
Propagación del Error de la Lluvia estimada por Satélite en la Modelación Hidrológica en una Cuenca Extratropical Mediterránea

Autores:

Lia Ramos^{1,2}, Félix Francés¹

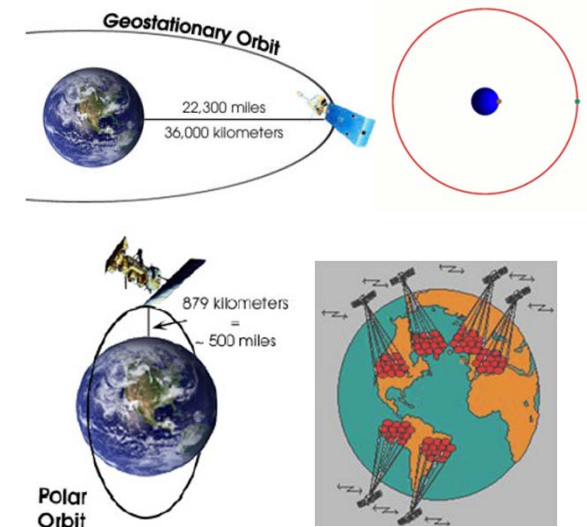
- (1) **Universitat Politècnica de València**
Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente
Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA)

- (2) **Universidad Nacional Agraria La Molina**
Facultad de Ingeniería Agrícola
Departamento de Recursos Hídricos

- Lluvia estimada por satélite permite disponer en tiempo real de datos que se ajustan a la necesidad de modelos distribuidos, proporcionando información en regiones inaccesibles para otros sistemas de observación como pluviómetros y radar.
- Sensores de satélite que operan en *longitudes de onda del infrarrojo (IR)*: radiación reflejada en el tope de la nube, con alta frecuencia de muestreo. *Sensores de microondas pasivos (PMW)*: comúnmente instalados en satélites polares de baja órbita LEO, reflejan distribución vertical de lluvia en la nube pero tienen baja frecuencia espacio temporal.
- Recientes avances en términos de evaluación cuantitativa de patrones de lluvia, resolución del sensor y frecuencia de muestreo, abren nuevos horizontes en aplicaciones hidrológicas a escala global.

Conceptos importantes:

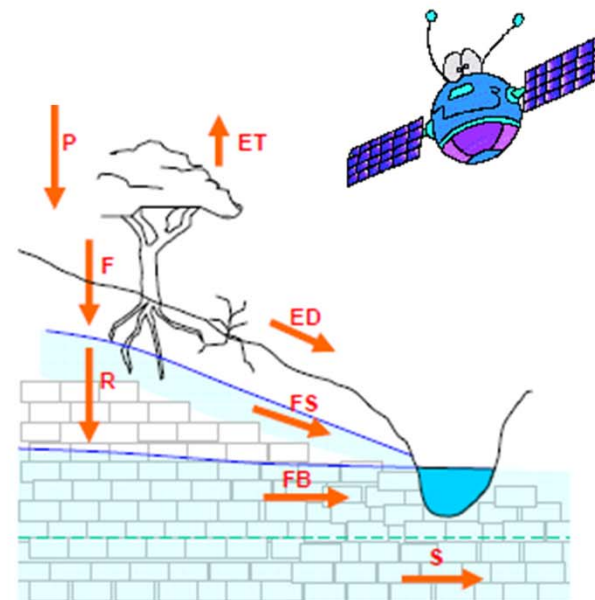
- Satélite Geoestacionario (GEO): vuelta a la tierra en órbita circular sobre línea ecuatorial (altitud 36000 Km) cada 24hr. Satélite siempre está sobre la misma región, observaciones de forma continua.
- Satélites de Baja Órbita (LEO): orbitas de baja altitud (725 a 1450 Km) ➡ mejora la calidad de la señal. Pero, mayores satélites para cubrir la tierra en aplicaciones en tiempo real.
(Polares, no polares)



Naturaleza del sistema de medición, simplificaciones teóricas, relación no lineal entre la variable observada y la lluvia, problemas instrumentales, etc

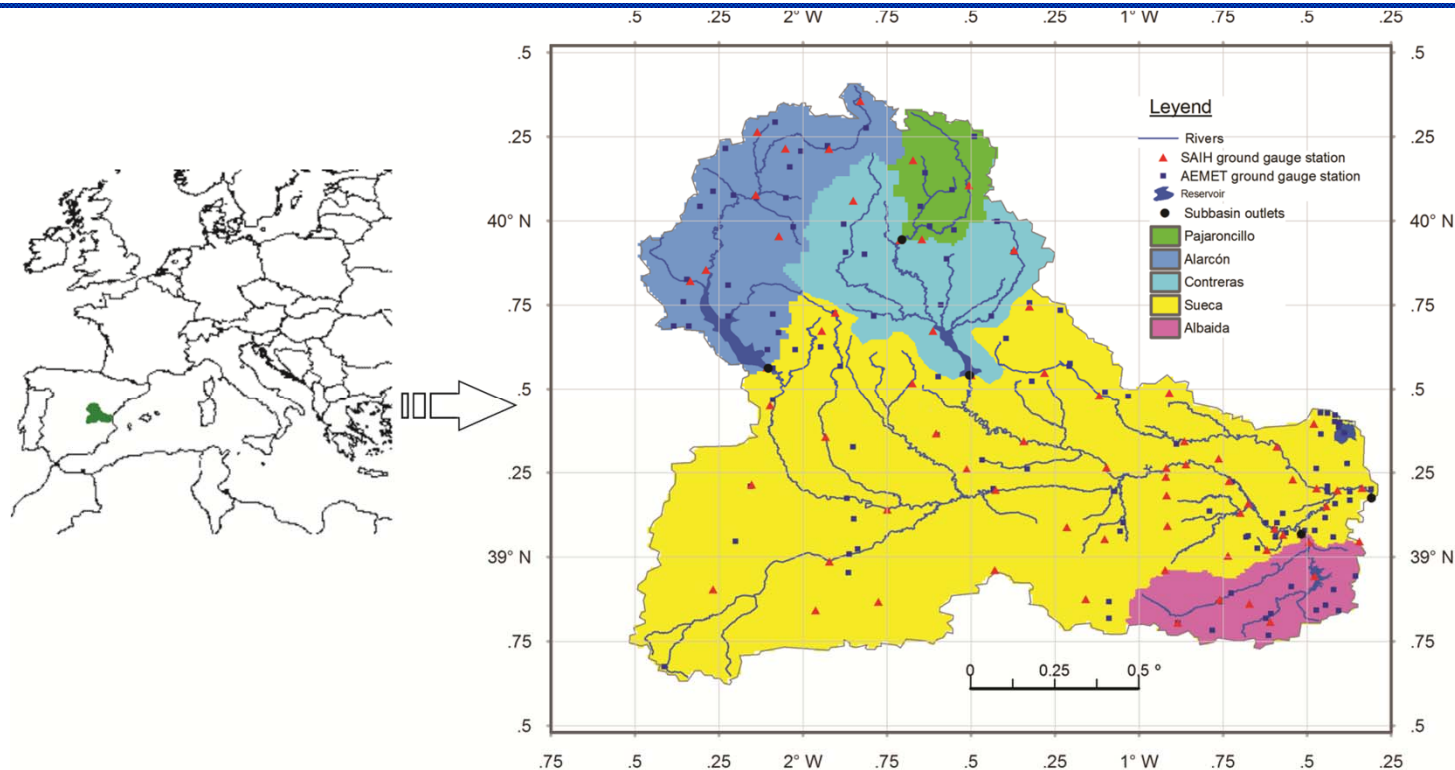


Errores que introducen incertidumbre que debe evaluarse y cuantificarse en aplicaciones hidrológicas.



■ Objetivo:

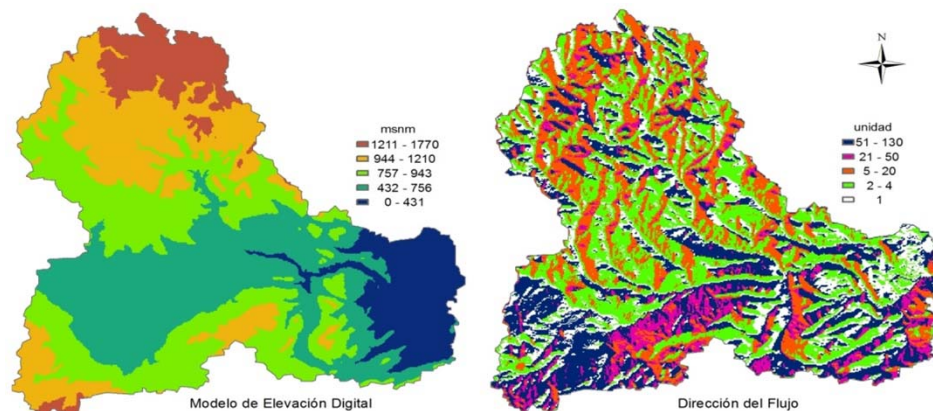
- Caracterización espacio temporal de la lluvia
- Modelación hidrológica
- Propagación del error de la lluvia estimada de satélite, al caudal simulado.



- Cuenca del río Júcar con área de 21500 km², caudal promedio de 43 m³/s y altitudes máximas de 1700 msnm.
- Lluvia media anual de 500 mm (200 a 1000mm).
- Lluvias de origen Mediterráneo en Costa (51% lluvia anual), casos más extremos causados por SCMs (alta intensidad y corta duración con picos aislados de valores muy altos). Lluvias de origen Atlántico en zonas montañosas (38% de lluvia anual)

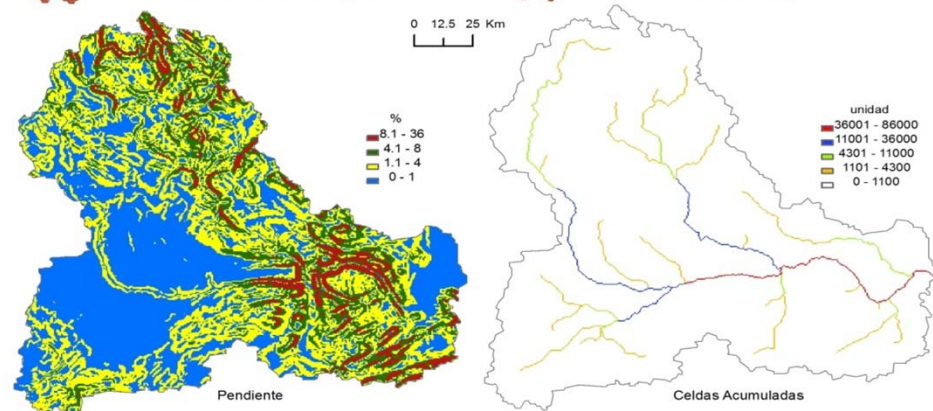
■ Hidrología:

- Pluviómetros (SAIH y AEMET)
- Aforos (Estaciones SAIH)
- Temperatura (AEMET)
- Evapotranspiración (Ecuación Hargreaves calibrada con Penman-Monteith)



