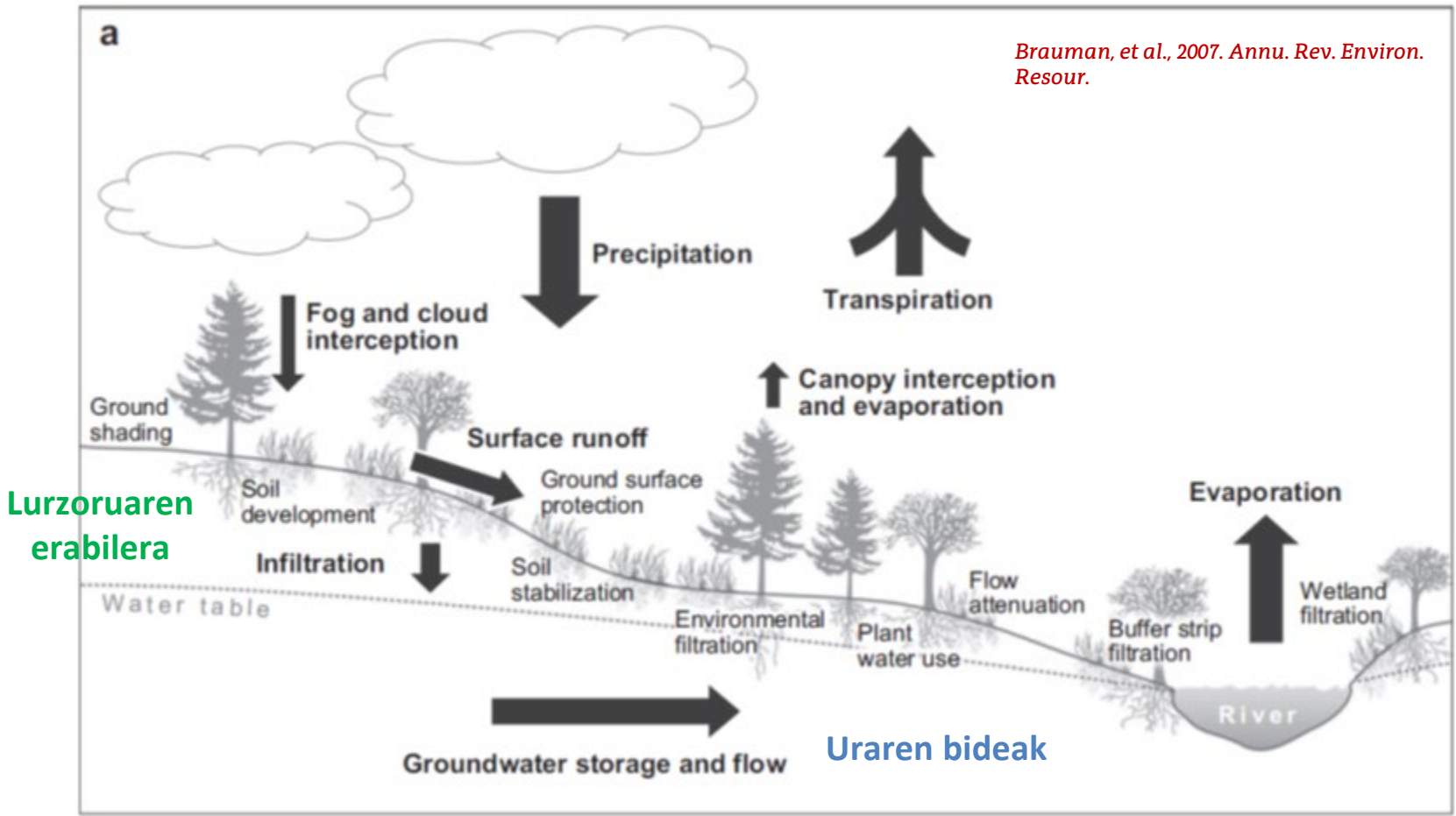
ekaia
ZENTZIA eta TEKNOLOGIA
ALDIZKARIA
ISSN 0214-9001 – eISSN 2444-3255

2030 Agendako helburuetatik lurra-ura hartzera
(From Agenda 2030 goals to land-water management)

Ane Zabaleta*¹, Eñaut Izagirre^{1,2}, Maite Meaurio³, Maria Valiente¹,
Jesus Angel Uriarte¹, Iñaki Antiguada¹



Futuras Precip y Temp



Brauman, et al., 2007. Annu. Rev. Environ. Resour.

La asignación de beneficios específicos a los ecosistemas de un mismo territorio no es tarea fácil, ya que aquéllos pueden solaparse o, incluso, compensarse (**trade-offs**; por ejemplo, la fijación de carbono reduce la disponibilidad de agua), por lo que habría que **establecer prioridades de beneficios para los diferentes espacios del territorio**, lo que nos llevaría a un **mosaico de cubiertas-usos en la gestión adaptativa del territorio (territorialización de la Adaptación)**.

Brauman, et al., 2007. The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services.
doi: 10.1146/annurev.energy.32.031306.102758

Services Hidrológicos

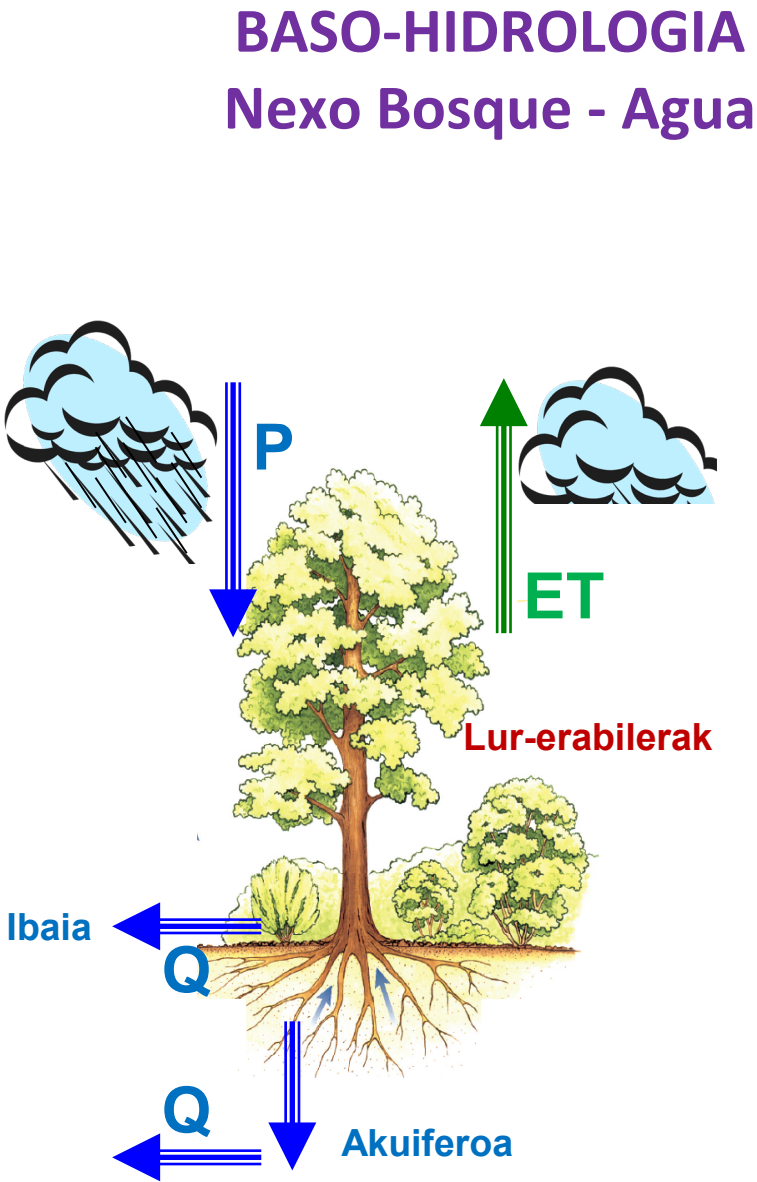
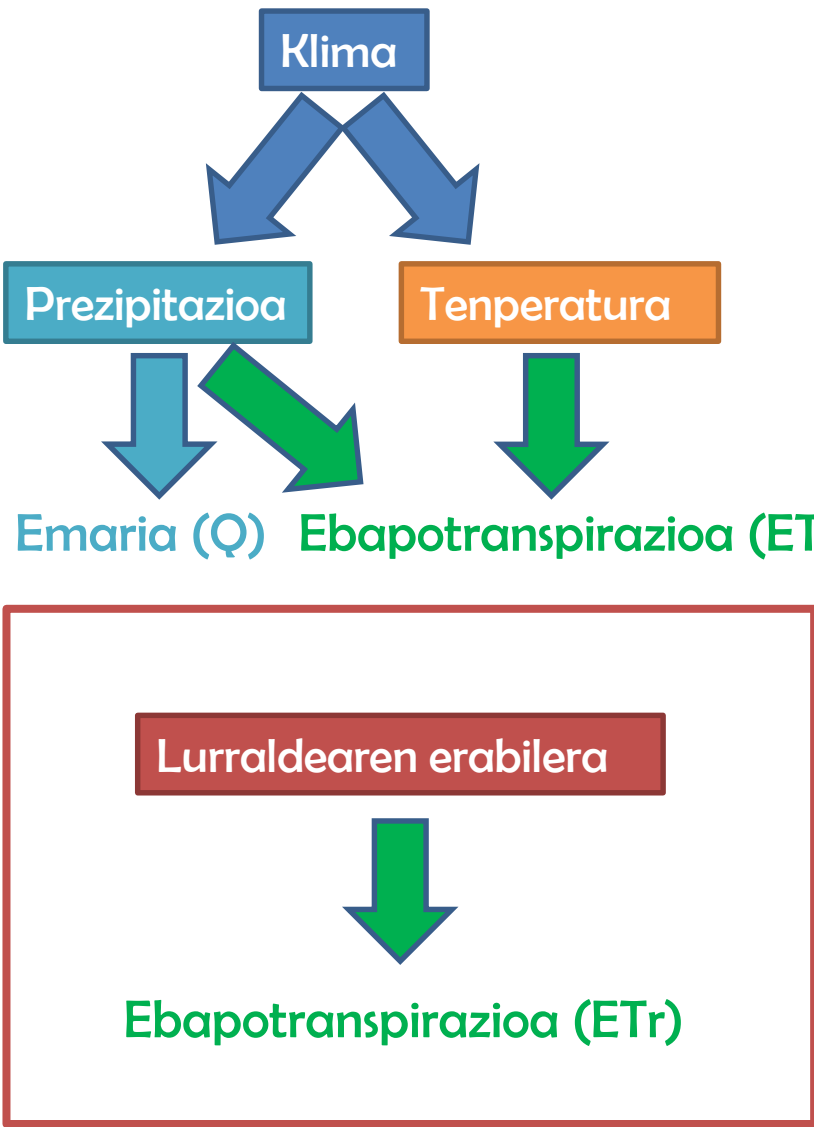
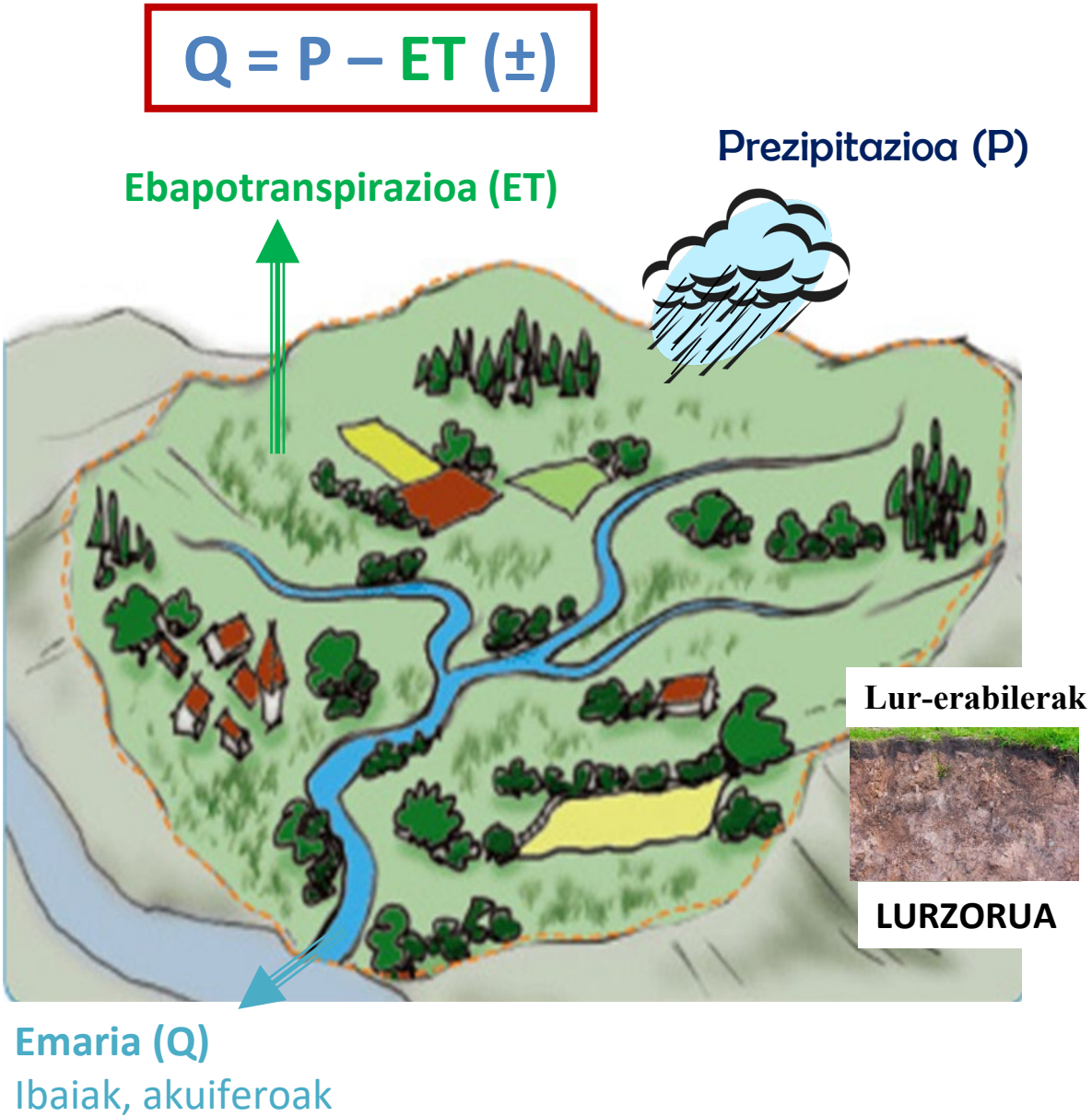
Caudales futuros (Q)



