

# Principios básicos de aplicación de la técnica de Fingerprinting a nivel de cuencas



**Proyecto** “Fortalecimiento de capacidades I+P+P para restaurar suelos degradados en la región oeste del Canal de Panamá” **Enero 2026**

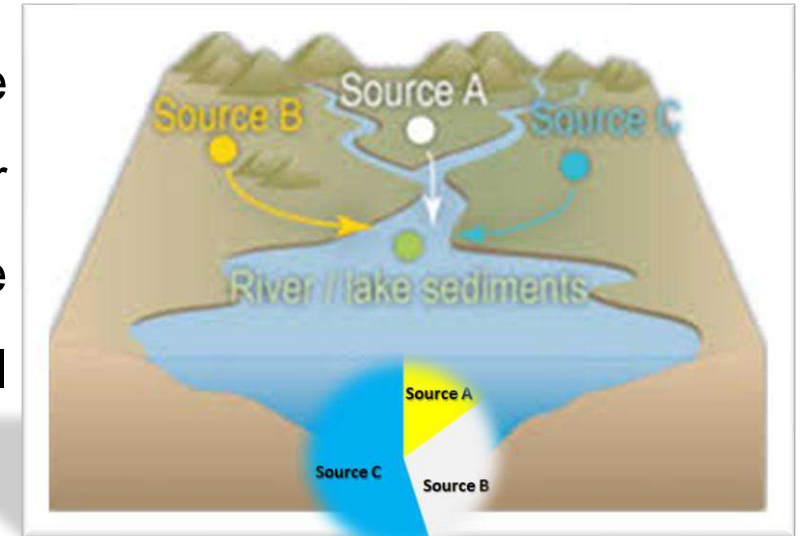
# Contenido

- Objetivo de la técnica Fingerprinting sedimentario
- Técnica CSSI
- Técnica FRX
- Comparativa CSSI vs FRX
- Conclusiones

# Alcance y objetivo de la técnica

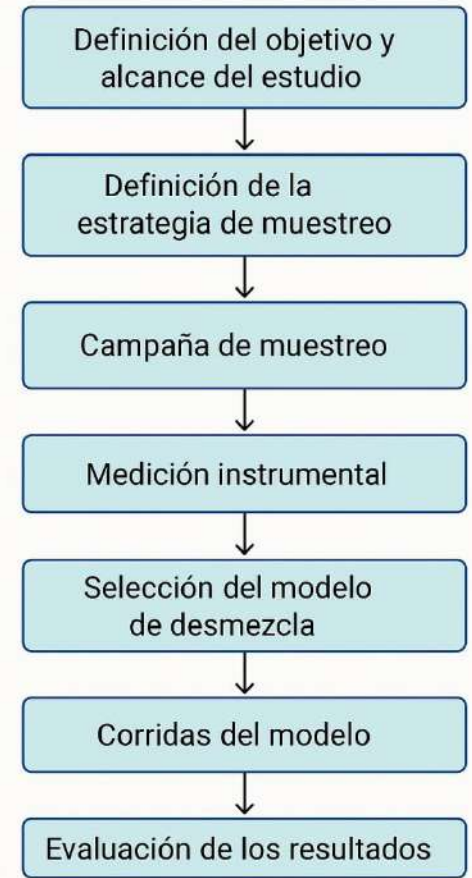
**Fingerprinting sedimentario (FPS).** Es una técnica que permite mediante el uso de **trazadores** seleccionados, poder identificar/discriminar los posibles aportes de sedimentos de **fuentes** a nivel de cuenca en puntos seleccionados (**mezclas**) del área de estudio.

Se ha utilizado en estudios de ecosistemas, de evaluación de la contaminación/sedimentación, de impactos de actividades humanas a nivel de cuencas hidrográficas apoyando las estrategias de gestión integrada de cuencas.



# Etapas principales de la técnica

- Cada una de las etapas son fundamentales para el logro de los objetivos de los estudios.
- Las etapas de la **definición de la estrategia de muestreo** y la selección de los **trazadores** durante las **corridas de los modelos** de desmezclas son críticas para reducir la incertidumbres de los resultados.



# Tipos de trazadores (Técnica Forense)

Se han evaluados entre otros:

- Color del sedimento
- Contenido de polen
- **Elementos químicos principales y a nivel de trazas**
- Elementos de tierras raras
- Mineralogía de las arcillas
- Contenido de materia orgánica
- Radionuclidos (FRN)
- Relaciones isotópicas de carbón y nitrógeno estables
- **CSSI**