■ Cartografía:

- Pixel 500 x 500
- MED, Celdas acumuladas, Dirección del flujo, Pendiente del terreno, Velocidad en ladera



Variable	Source	File	File Format		
			Temporal Resolution	Coordinate System	Time
Rainfall, flow, dam	SAIH	ascii	Five minutal	UTM_Zone_30N	Local
Rainfall, temperature	AEMET	csv	Daily	WGS 1984	GMT 07-07 the next day

Lluvia Global Estimada de Satélite

■ TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission

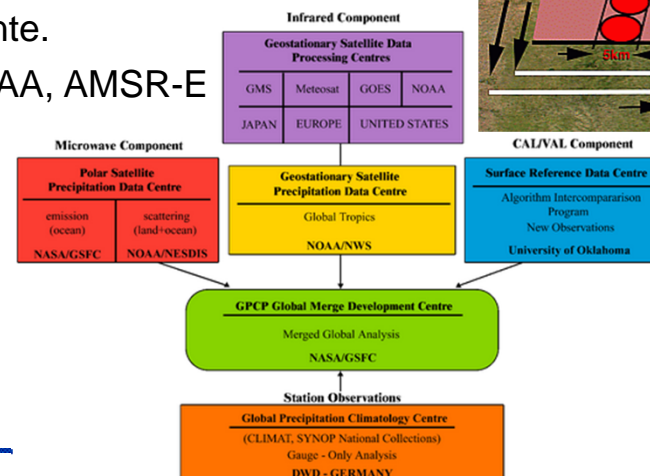
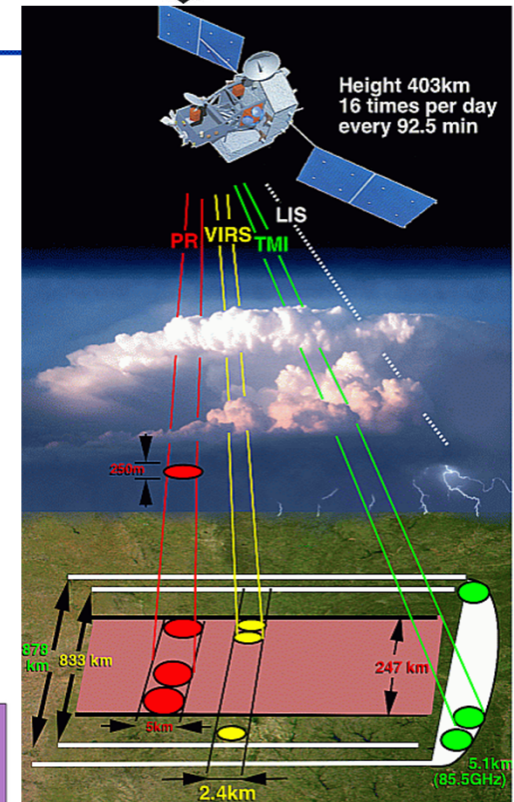
- Satélite de baja órbita no polar (concentran en los trópicos).
- Radar meteorológico (PR), imágenes sensor de microondas pasivo (TMI), sensor de imágenes de relámpagos (LIS), escáner de radiación visible e infrarrojo (VIRS), sistema de energía radiante de la tierra y nubes (niveles de energía de atm/sup-terrestre, usando banco de imágenes de nubes de altísima resolución)
- 28km (0.25°), 3hr-diaria, 35°N a 35°S, 1998 al presente.

■ CMORPH: Climate Prediction Center Morphing Technique

- Utiliza estimaciones de sensor de microondas pasivo que combina con información de satélites GEO-IR.
- 8 km, 30 minutos, 60°N-60°S, Dici 2002 al presente.
- Sensor de microonda pasivo: TRMM, DMSP, NOAA, AMSR-E

■ GPCP: Global Precipitation Climatology Project

- Más de 6.000 estaciones pluviométricas, satélite GEO y de baja órbita (infrarrojos, microondas pasivo), se han fusionado
- 1979 (mensual, 2.5°), 1997 (diaria, 1°)



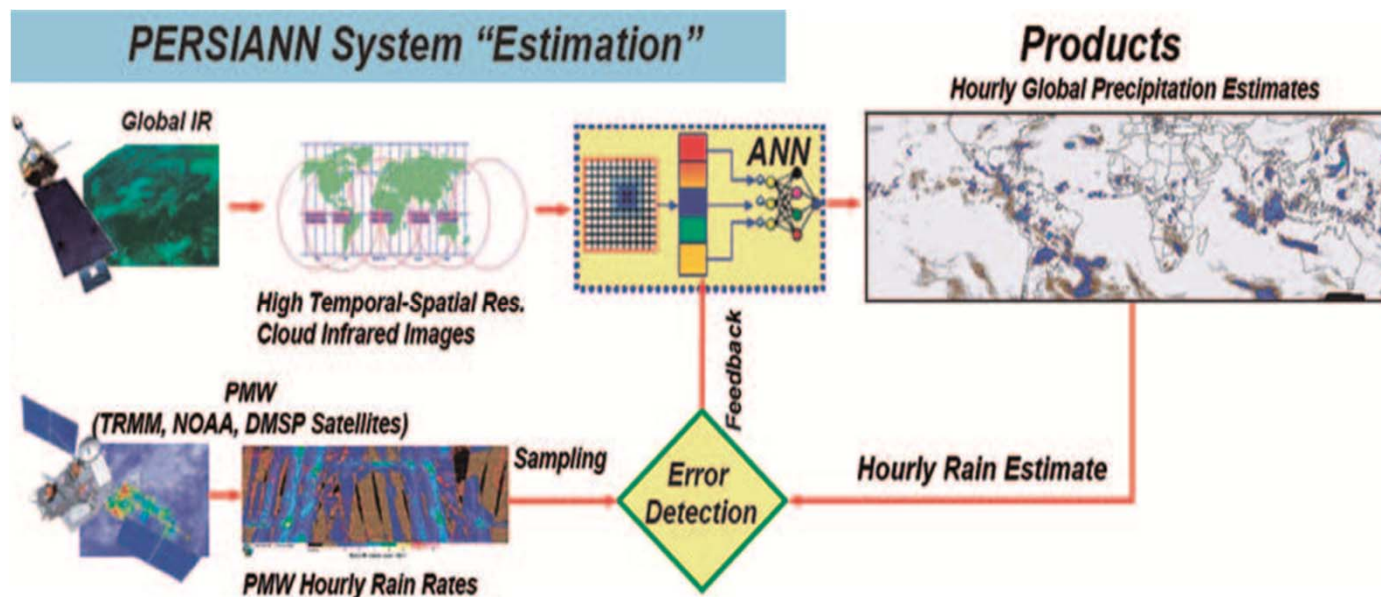
Lluvia Global Estimada de Satélite

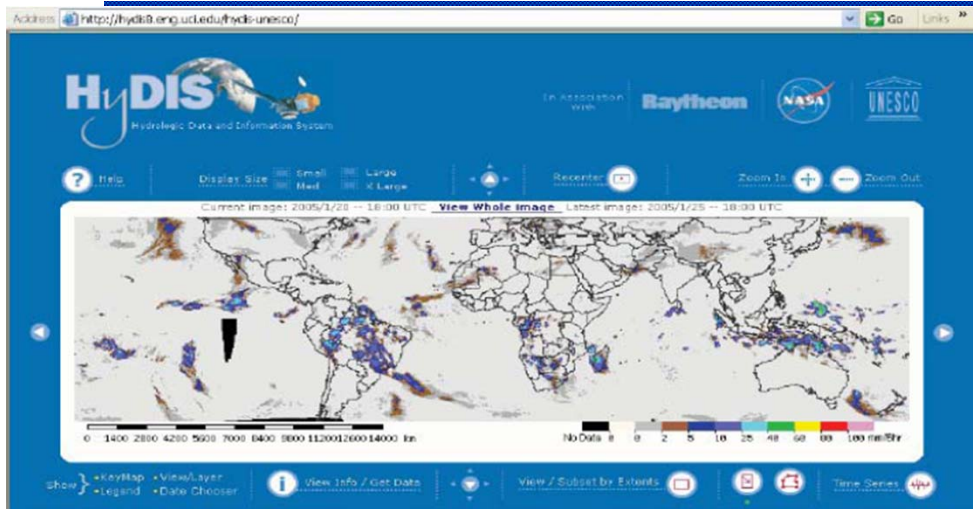
■ PERSIANN:

- Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks: combinar alta frecuencia de muestreo de imágenes infrarrojas en satélites GEO con alta calidad de datos del sensor de microondas pasivos (PMW) de satélites de baja órbita (0.25°)

■ PERSIANN-CCS: PERSIANN-Cloud Classification System

- Categoriza las nubes en base a su altura en el tope, geometría y textura, estimada a partir de imágenes de satélite -> obtiene intensidades de lluvia de diferentes nubes, que ayudan en detección de diferentes sistemas convectivos. (0.04°)



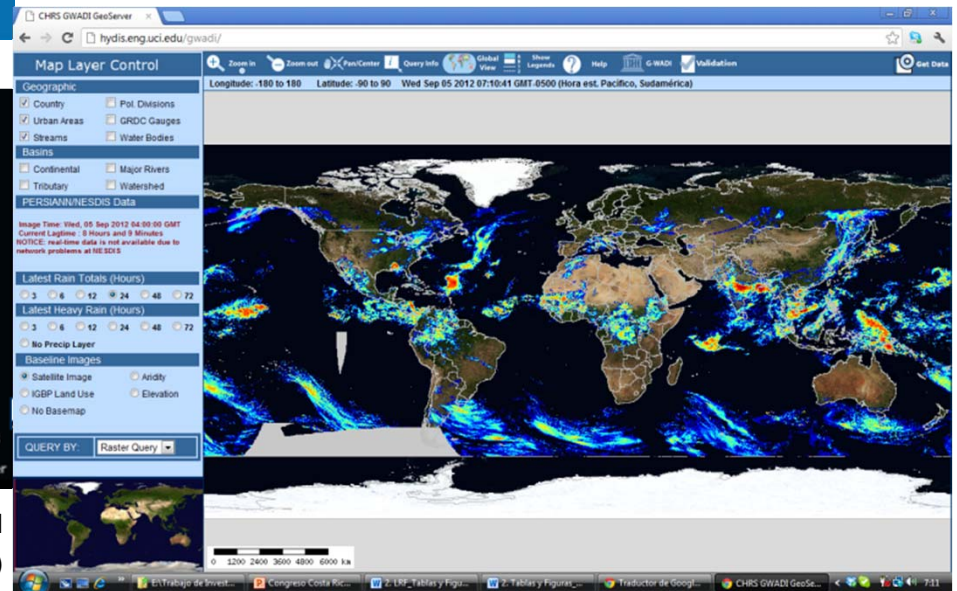


PERSIANN:
HyDIS (Hydrologic Data and Information System)