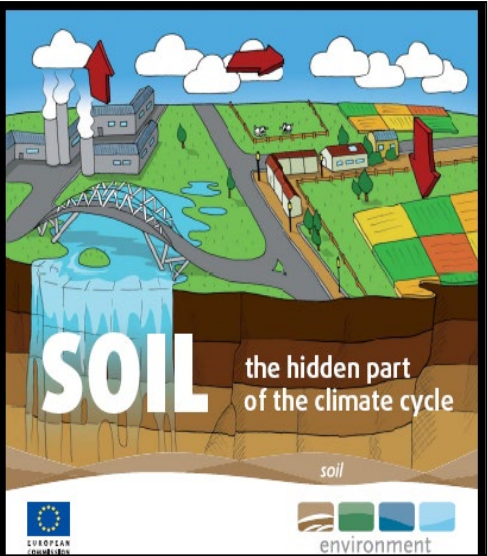
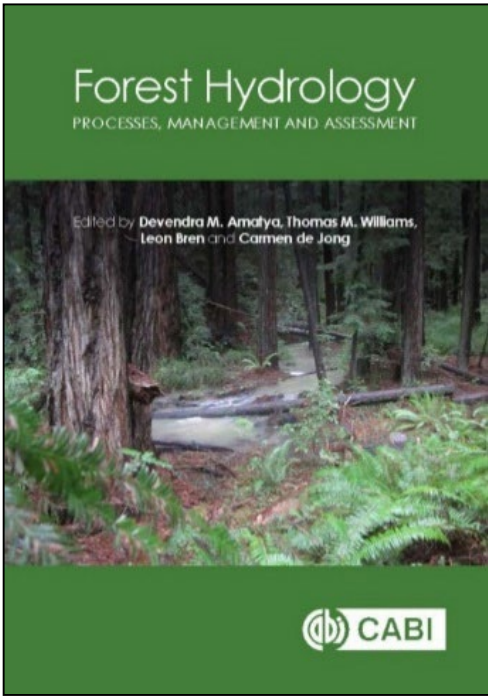
- Kantitatean
- Kalitatean
- Espazioan
- Denboran

RETO: Superar la infravaloración del Territorio (continuum dinámico) en la Adaptación.

El **TERRITORIO** no es un mero receptor de los impactos del cambio climático. Lo que hacemos en el Territorio puede mitigar o agravar/añadir impactos. (Territorio >>> servicios ecosistémicos) (**SUELO:** usos, gestión, alteración)



En teoría al menos, **el objetivo principal de la planificación hidrológica debería ser la planificación de las precipitaciones (P)** y no tanto la de los caudales circulantes (Q), superficiales y/o subterráneos. Ahora bien, es claro que el régimen espacio-temporal de las precipitaciones (lluvia, nieve) se escapa del ámbito de la planificación, ya que se impone a la misma. Por eso cobra especial importancia en la planificación la consideración del tercer término esencial en el balance hídrico de la cuenca: la **evapotranspiración (ET)**.... **Tiene sentido que la planificación hidrológica se interese también por la planificación de la ET** mediante la consideración de la propia planificación territorial (cubierta y usos del suelo).

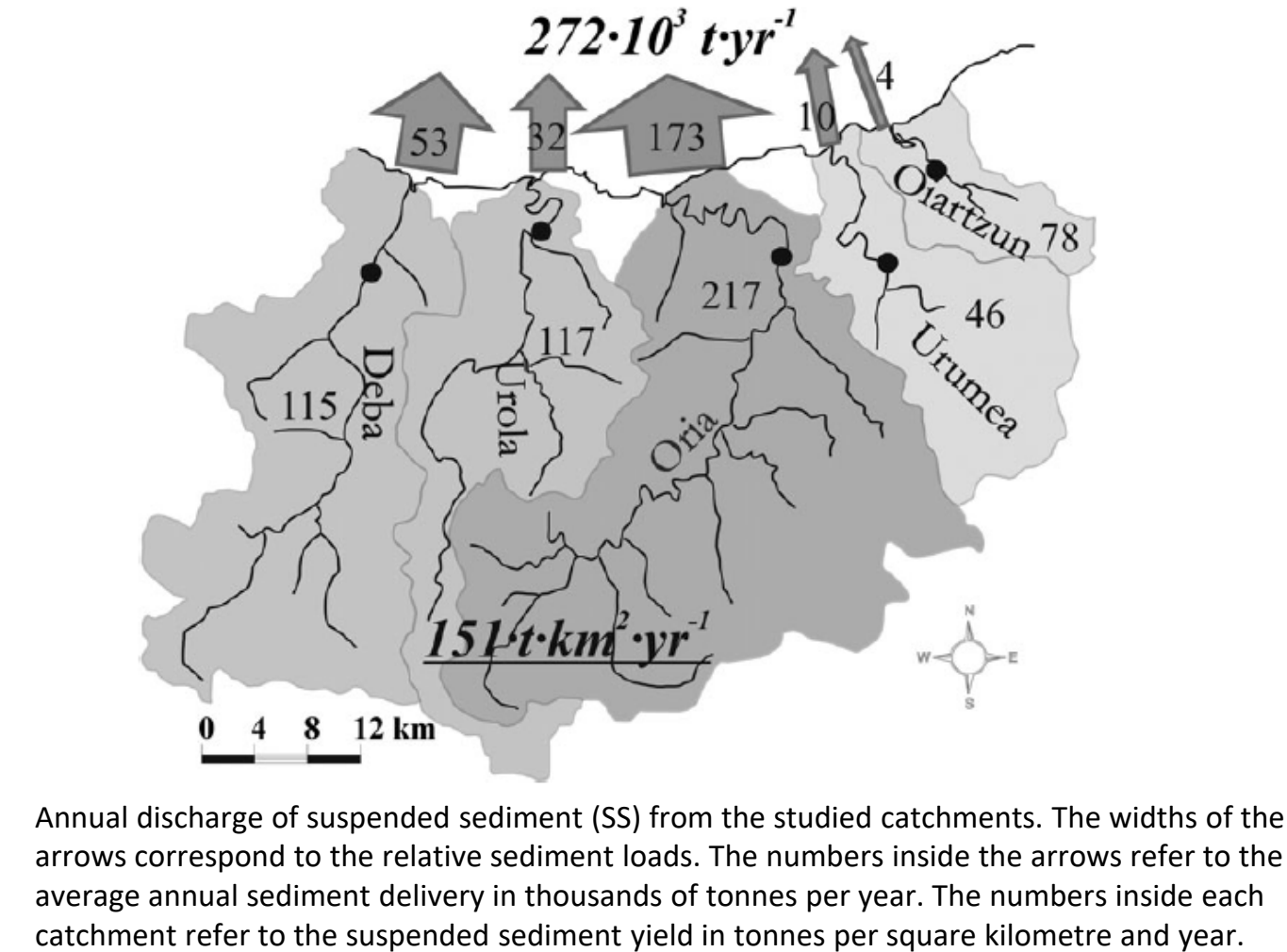


Suspended sediment delivery from small catchments to the Bay of Biscay. What are the controlling factors?