University of California, Irvine



PERSIANN-CCS: HyDIS G-WADI
(Water and Development Information for Arid Lands – A Global Network)

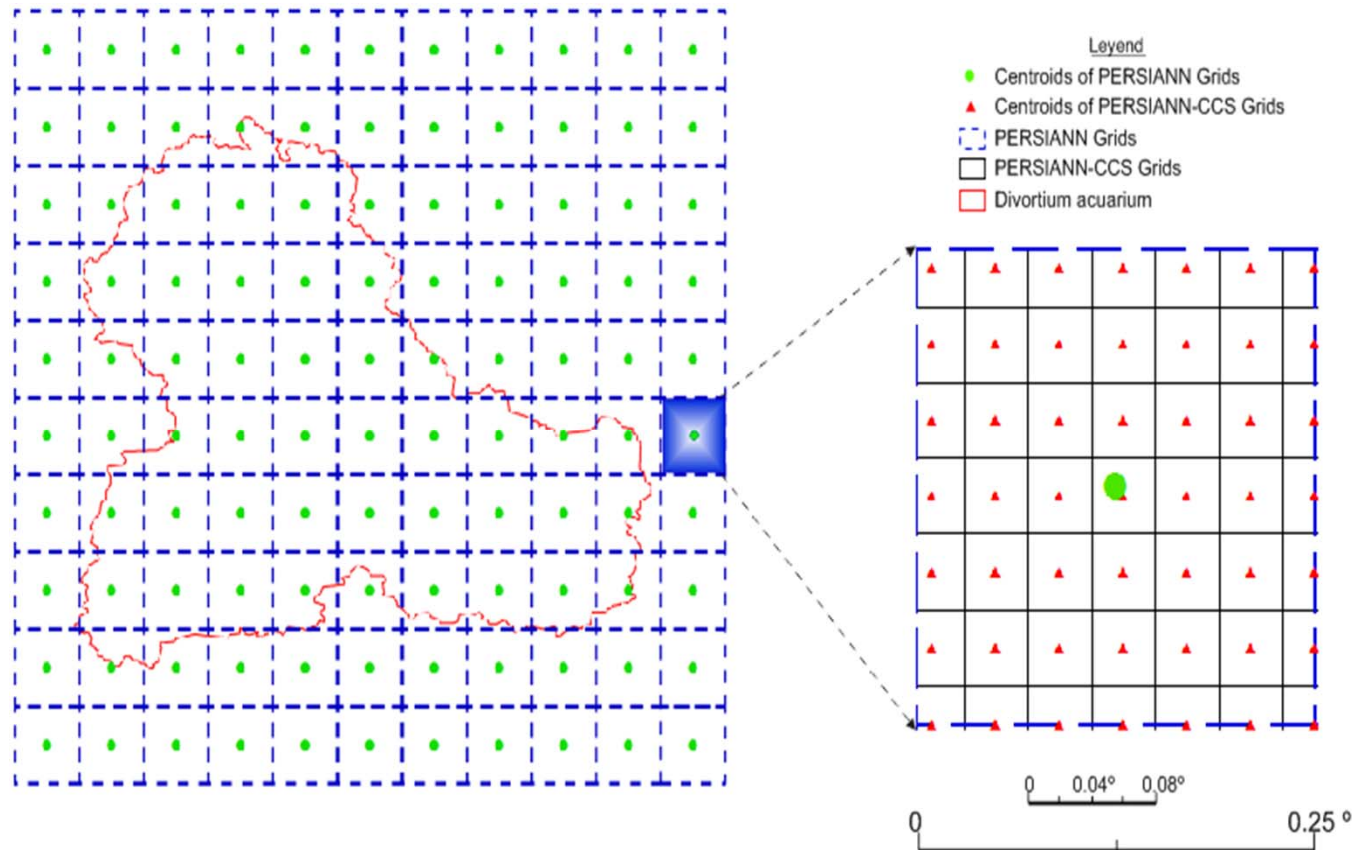


Lluvia Global Estimada de Satélite

	PERSIANN	PERSIANN-CCS
Escala espacial	0.25°	0.04°
Escala temporal	6 h, daily	daily
Unidad	mm/d	mm/d
Disponible desde	01/03/2000	01/01/2003
Fuente	Web HyDIS	CHRS-University of California
Cobertura espacial	50°S - 50°N, 0-360° long	60°S - 60°N, 0-360° long
Formato fuente	ASCII, GMT	Binario y en filas céntricas 4 byte float, big endian. GMT Convertir formato binario a ASCII Cabecera de File: n cols 9000 n rows 3000 xllcomer 0.0200 yllcomer -59.98 cell size 0.04°
Formato para modelación hidrológica	ASCII, GMT, mm/d Cabecera de File: n cols 11 n rows 11 xllcomer -2.6250 yllcomer 36.875 cell size 0.25°	ASCII, GMT, mm/d Cabecera de File: n cols 74 n rows 62 xllcomer -3.24 yllcomer 38.38 cell size 0.04°
Periodo de análisis	01/01/2003 to 31/10/2009	01/01/2003 to 31/10/2009



Lluvia Global Estimada de Satélite



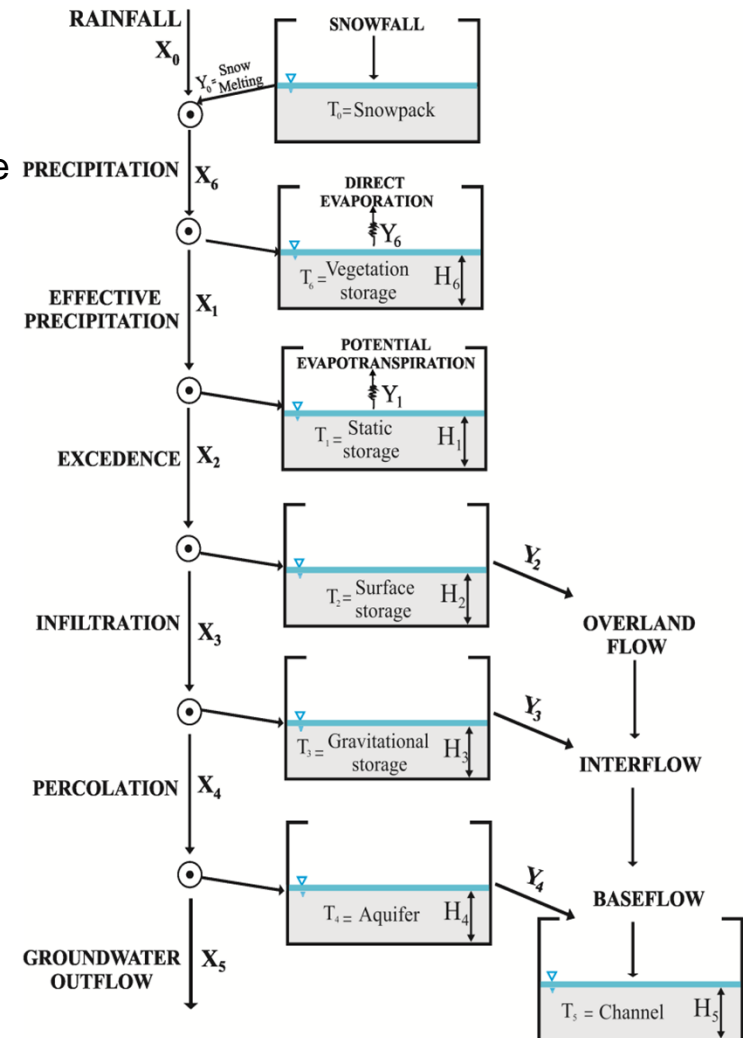
- Se evaluó dos productos de satélite con diferente resolución espacial, 0.25° (formato ASCII) y 0.04° (formato binario), a escala diaria para el período del *01 de Enero del 2003 al 31 de Octubre del 2009*.

- Desarrollado en UPV desde 1994
- Modelo conceptual con base física y distribuido en el espacio:
 - Simula procesos hidrológicos más relevantes y reproduce variabilidad espacial de las componentes del balance.
- Problema potencial con los parámetros en la mayoría de los modelos distribuidos:
 - Calibración de elevado número de parámetros en cada celda a partir del hidrograma en la salida de la cuenca.
 - Solución adoptada: estructura separada del parámetro efectivo:
 - Primera fase: estimación “a priori” a partir de información física y ambiental disponible

$$H_u(i)$$

- Segunda fase: Factor corrector global

$$H_u(i) \text{ (FC}_1\text{)} \rightarrow \text{Calibración}$$





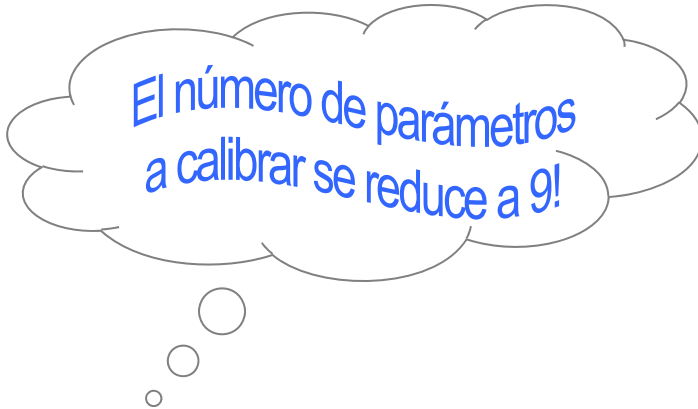
El Modelo hidrológico TETIS



■ Calibración automática de Factores Correctores (FC) a posteriori:

➤ *Tiene en cuenta: efectos de escala espacial y temporal, errores en los inputs, parámetros “a priori”, y asociados a la estructura del modelo.*

- Almacenamiento estático máximo: **FC₁ Hu**
- Factor de vegetación para la ET: **FC₂ λ_v**
- Infiltración (tasa cte.): **FC₃ Ks**
- Escorrentía directa (embalse lineal): **FC₄ V_{ladera}**
- Percolación (tasa cte.): **FC₅ Kp**
- Flujo subsuperficial (embalse lineal): **FC₆ Ks**
- Pérdidas subterráneas (tasa cte.): **FC₇ 0,1 Kp**
- Flujo base o interior (embalse lineal): **FC₈ Kp**
- Velocidad en cauces: **FC₉ V_{cauces}**



El número de parámetros
a calibrar se reduce a 9!