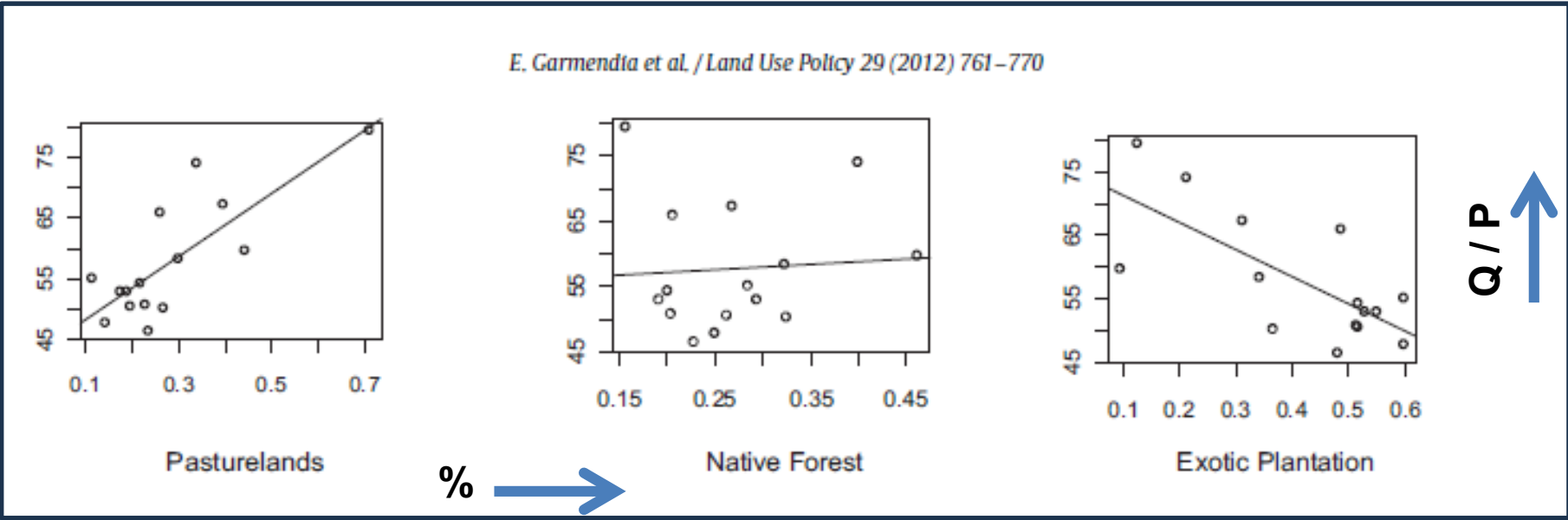
Ane Zabaleta,^{1*} Iñaki Antigüedad,¹ Irantzu Barrio² and Jean-Luc Probst³

Period 2006/07-2013/14

Catchment		Deba	Urola	Oria	Urumea	Oiartzun	
Parameter							
Gauging st.		Altzola	Aizarnazabal	Lasarte	Ereñozu	Oiartzun	
Mean annual precipitation	P (mm)	1358	1453	1497	2071	1942	Hydro-climatic variables
Mean annual runoff	R (mm)	709	794	858	1251	1303	
Mean annual runoff-coeff	Kr (%)	52	55	57	60	67	
Area	A (km ²)	464.25	269.77	796.5	218.42	56.6	Geomorphic variables
Maximum elevation	Elev _{max} (m)	986	829	647	950	828	
Slope	S (%)	44	47	44	56	42	
Exotic plantation	LW (%)	38.53	36.67	25.22	25.93	26.34	Land use
Native forest	LF (%)	26.1	31.48	34.46	50.46	37.05	
Pasture	LP (%)	14.95	21.11	30.34	15.74	20.98	
Others	LU (%)	10.1	10.74	5.74	0	15.62	
Soil depth	Z (m)	1.5	1.2	1.1	0.9	0.9	
Low erodibility	Erodibility of lithology	LE (%)	8	6	1	4	Lithology
Medium erodibility		ME (%)	61	59	66	96	
High erodibility		HE (%)	31	35	33	0	



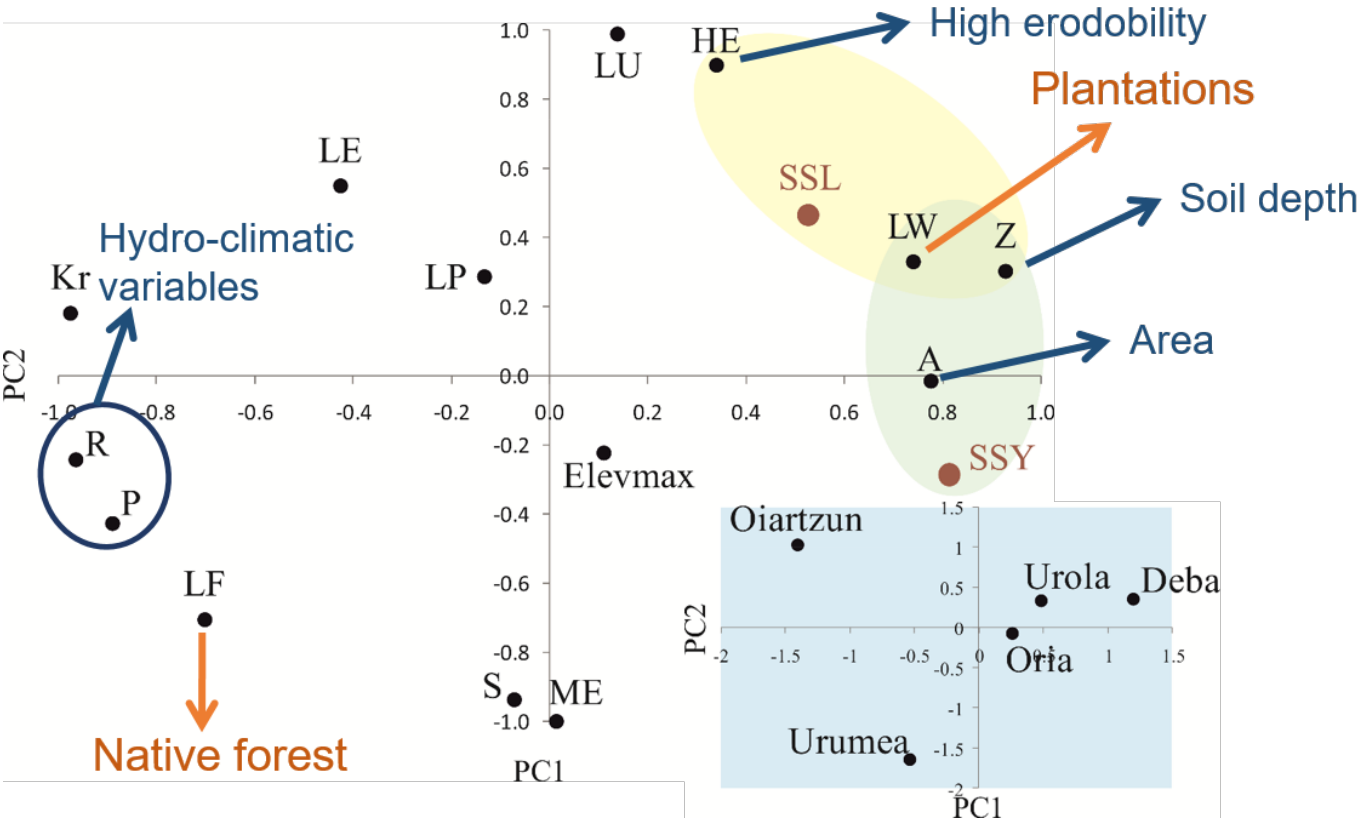
Annual discharge of suspended sediment (SS) from the studied catchments. The widths of the arrows correspond to the relative sediment loads. The numbers inside the arrows refer to the average annual sediment delivery in thousands of tonnes per year. The numbers inside each catchment refer to the suspended sediment yield in tonnes per square kilometre and year.



Land cover effects on hydrologic services under a precipitation gradient

Hydrol. Earth Syst. Sci., 22, 5227–5241, 2018
<https://doi.org/10.5194/hess-22-5227-2018>

Ane Zabaleta¹, Eneko Garmendia^{2,3}, Petr Mariel⁴, Ibon Tamayo⁵, and Iñaki Antigüedad¹



Los bosques son grandes consumidores de agua (ET). El efecto que ello puede originar en el balance hídrico de la cuenca depende de las condiciones limitantes en cada caso. Así, en cuencas donde *la limitación a la ET es energética*, es decir, la precipitación (P) es mayor que la ETP, la ETR está muy cerca de la ETP (a la escala anual dependería de la evolución estacional de P y ETP); sería el caso de zonas húmedas. Sin embargo, en climas secos, donde *la limitación a la ET es la disponibilidad de agua*, la ETR puede ser una parte muy importante de la precipitación anual, incidiendo negativamente en los caudales (agua azul). Obviamente, considerando el tipo, edad, estado y densidad de la vegetación.