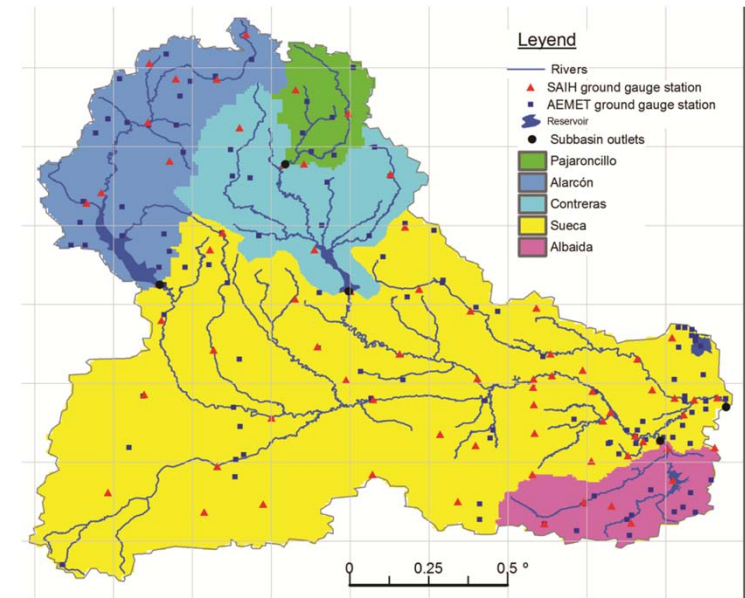
Parámetros del Modelo

Parámetros del Modelo	Símbolo	Valor	
Parámetros Geomorfológicos:			
Área acumulada (Λ) y flujo a sección llena (Q_b)	$\Lambda = \kappa Q_b^\phi$	Coeficiente 1.2968	Exponente 0.7571
Ancho de sección transversal llena (w_b) y flujo a sección llena (Q_b)	$w_b = \alpha Q_b^{\alpha_1}$	3.1301	0.5088
Ancho de sección transversal (w) y flujo (Q)	$w = Q^{\alpha_2}$		0.3253
Diámetro del sedimento (d), pendiente (S_o) y profundidad del flujo (y)	$d = C_d (y s_o)^\theta$	6.5156	0.6548
Coefficiente de rugosidad (n) y diámetro del sedimento (d)	$n = c_n d^\xi$	0.0470	0.1667
Parámetros Hidrológicos:			
Capacidad de almacenamiento estático	H_u	Fuente de mapas DIHMA (2002)	
Capacidad hidráulica de suelo saturado	K_s	DIHMA (2002)	
Capacidad hidráulica del estrato rocoso saturado	K_p	DIHMA (2002)	
Capacidad hidráulica horizontal de suelo saturado	K_{ss}	$K_{ss} = K_s$ (isotrópico)	
Capacidad hidráulica horizontal del estrato rocoso saturado	K_{sa}	$K_{sa} = K_p$ (isotrópico)	
Capacidad hidráulica horizontal del estrato rocoso saturado por percolación profunda	K_{ps}	$K_{ps} = 0.1 K_p$	
Velocidad del flujo superficial	u	$u = 1.4142 S_o^{0.5}$	
Índice de cobertura vegetal	λ_v	Uso de suelo y cobertura vegetal	



■ Notación usada:

Notación	Lluvia	Resolución espacial
S1	Pluviómetro	Valor puntual
S2	PERSIANN	0.025°
S3	PERSIANN-CCS	0.04°
	Escala de cuenca (km ²)	Subcuenca
E1	861	Pajaroncillo
E2	1301	Albaida
E3	2883	Alarcón
E4	3427	Contreras
E5	21523	Sueca
	Tratamiento	Análisis
T1	S1 & S2	Correlaciones e índices de eficiencia en lluvia y caudal
T2	S1 & S3	



- **Lluvia distribuida:** igual resolución espacial y temporal => reprojectar satélite a coordenadas UTM (Zona 30N, datum WGS-84) haciendo resampling con método del vecino más cercano (celda 3484 m). Pluviómetros se interpoló por método de ponderación por inverso de la distancia (IDW) al mismo tamaño de celda.
- **Lluvia areal:** interpolación IDW a diferentes escalas de cuenca)

➤ Análisis:

- Correlaciones Pearson (más sensible a valores extremos altos) y Kendall (resiste efecto de extremos), Matrices de probabilidad de acierto de lluvia
- Índices de Eficiencia:
 - Nash–Sutcliffe (E)
 - Volumen error (%)
 - RSR: Relación de la desviación estándar de observaciones y RMSE (se estandarizó la raíz del error cuadrático medio)

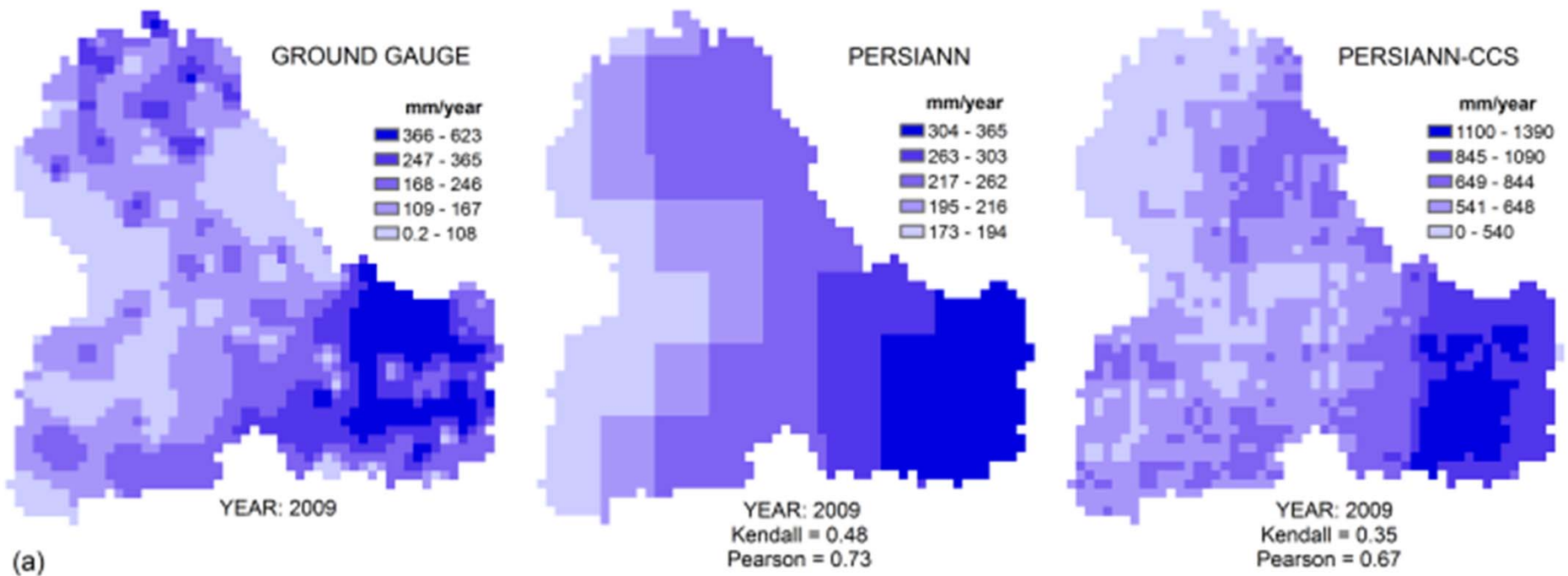
$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_1^n (Y_{obs} - Y_{sim})^2}}{\sqrt{\sum_1^n (Y_{obs} - Y_{mean})^2}}$$

$STDEV_{obs}$: desviación standard de datos observados

Y_{obs} , Y_{sim} , Y_{mean} son los datos observados, simulados and promedio

Caracterización Espacio-Temporal de la LLuvia

- **Escala Anual:** 221 ± 127 , 342 ± 93 , 775 ± 208 y valores máximos de 838, 603 y 1490 para So, S1 y S2
 - Región Noroeste de la cuenca (montañas del Sistema Ibérico, lluvia orográfica): subestima de 4 a 42% dependiendo de la resolución de satélite.
 - Región Sureste (costera, lluvia Mediterránea y SCM): sobrestimar 157% con PERSIANN-CCS y subestimar 28% con PERSIANN.



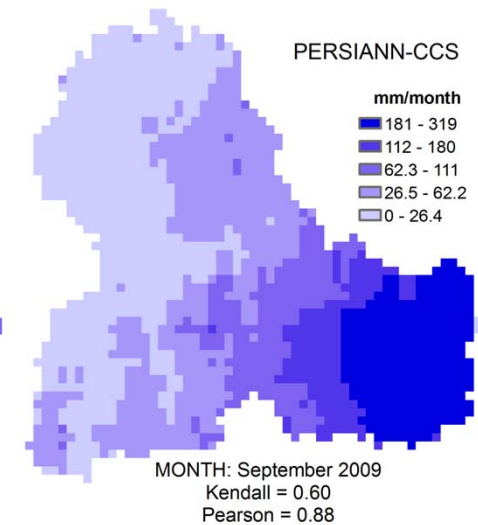
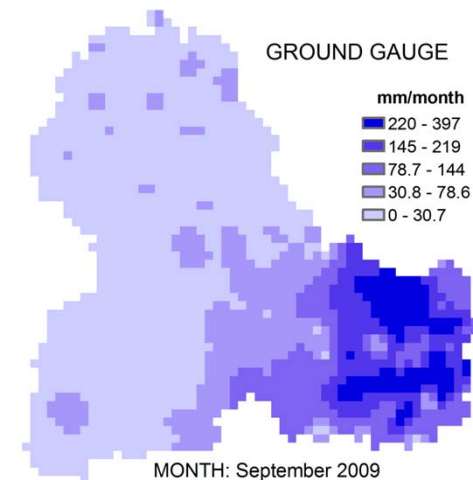
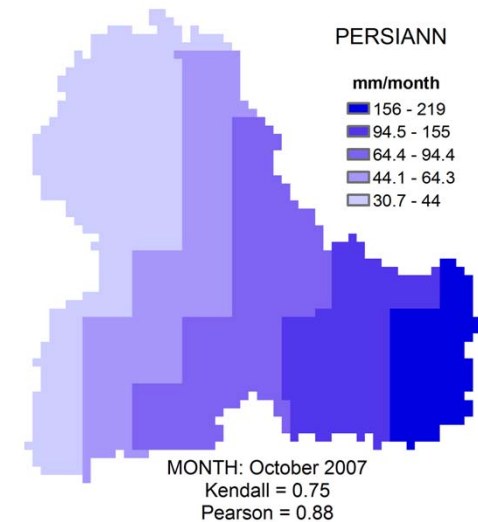
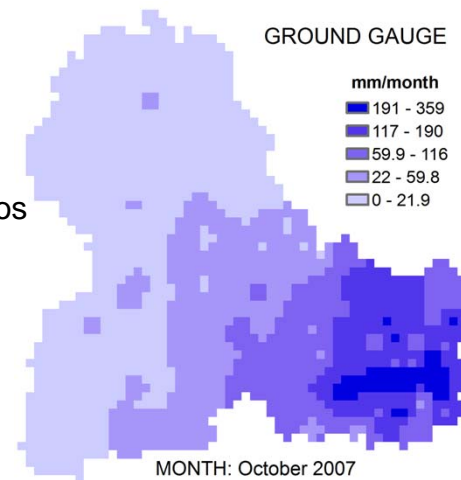
Caracterización Espacio-Temporal de la LLuvia

■ Escala Mensual:

20.4±47.1, 29.2±27.1, 66.2±46.1 y valores máximos de 397, 219, 563, para So, S1 y S2

➤ Región Noroeste: sobreestima de 21% (PERSIANN-CCS) a 241% (PERSIANN)

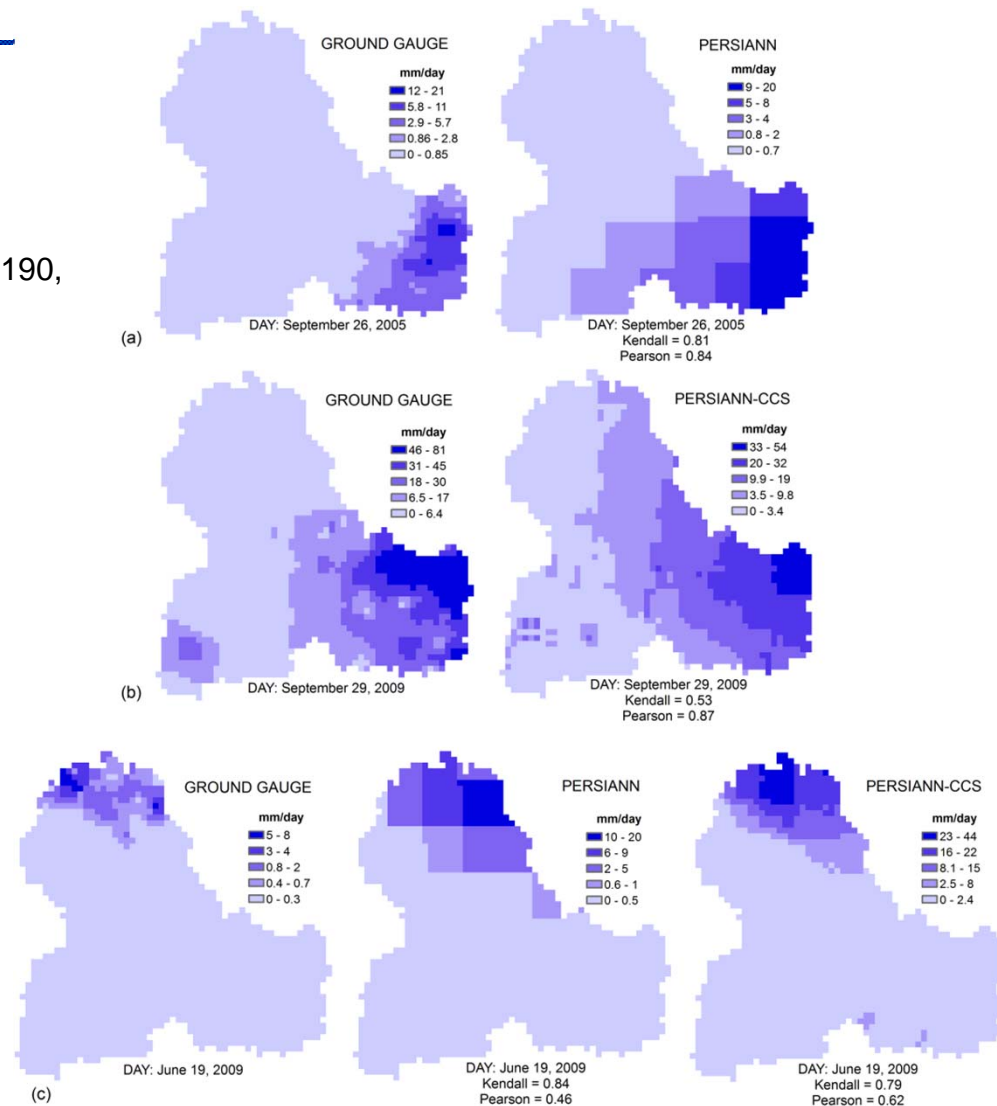
➤ Región Sureste: subestima de 11 a 31%

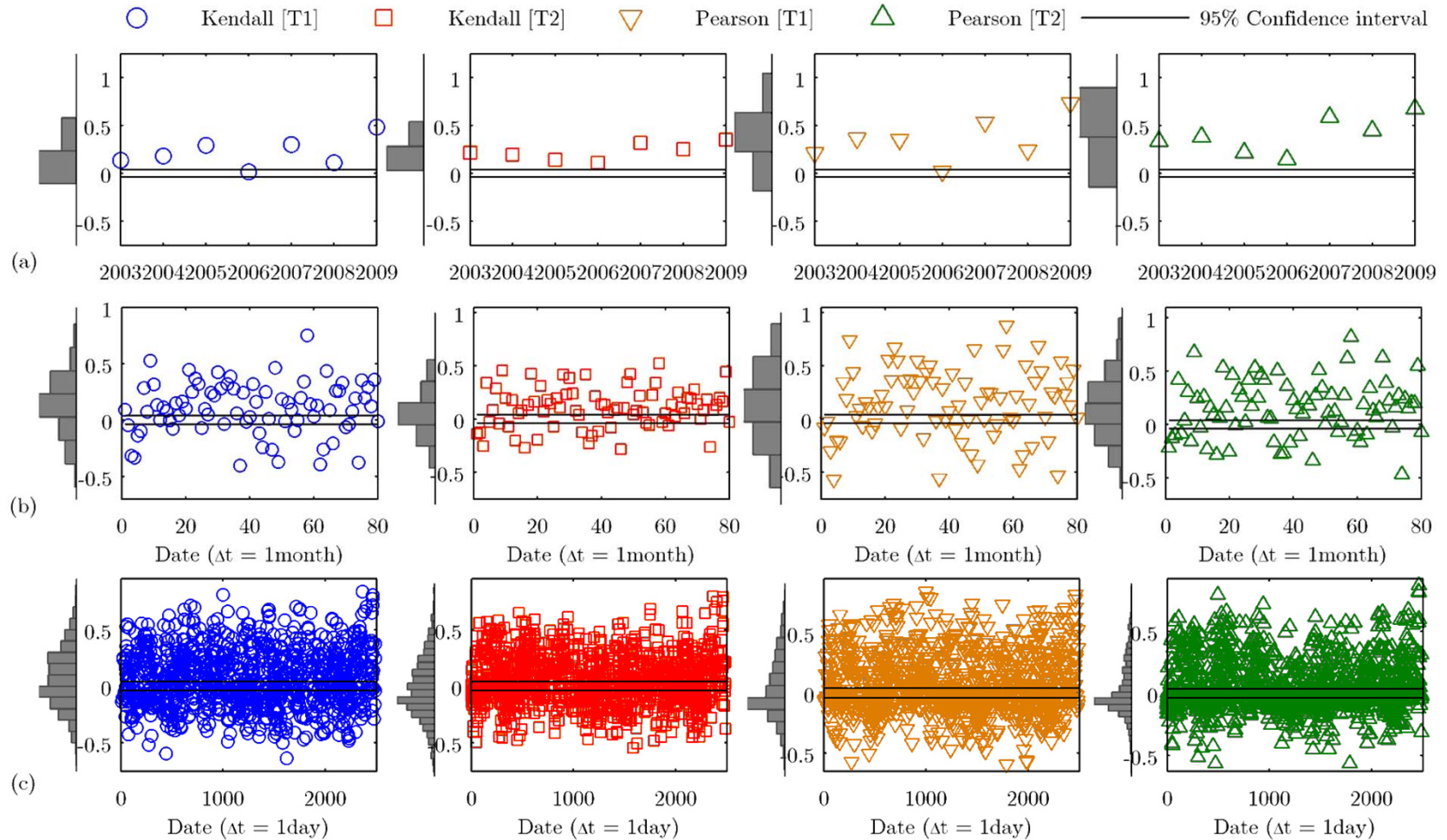


■ Escala Diaria:

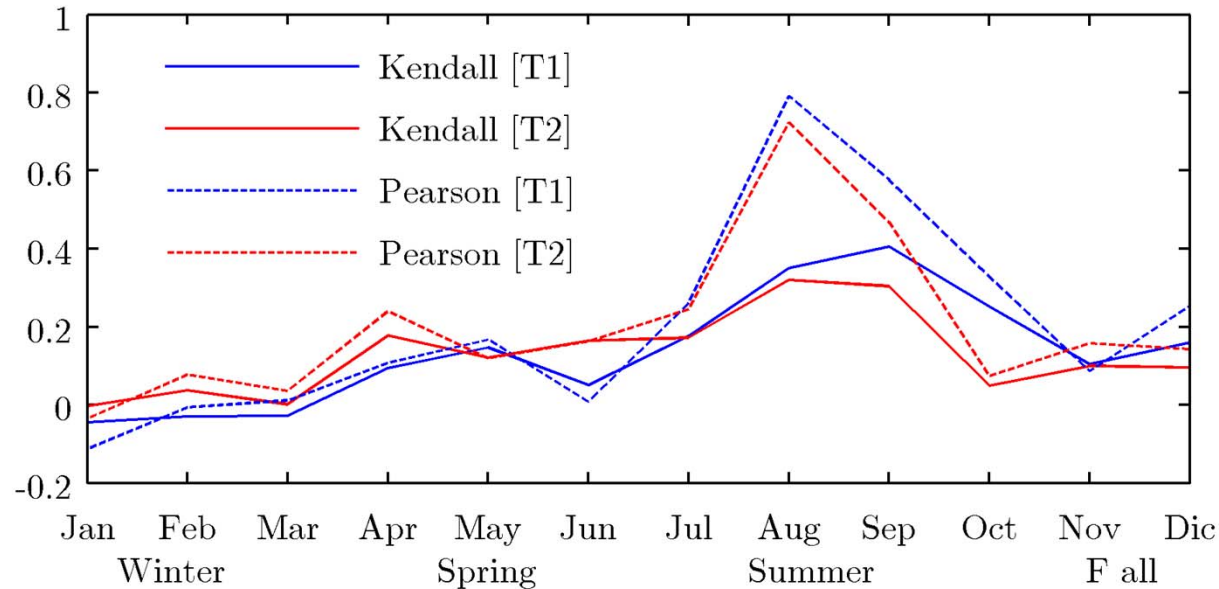
0.6 ± 2.8 , 1.0 ± 3.1 , 2.2 ± 6.1 ; y valores máximos de 190, 65, 215 para So, S1 y S2

- Satélites detectan lluvias en el litoral y parte media de la cuenca pero subestiman 5% (S1) y 34% (S2)
- En cambio en zona montañosa sobreestiman 145% (S1) y 454% (S2).





Scatter plot con histogramas de correlación espacial en T1 y T2: (a) anual, (b) mensual, (c) diario.

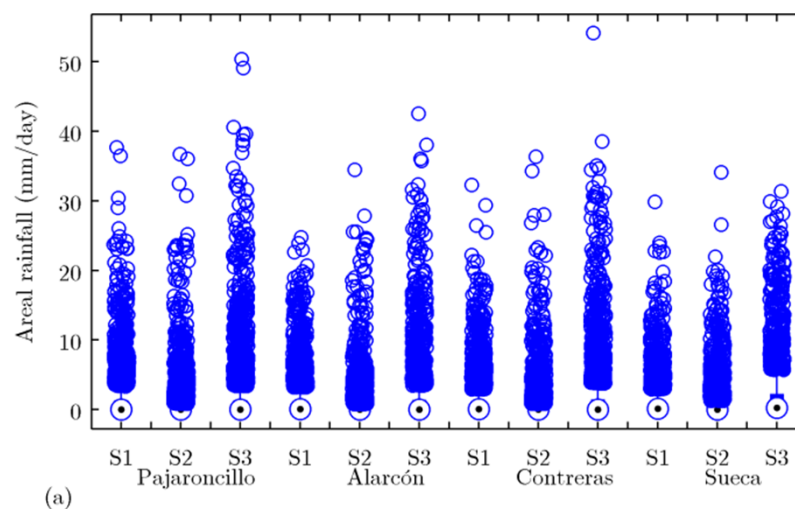


Correlación espacial mensual promedio de acuerdo a las estaciones:

- ✓ Invierno con correlación débil posiblemente porque lluvias se concentran más en zona montañosa
- ✓ Verano con correlación positiva significativa debido a meses con poca lluvia que se refleja en valores más altos con Pearson pero Kendall resiste estos efectos de los valores extremos
- ✓ Primavera y el otoño, con correlación positiva significativa.

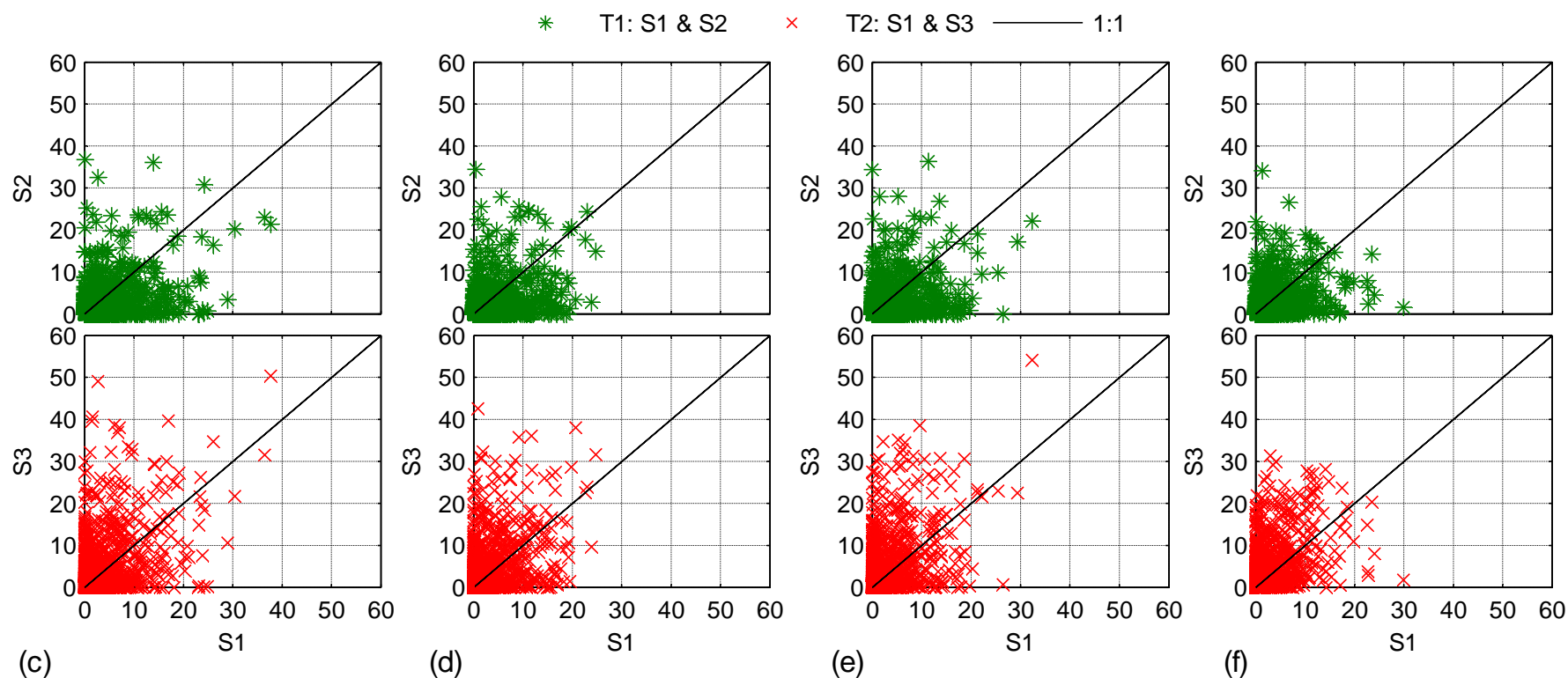
■ Lluvia Areal: diaria

- Lluvias máximas estimadas de satélite tienen errores muy altos, subestiman de 31 a 95% [T1]. , pero sobrestiman de 28 a 100% con [T2].
- Satélite sobreestima lluvias ligeras (< 1 mm/d) que reporta con valores de 20 a 85 mm/d, posiblemente debido al efecto de nubes cirros que no desarrollan lluvia pero que el satélite registra como lluvia.



■ Lluvia Areal:

- Pajaroncillo (c), Alarcon (d), Contreras (e) and Sueca (f).



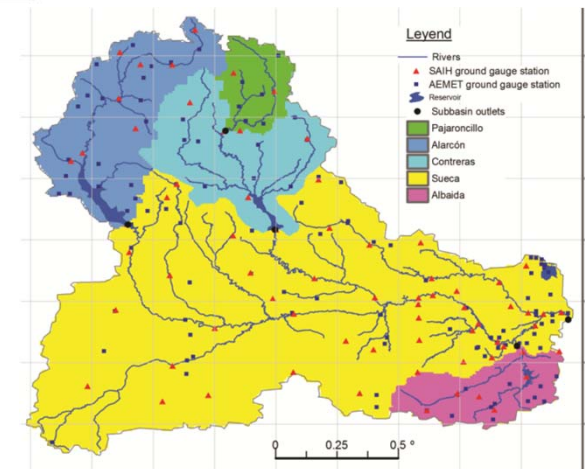
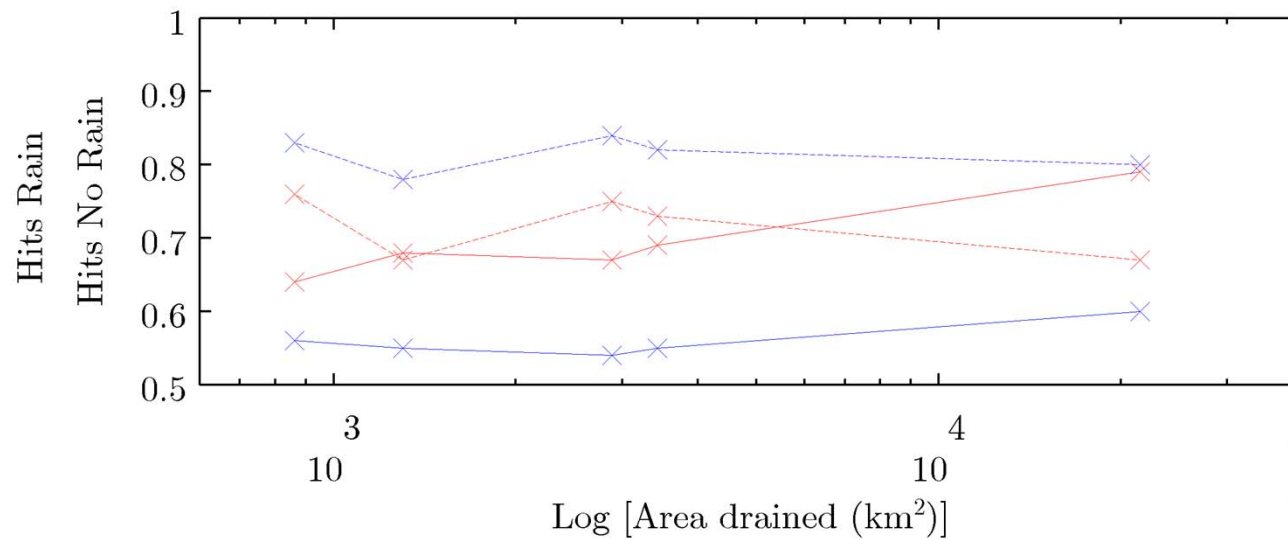
■ Lluvia Areal:

- A diferentes escalas de cuenca Pajaroncillo (861 km²), Albaida (1301 km²), Alarcon (2883 km²), Contreras (3427 km²), Albaida (1301km²) y Sueca (21523 km²), PERSIANN-CCS tiene mayor probabilidad de acierto de lluvia.

		Pajaroncillo				Alarcon				
		T1		T2		T1		T2		
Ground gauge	< 0.1	Predicción de lluvia < 0.1	0.83	0.17	0.76	0.24	0.84	0.16	0.75	0.25
		Hits "no rain"	0.44	0.56	0.36	0.64	0.46	0.54	0.33	0.67
	≥ 0.1	Predicción de lluvia ≥ 0.1								
		Misses rain	0.45	0.55	0.31	0.69	0.45	0.55	0.32	0.68
		Contreras				Albaida				
		T1		T2		T1		T2		
		0.82	0.18	0.73	0.27	0.78	0.22	0.67	0.33	
		0.45	0.55	0.31	0.69	0.45	0.55	0.32	0.68	
		Sueca								
		T1		T2						
		0.80	0.20	0.67	0.33					
		0.40	0.60	0.21	0.79					