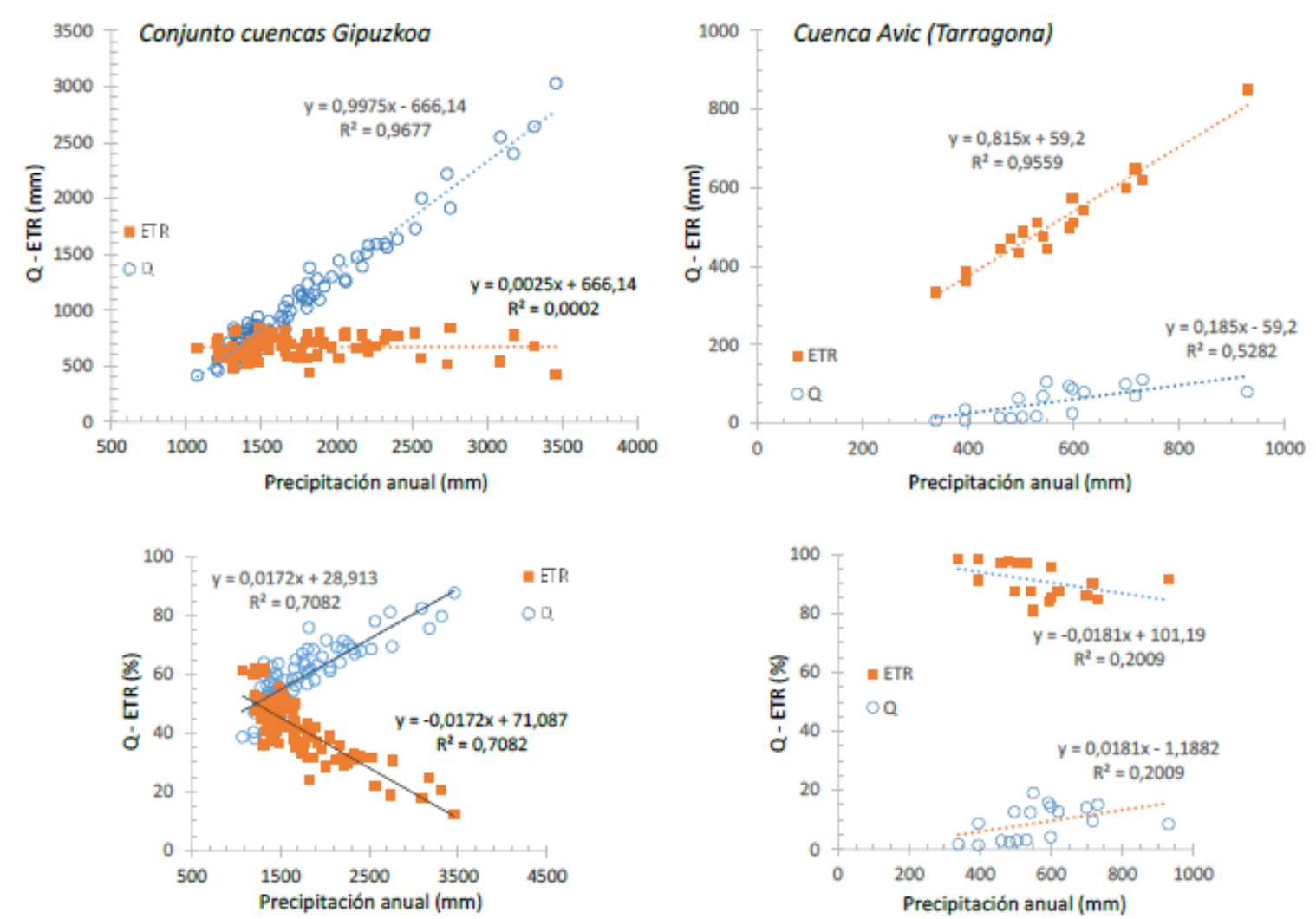
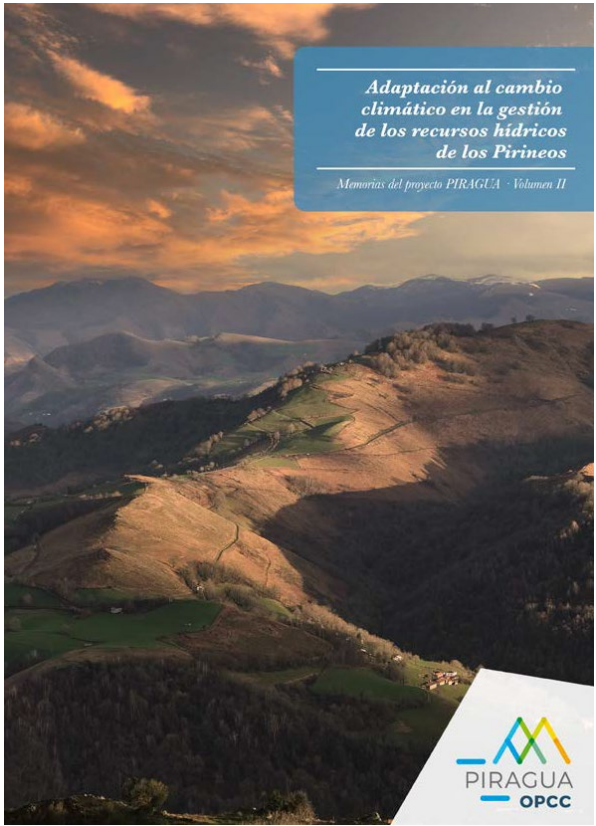
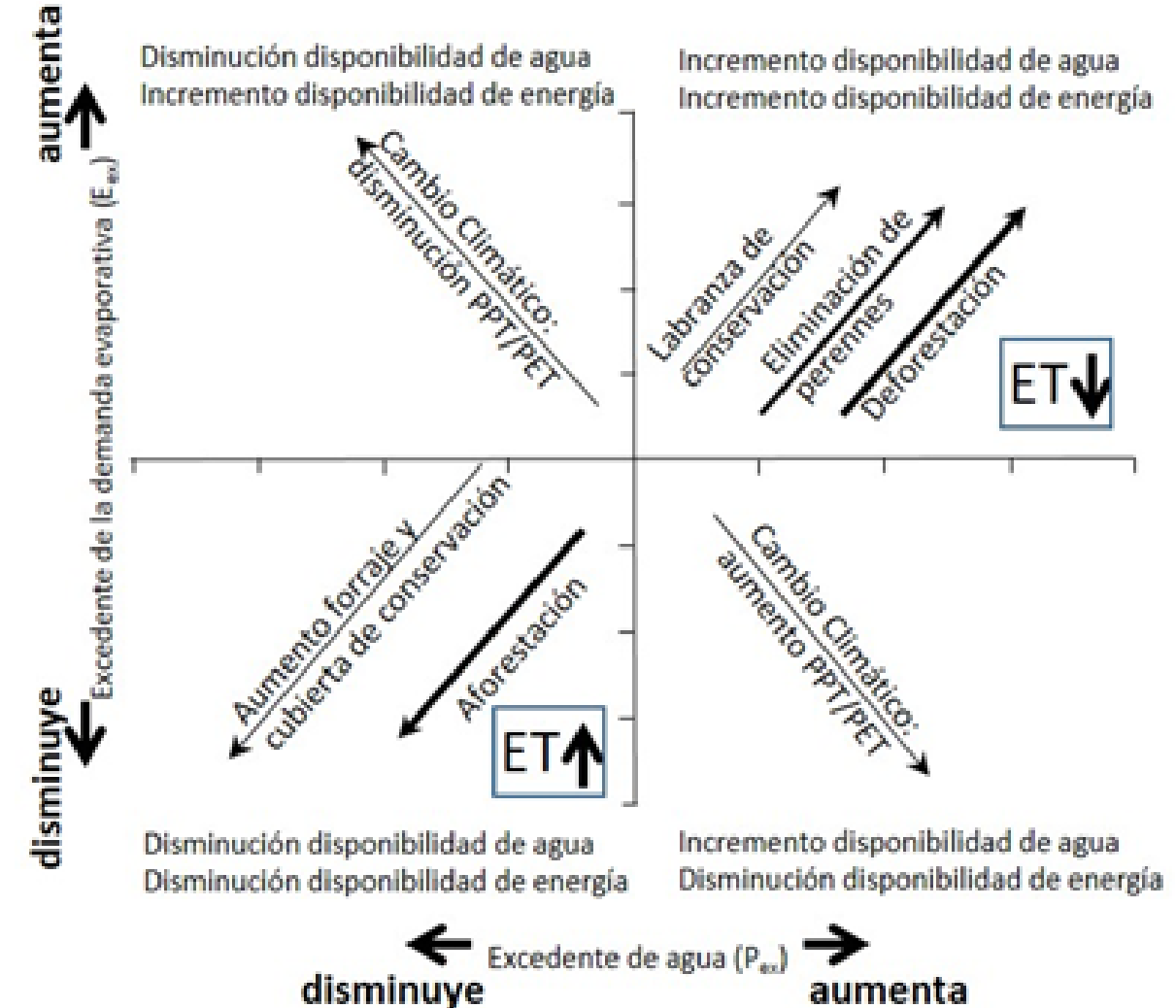


Figura 2.- Relación (mm, %) entre valores anuales de precipitación (P), evapotranspiración real (ETR) y caudal (Q) en (derecha) la cuenca de Avic (modificado de Bellot et al., 2004) y (izquierda) las cuencas de Gipuzkoa.

De lo que se trata, desde el punto de vista de la Adaptación, es de **compensar la posible disminución climática de la disponibilidad en agua en espacios hidrológicamente sensibles del territorio mediante medidas de incidencia territorial que tienen que pasar, sin duda, por cambios en los usos y gestión de la vegetación, tendentes a reducir la ETR**. Si no se tiene en cuenta esto se podría llegar a una gestión del territorio, ajena a lo adaptativo, cuyas consecuencias se sumen a las del cambio climático propiciando disminuciones inaceptables a futuro de la disponibilidad en agua en esos espacios.



Los cambios en el **clima** afectan, sobre todo, a la **Precipitación** (PPT) y a la **Evapotranspiración potencial** (PET), mientras que los cambios en los **usos del suelo** impactan directamente sobre la **Evapotranspiración real** (ET, precipitación - caudal, a escala anual). Así, la relación (PPT-ET)/PPT es indicativa de la eficiencia en el uso del agua disponible (*excess water*, P_{ex}, en la figura) por parte del sistema, y la relación (PET-ET)/PET lo es de la eficiencia en el uso de la energía (*excess evaporative demand*, E_{ex}).