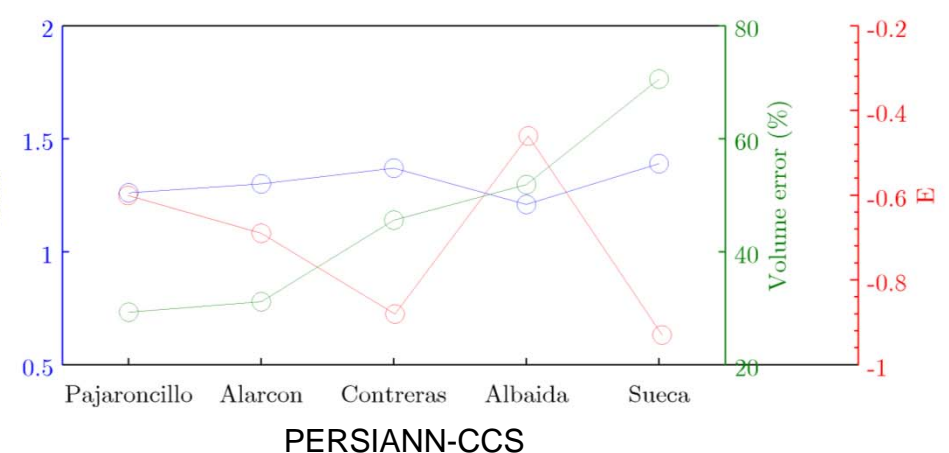
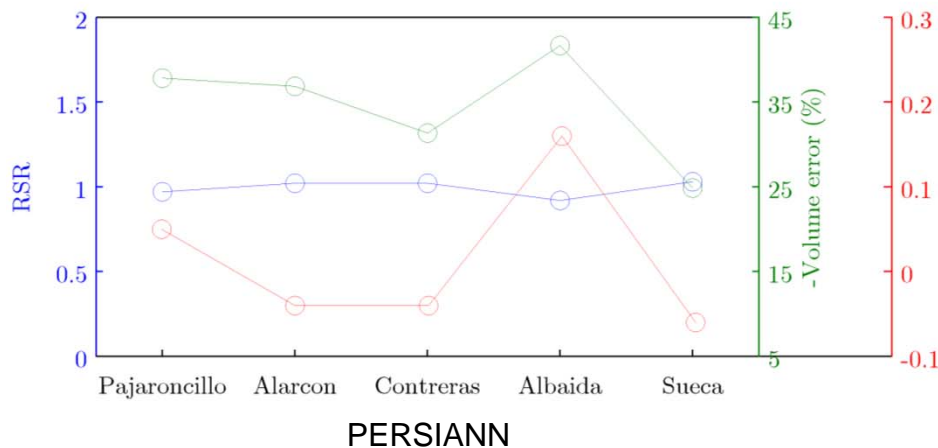
■ Lluvia Areal:

—×— Hits rain [T1] —×— Hits rain [T2] —×— Hits No rain [T1] —×— Hits No rain [T2]



■ Lluvia Areal:

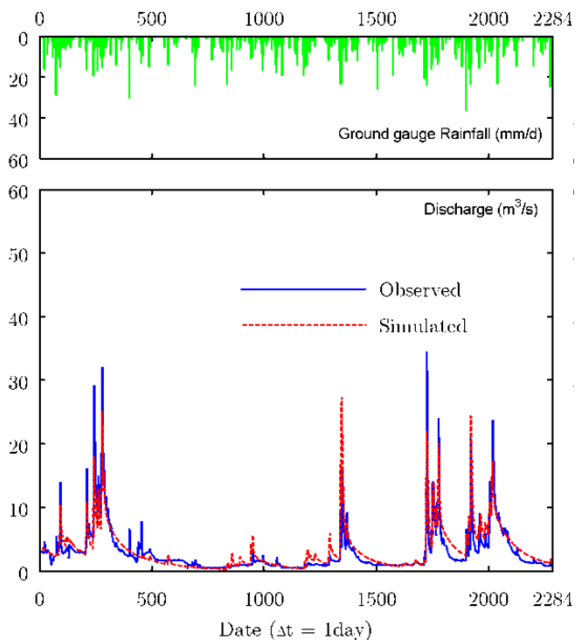
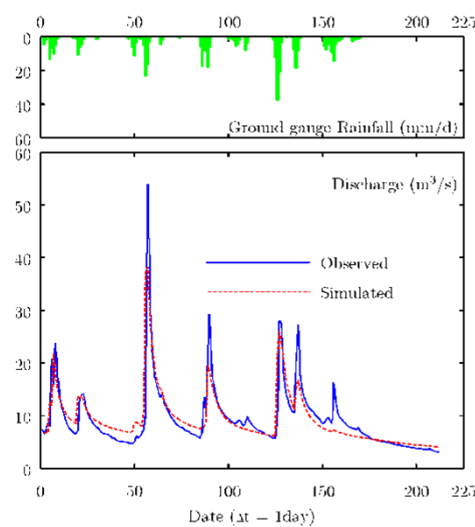
- Se obtiene Indices de Nash (E) que varían de -0.93 a 0.16, radio de RMSE-desviación estándar de observaciones (RSR) de 0.9 a 1.4 y error del volumen de -42 a 71%, dependiendo de la resolución de satélite.
- En el caso de cuencas pequeñas, tienen mejor RSR y E; también tienen mejor rendimiento en error del volumen pero solo con PERSIANN-CCS, excepto a 1301 km² (subcuenca cercana a la costa) debido posiblemente a que está afectada por lluvias mediterráneas inestables por SCM.



■ Calibración

- Calibración y validación con pluviómetros, se obtiene desempeño muy bueno, de acuerdo con ratings para E, RSR y error en volumen (0.80, 0.45 y 0.06%) en calibración y (0.79, 0.46 y 13.87%) en validación.
- El hidrograma simulado reconoce muy bien el flujo base y forma de curva de recesión, detecta picos y días en que ocurren pero subestima su valor en 26 % y esto podría estar relacionado con presencia kárstica cerca a la estación de aforo.

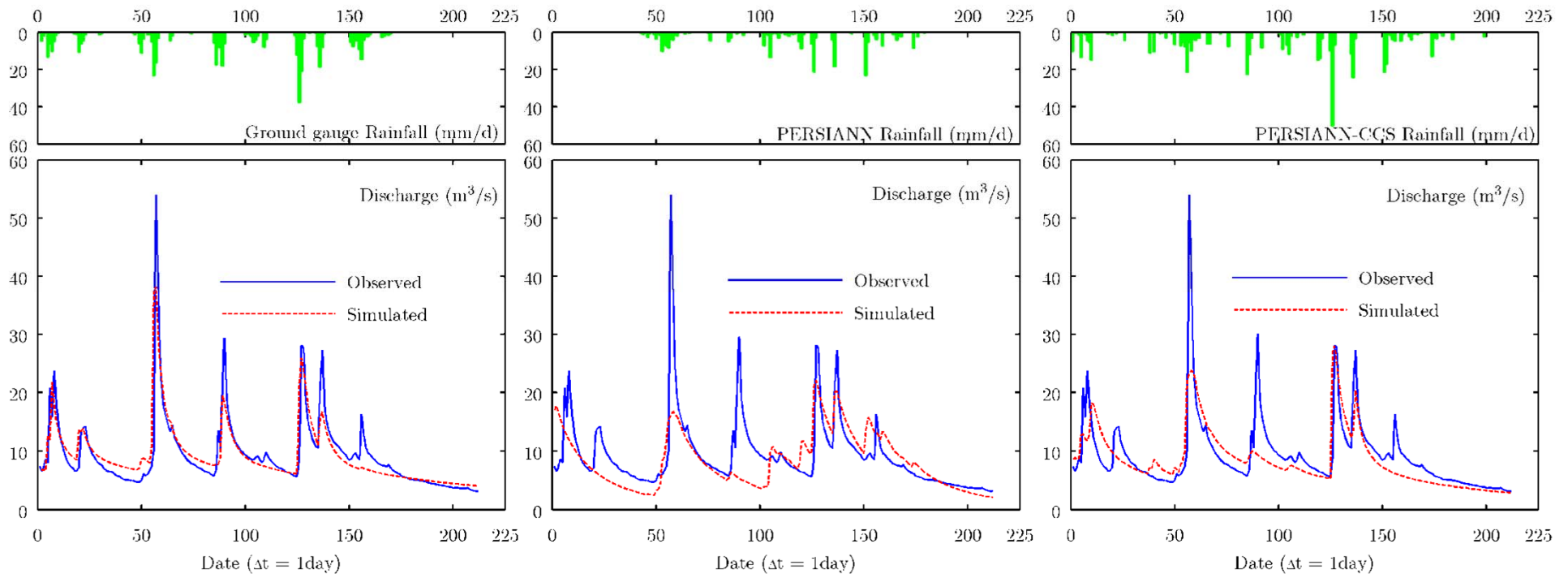
Correction factors	So	S1	S2
FC-1 Static storage	0.897	0.704	0.870
FC-2 Evapotranspiration	0.648	0.186	0.853
FC-3 Infiltration	0.925	0.558	0.726
FC-4 Direct runoff	0.004	0.001	0.003
FC-5 Percolation	0.114	0.016	0.024
FC-6 Interflow	494.897	113.524	118.891
FC-7 Groundwater outflow	0.000	0.000	0.000
FC-8 Base flow	2.002	9.594	2.985
FC-9 River channel velocity	0.834	0.621	0.537



■ Calibración

- Con lluvia PERSIANN se obtiene una pobre performance con índices estadísticos de E , RSR y error de volumen de 0.27, 0.85 y -10.48% en calibración.
- Con lluvia PERSIANN-CCS (30% más que con pluviómetros), se obtiene una aceptable performance, con valores de E , RSR y *error de volumen de 0.51, 0.70 y -7.55%*.
- Hidrograma simulado reconoce muy bien el flujo base y detecta la mayoría de picos y días en que ocurren los eventos, también reconoce el caudal máximo pero subestima su valor en 48%.

Efficiency indexes	Calibration at Pajaroncillo			-
	S1	S2	S3	
Volume error (%)	0.06	-10.48	-7.55	
E	0.80	0.27	0.51	
RSR	0.45	0.85	0.70	



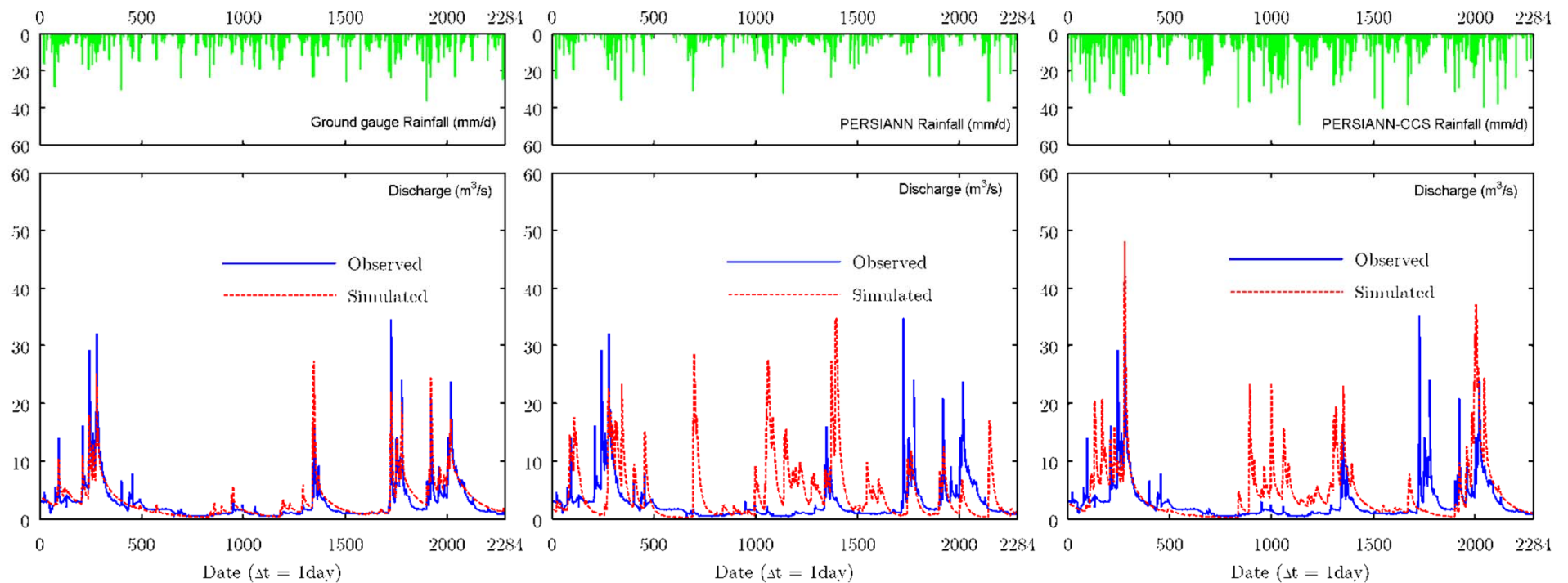
Estación Pajaroncillo

■ Validación Temporal

- Con lluvia PERSIANN se obtiene una pobre performance con índices estadísticos de E, RSR y error de volumen de -2.02, 1.74 y 54.08%
- Con lluvia PERSIANN-CCS (30% más de lluvia que con pluviómetros), se obtiene una pobre performance, con índices estadísticos de E, RSR y error de volumen de -0.90, 1.38 y 53.93%