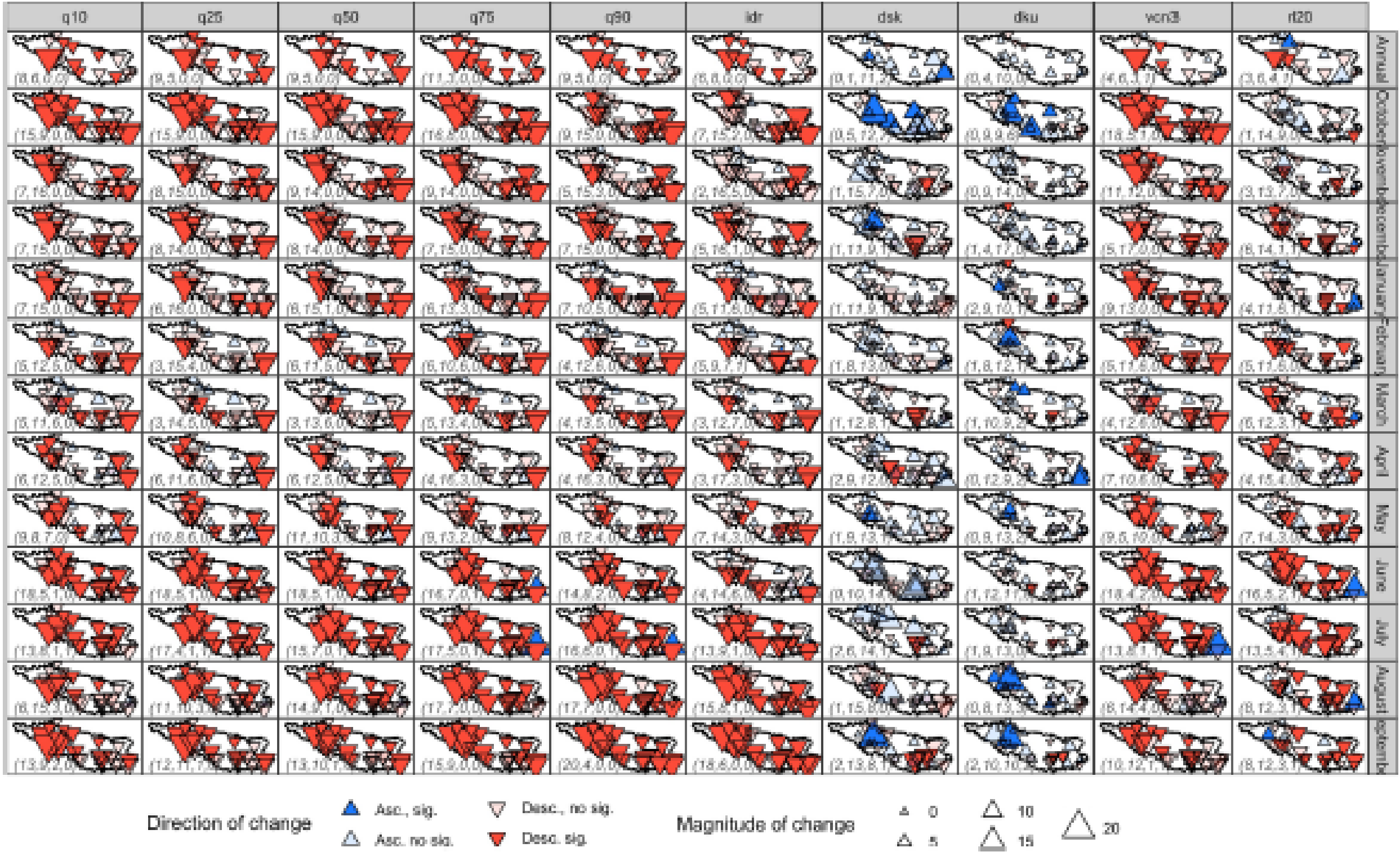
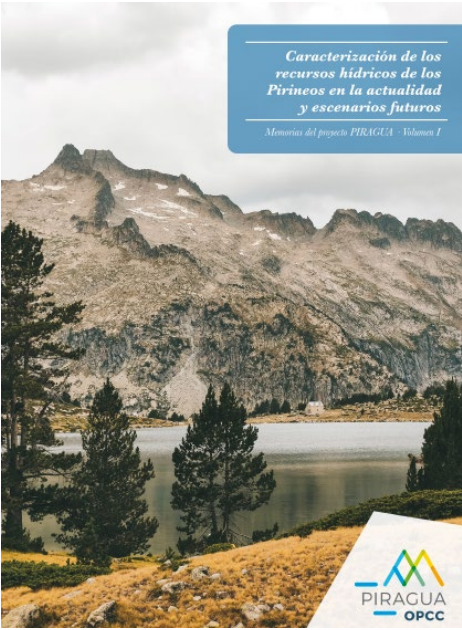
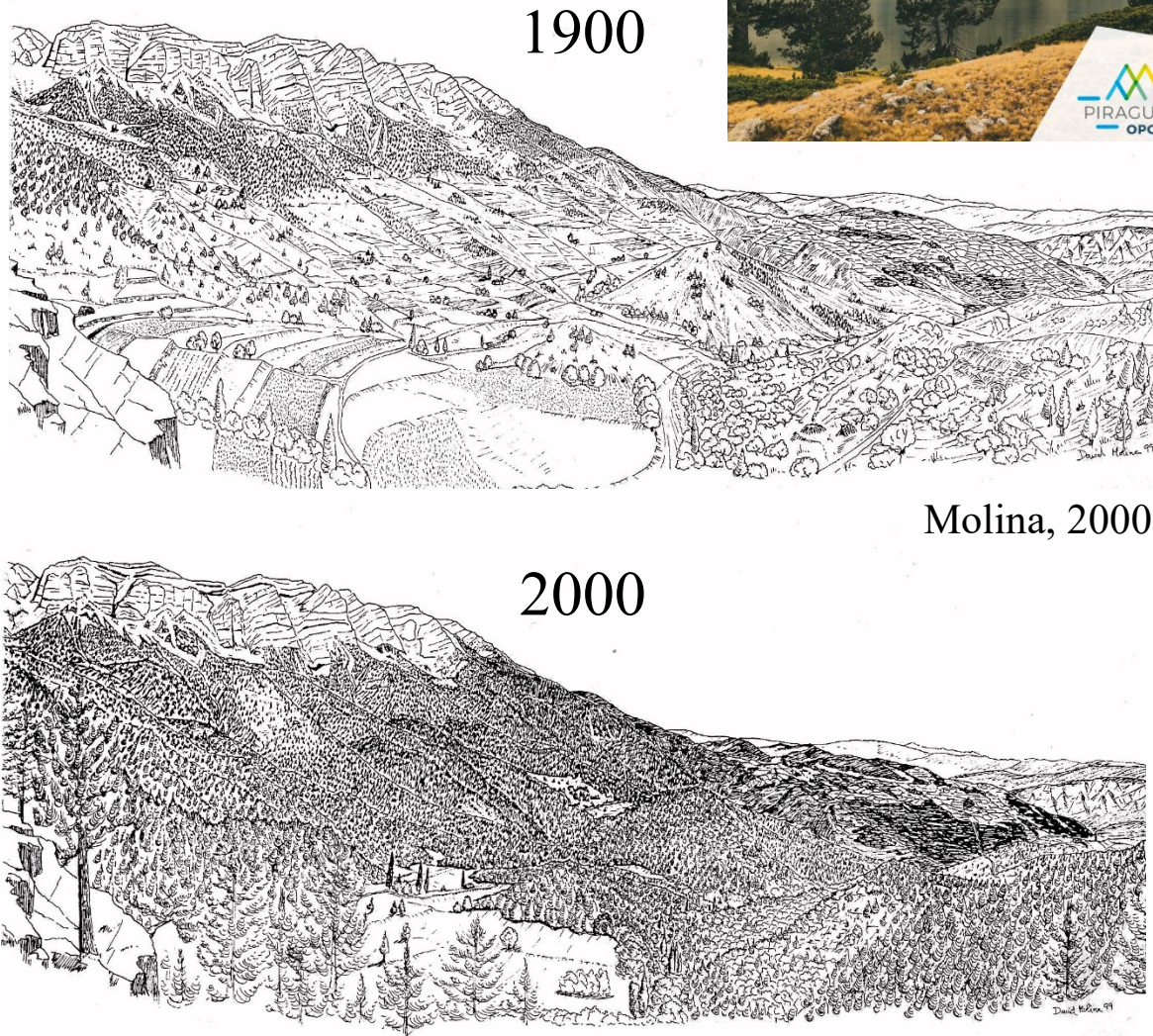


Figura 2.7. Resultados de los análisis de tendencias en los caudales históricos observados de los Pirineos para el periodo 1960-2019.

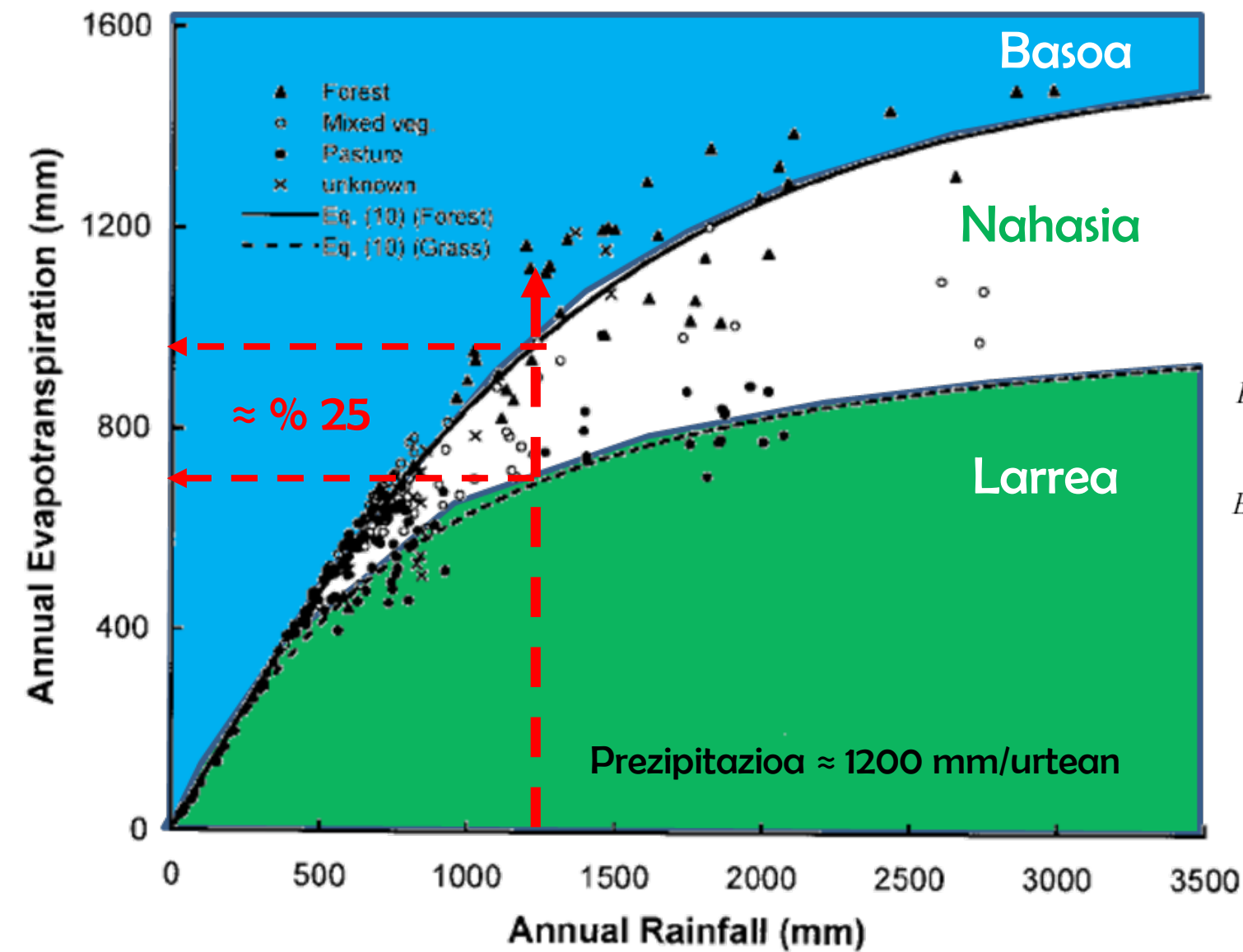
En el caso del periodo 1960-2019 mostrado en la figura destaca el **predominio absoluto de las tendencias negativas o descendentes en todos los indicadores de cantidad de caudal diario (q10, q25, q50, q75 y q90), tanto a escala anual como en los distintos meses**. Los caudales medios anuales (q50) disminuyeron entre un 4 y un 15% por década, mientras que los bajos (q10) lo hicieron entre un 4 y un 17% y los altos (q90) entre un 2 y un 14%. **En el caso de los caudales bajos este descenso fue más acusado en los meses de verano y principios de otoño (entre junio y octubre)**, con una disminución de los caudales de hasta el 20% por década en algunos casos y un elevado número de series con tendencias negativas significativas.