Efficiency indexes	Temporal validation at Pajaroncillo		
	S1	S2	S3
Volume error (%)	13.87	54.08	53.93
E	0.79	-2.02	-0.90
RSR	0.46	1.74	1.38

Validación Temporal

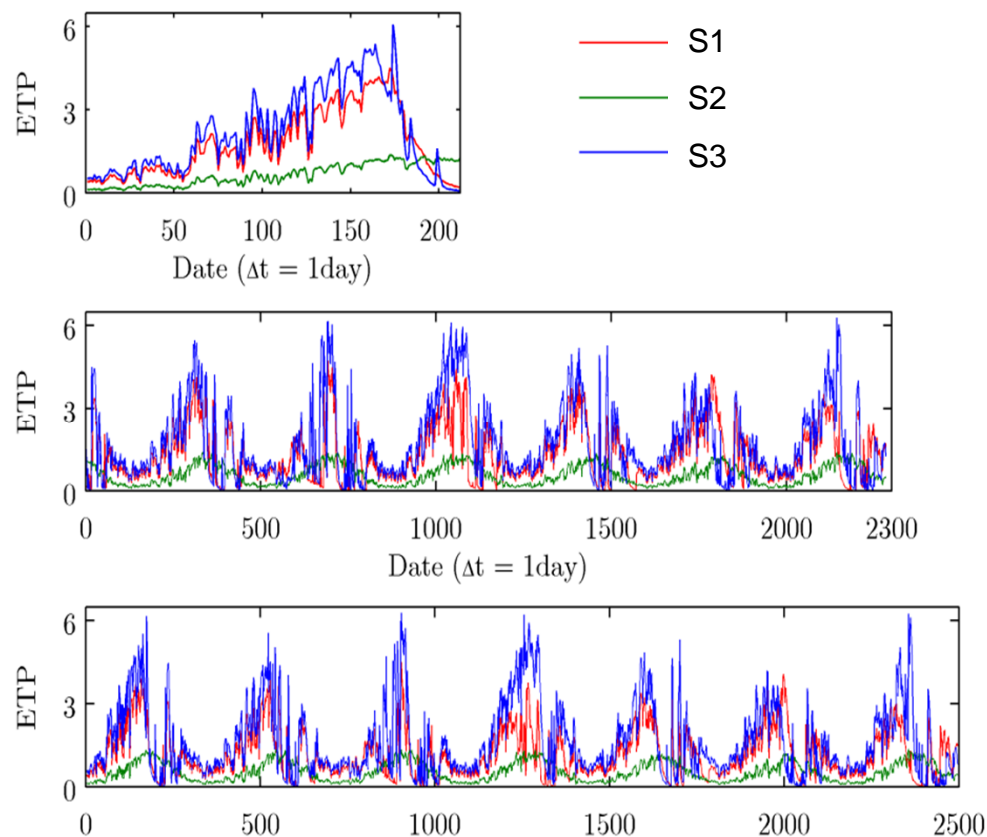


Estación Pajaroncillo

Balance en Pajaroncillo:

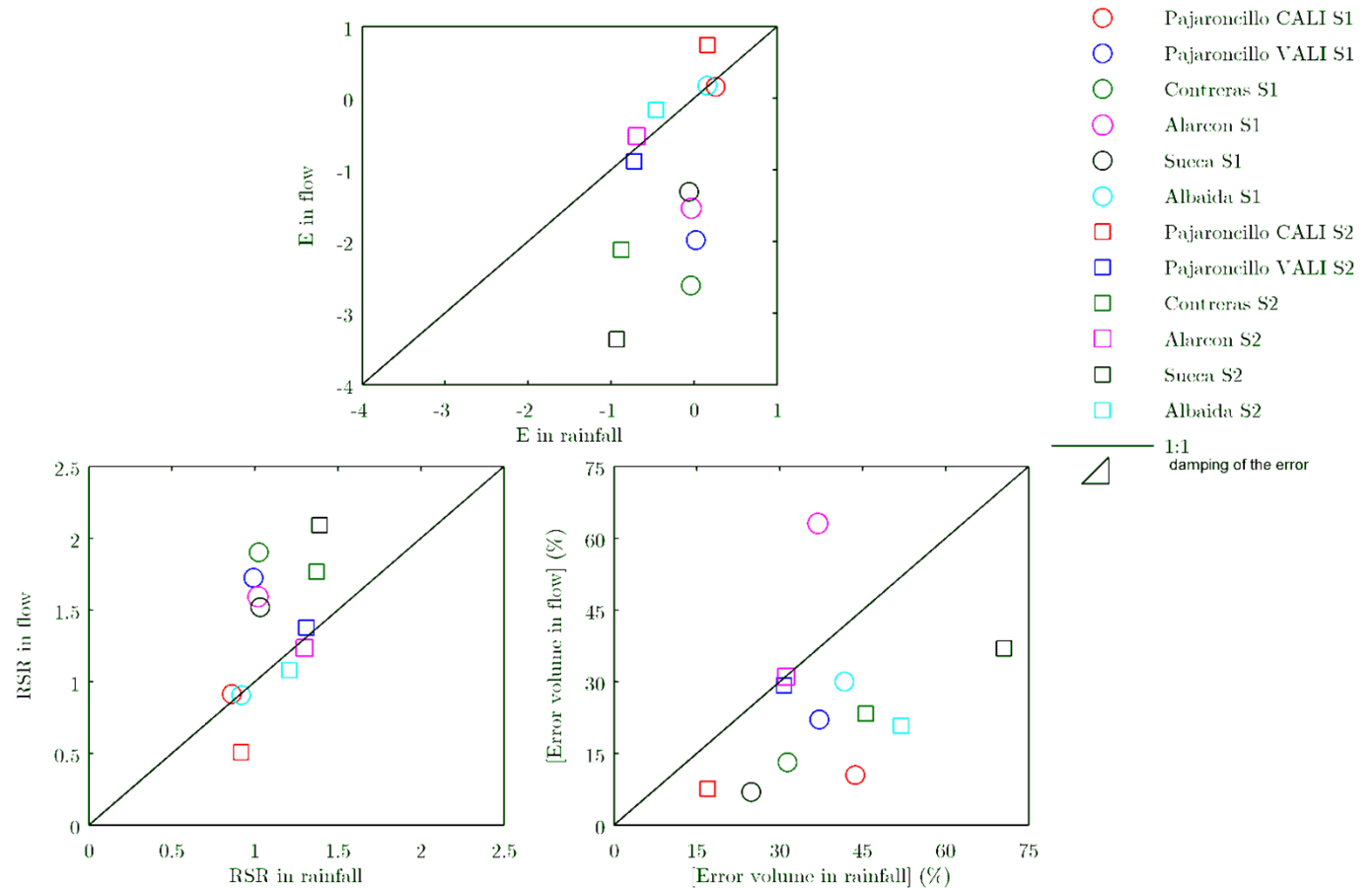
Water balance	S1	S2	S3
Rainfall (mm/d)	1.640	1.022	2.126
Real evapotranspiration (mm/d)	1.316	0.575	1.710
Observed flow (mm/d)	0.340	0.340	0.340
Simulated flow (mm/d)	0.377	0.473	0.474
Static storage (mm)	58.712	88.758	58.512
Surface storage (mm)	0.326	1.793	1.077
Gravitational storage (mm)	1.623	7.975	7.167
Aquifer storage (mm)	81.706	34.749	66.945
Overland flow (%)	17	24	28
Interflow (%)	9	11	10
Base flow (%)	74	65	62

01 Enero 2003 al 31 Octubre 2009



■ Propagación del Error

- Error en volumen de la lluvia se amortigua a través de la modelación hidrológica
- Error de la lluvia en términos de E y RSR, empeoran con la modelación hidrológica, excepto en cuencas pequeñas como Pajaroncillo (861 km²) y Albaida (1301 km²), que están relativamente ajustados con la línea 1:1



- Gran variabilidad entre correlaciones espaciales de lluvia estimada a partir de satélite y obtenida de pluviómetros. Zona montañosa la lluvia estimada de satélite tiende a subestimar a escala anual y sobreestimar a escala mensual. Zona costera tiende a sobrestimar con PERSIANN-CCS y subestimar con PERSIANN a escala anual. Subestima a escala mensual debido posiblemente a lluvias cálidas, y lluvias mediterráneas inestables por SCMs.
- A diferentes escalas de cuenca (861, 1301, 2883, 3427 y 21523 km²), la lluvia de satélite obtiene lluvias máximas con errores muy altos, sobrestimando con frecuencia lluvias ligeras.
- En modelación hidrológica, se obtienen pobres resultados con PERSIANN, mientras que con PERSIANN-CCS puede decirse que son aceptables en calibración. Es decir, el nuevo producto de estimación de la lluvia además de mejorar la resolución espacial también mejora en cuanto a su fiabilidad de uso en modelación hidrológica.
- La propagación del error de la estimación de la lluvia a la simulación hidrológica, en cuanto al error en volumen de la lluvia se amortigua a través del proceso de transformación lluvia-escorrentía, aunque el error de la lluvia en términos de E y RSR, empeoran con la modelación hidrológica.
- Necesario investigar las propiedades del error en una amplia gama de condiciones meteorológicas y regímenes climáticos

GRACIAS POR SU ATENCIÓN

Proyecto Consolider-Ingenio “SCARCE” para el Ministerio español de Ciencia e Innovación



Concejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica



Departamento de Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Agraria La Molina



Contacto:

Lia Ramos Fernández

E-mail: liarf@lamolina.edu.pe

Félix Francés

E-mail: ffrances@hma.upv.es

*Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y
Ambiental (GIMHA)*

<http://lluvia.dihma.upv.es>