(Fuente: PIRAGUA_indicators.)



Emarien gutxitzea	Klima
98 hm³ urtean	38 hm³ urtean
Erregadioa	Basotzea
32 hm³ urtean	30 hm³ urtean

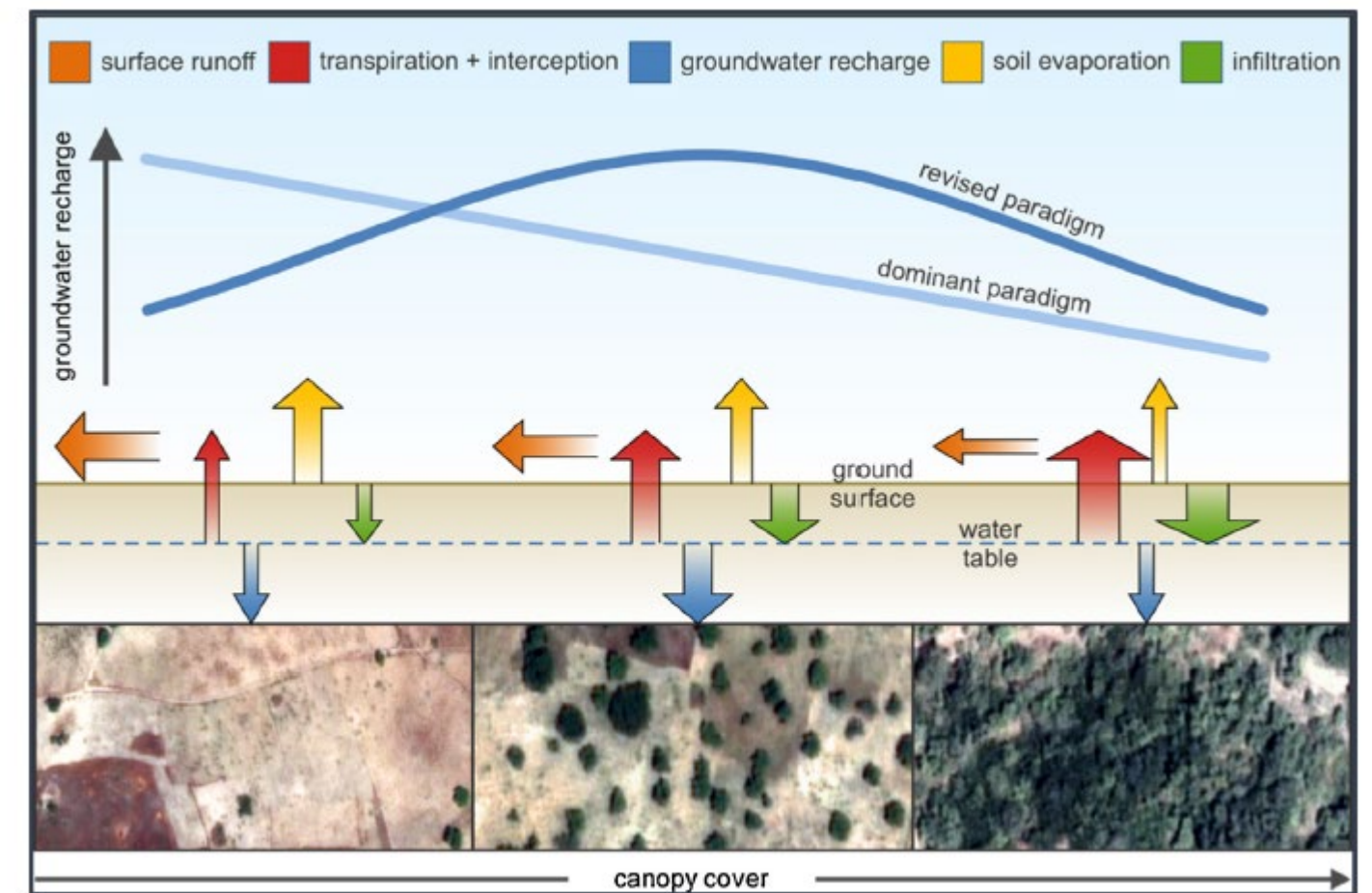
Zhang et al. (1999, 2001)



landaretza

$$ET = P \left\{ \frac{1 + w(E_0 / P)}{1 + w(E_0 / P) + (E_0 / P)^{-1}} \right\}$$
$$ET_{forest} = \left\{ \frac{1 + 2.0 \times 1410 / P}{1 + 2.0 \times 1410 / P + P / 1410} \right\} \times P$$
$$ET_{non-forest} = \left\{ \frac{1 + 0.5 \times 1100 / P}{1 + 0.5 \times 1100 / P + P / 1100} \right\} \times P$$

D. Ellison et al. / Global Environmental Change 43 (2017) 51–61



Infiltration and groundwater recharge relative to canopy cover. The relationship between tree cover and groundwater recharge, as theorized by the dominant paradigm (the trade-off theory) and the revised paradigm (optimum tree cover theory). Arrows depict the conceptual water budget based on the optimum tree cover theory. The size of the arrows is proportional to the magnitude of each component of the water budget. Groundwater recharge is expressed as a share of annual rainfall.

Eraldatutako arroaren %10eko azalera bakoitzeko batazbestean eragindako aldaketa urteko emarietan:



Pinu eta eukaliptuak



Hosto-zabaleko basoak



Sastrakadiak eta belarkarak

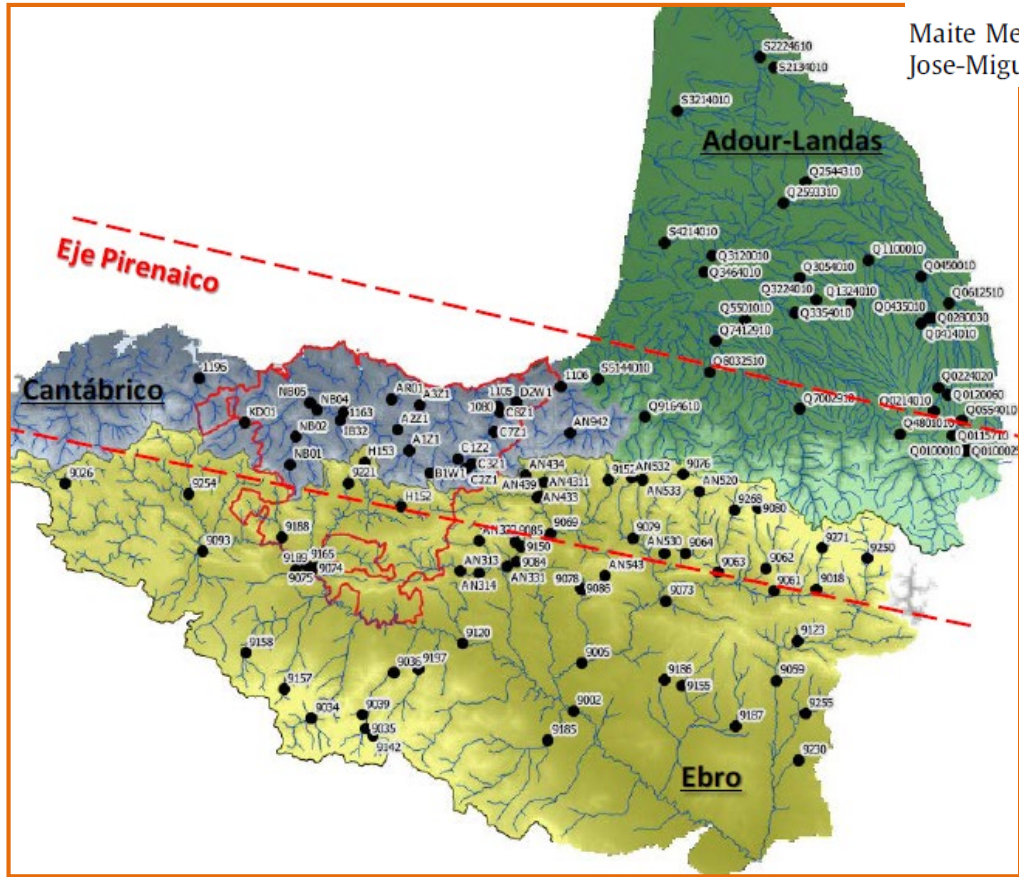


Eghilur proiektua
Klimatek, 2016

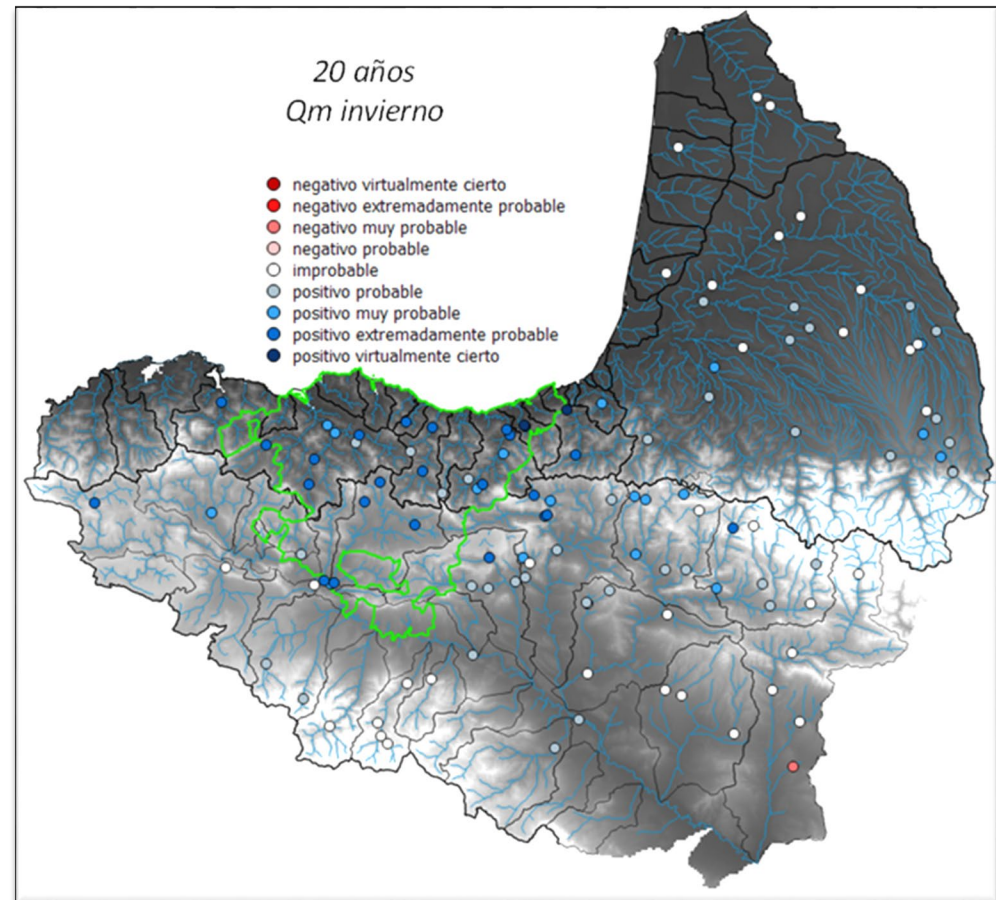
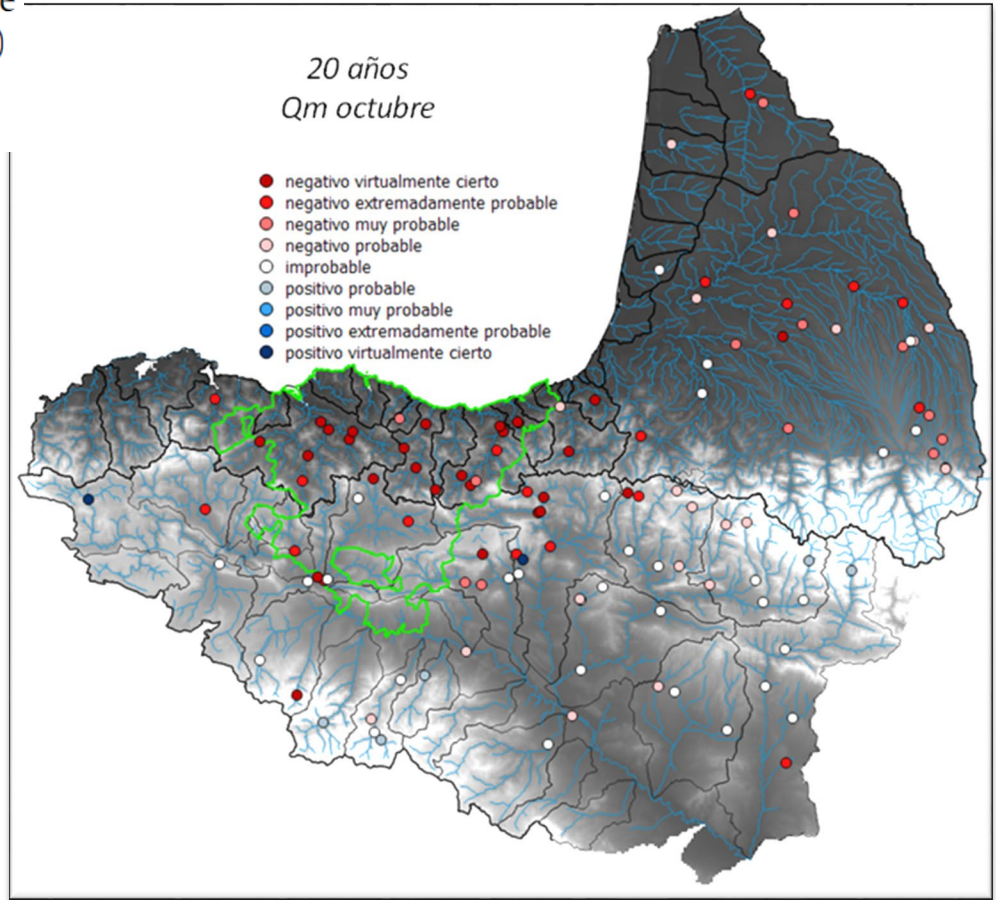


Assessing the hydrological response from an ensemble of CMIP5 climate projections in the transition zone of the Atlantic region (Bay of Biscay)

Maite Meaurio ^{a,*}, Ane Zabaleta ^a, Laurie Boithias ^{b,c}, Ane Miren Epelde ^a, Sabine Sauvage ^b, Jose-Miguel Sánchez-Pérez ^b, Raghavan Srinivasan ^d, Iñaki Antiguiedad ^a



(1995-2015)



Urteak (estazio kopurua)	UDAZKENA	NEGUA	UDABERRIA	UDA	Oharrak
60 (18)	negatiboa*	negatiboa*	negatiboa	negatiboa	Emarian urteko batez besteko joera udaberriak eta udazkenak baldintzatzen dute.
40 (43)	negatiboa*	negatiboa**	negatiboa	negatiboa****	Urteko batez besteko emarien joera udaberriak eta udazkenak baldintzatzen dute. Emari baxuen (Q20) goranzko joera, batez ere Aturi-Landetan eta ardatz pirenaikoan.
20 (117)	negatiboa	positiboa	positiboa	negatiboa***	Urteko batez besteko emarien joera neguak eta udaberriak baldintzatzen dute. Emari baxuen (Q20) beheranzko joera, udaberrian batez ere, eta neguan.
*Ebro **Aturi-Landak ***Kantauria ****Pirinioetako ardatza Izartxoak gabe, lurralde osoa					

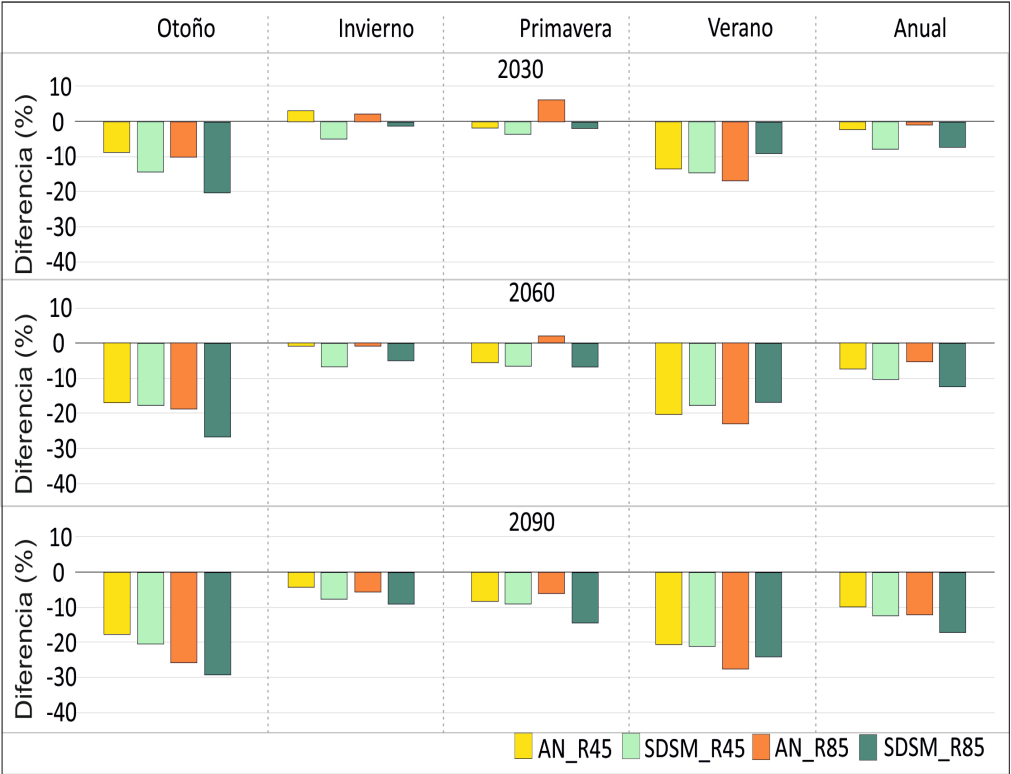
• Otxandio

36 km²

(ZADORRA arroa)

82 km²

• Audikana



2030

2060

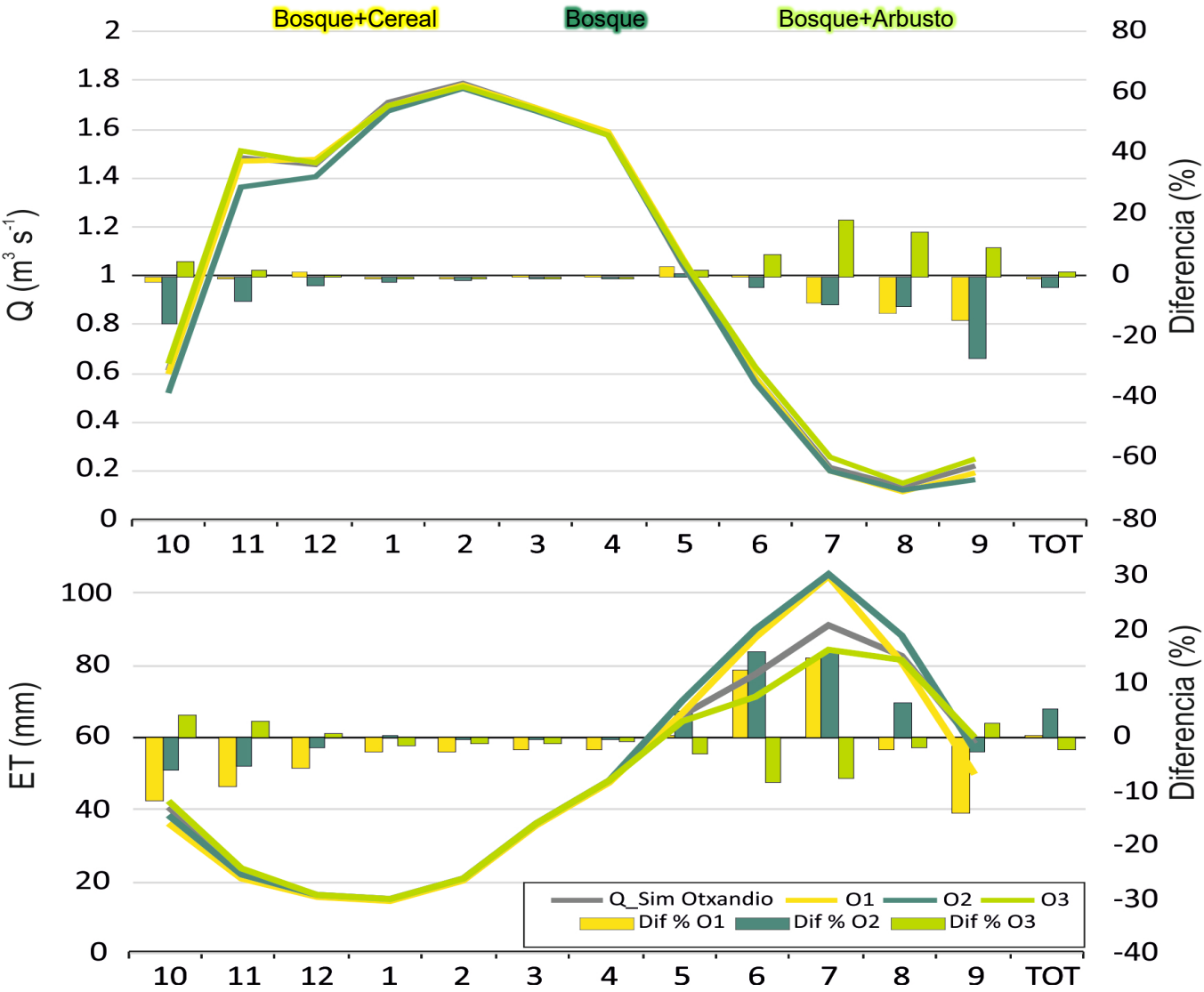
2090



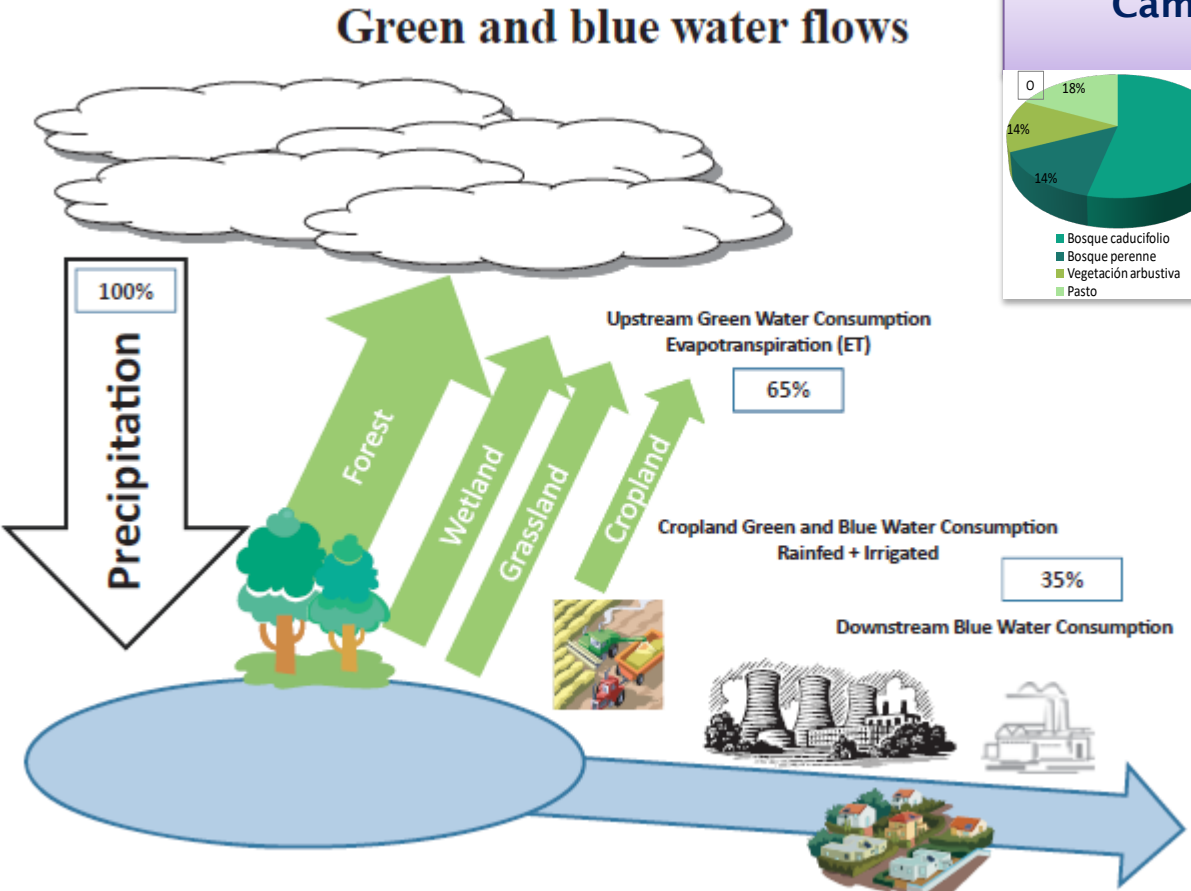
(SWAT model)
Soil and Water Assessment Tool



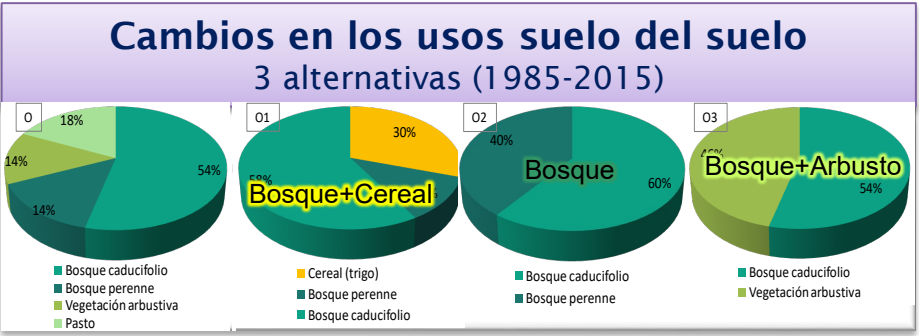
Otxandio



Impactos hidrológicos de cambios en los USOS DEL SUELO



Global Change Biology (2012) 18, 806–820, doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02589.x



LEY 1/2024, de 8 de febrero, de Transición Energética y Cambio Climático.

Artículo 1.– Objeto y finalidades

d) Aumentar la **capacidad de adaptación del territorio** para fortalecer la resiliencia y reducir la vulnerabilidad al cambio climático.

Artículo 2.– Principios

f) **Incorporación del conocimiento** como criterio para la toma de decisiones en materia de transición energética y cambio climático.

Artículo 3.– Definiciones

b) Adaptación al cambio climático: ajuste en sistemas naturales o humanos como respuesta a estímulos climáticos proyectados o reales o a sus efectos, a fin de moderar los daños o aprovechar sus aspectos beneficiosos.

Artículo 35.– Actividades agrícolas, ganaderas, forestales y pesqueras

b) El fomento de sistemas de producción que **protejan los recursos naturales** y los servicios de los ecosistemas, potencien la capacidad de fijación de carbono, reduzcan las emisiones y el consumo de agua,

i) El fomento de una gestión forestal que permita reducir el riesgo de incendios forestales, aprovechar la biomasa forestal y **recuperar los mosaicos agroforestales y de pastos** a partir de especies locales más adaptadas fisiológicamente a las condiciones climáticas, ...

Capítulo V - Resiliencia del territorio: adaptación al cambio climático

Artículo 42.– Infraestructuras críticas y sensibles

a) Identificar todas las infraestructuras críticas y sensibles

Artículo 45.– Recursos hídricos y gestión de sequías e inundaciones

b) Identificar, evaluar y hacer seguimiento de los principales **riesgos derivados del cambio climático en la planificación y gestión del agua, incluyendo los impactos sobre los caudales y los recursos disponibles** y sobre las necesidades de agua y el estado de las masas de agua y las zonas protegidas relacionadas, ...

Artículo 46.– Protección del patrimonio natural

b) Evitar o minimizar los efectos derivados del cambio climático en el suelo, la cubierta vegetal y el agua, restaurando, en su caso, sus condiciones anteriores.

SECCIÓN 1.^a

FOMENTO DE LA INVESTIGACIÓN, EDUCACIÓN ..



En el País Vasco se han identificado 953 puntos de abastecimiento de agua que cumplen con los criterios establecidos por la DMA para considerarse como zonas de captación de agua para abastecimiento urbano. El 70% de los puntos de abastecimiento captan aguas subterráneas y el 30% superficiales. Los más destacables son los principales embalses de abastecimiento. Dada su relevancia, se considera necesario que el planeamiento urbanístico recoja estas captaciones estableciendo su régimen de protección.

Artículo 15.– Directrices en materia de agua.

4.– Desarrollar la dimensión territorial de la protección de las aguas subterráneas, basada fundamentalmente en la aplicación de políticas preventivas.

5.– Contribuir en el plano preventivo desde la ordenación territorial a la consecución de los objetivos en materia de aguas en el caso de presiones relacionadas con el sector agrario o extractivo, y en particular en el ámbito de las zonas protegidas, incluyendo las captaciones de abastecimiento de poblaciones del registro de zonas protegidas.