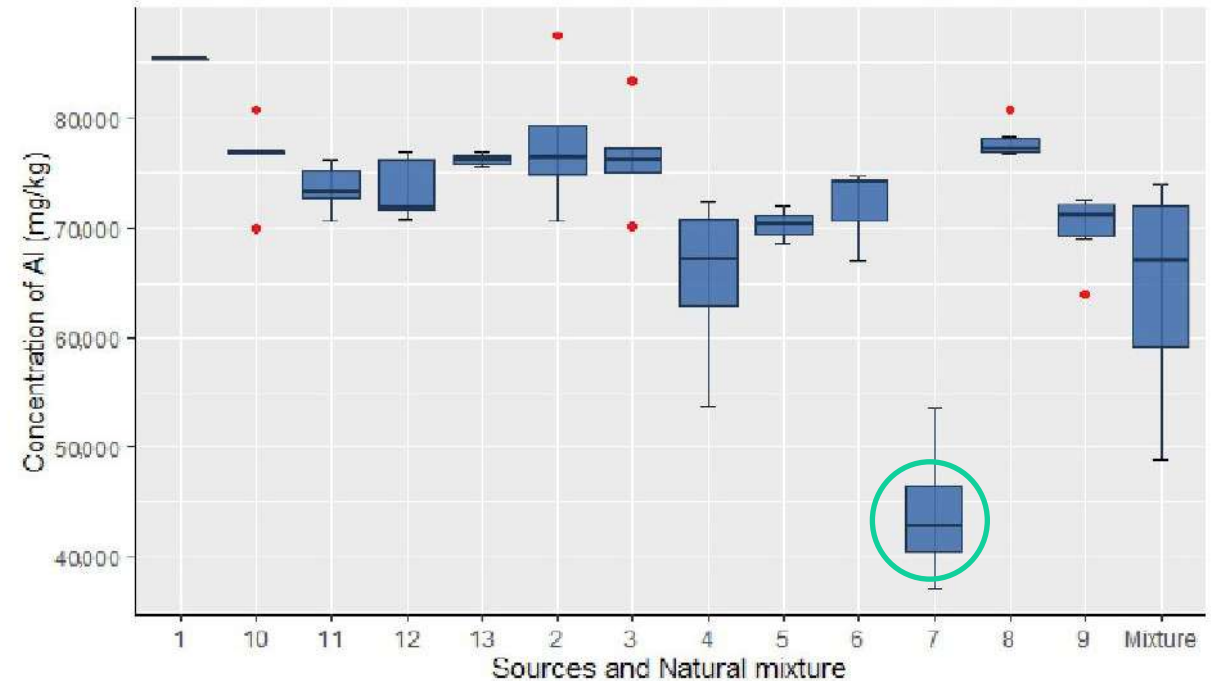
Se seleccionan los tipos de trazadores según:

- los objetivos del estudio
- las características de la cuenca y
- la disponibilidad de equipamiento analítico.

# Requisitos de los trazadores

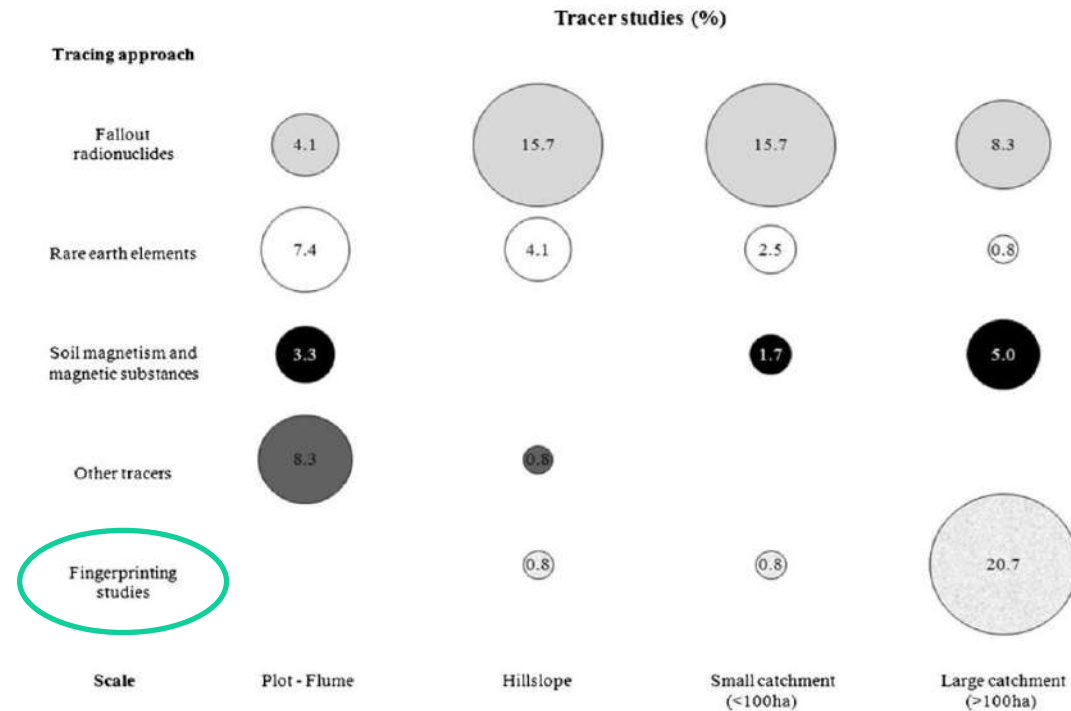
## Requisitos del trazador:

- Poder ser **medible** (en zonas de fuentes y de mezcla)
- Debe poseer una comportamiento **conservativo o no-conservativo predecible.**



**Aluminio:** trazador conservativo, el comportamiento de la **mezcla (mixture)** se justifica por los valores de las fuentes, sólo la fuente **7** esta fuera del rango.

# Estudios de trazadores vs escala de los estudios



La mayoría de los estudios FP son a nivel de cuencas (pequeñas y grandes)



**Técnica de los Compuestos  
Específicos de Isótopos Estables  
(CSSI)**

# Conceptos de la técnica CSSI

- El uso de la tierra se define por la comunidad de plantas/animales que viven sobre ella. Todas ellas producen un rango de bio-marcadores orgánicos específicos.
- Los bio-marcadores usados por la técnica CSSI son los ácidos grasos con longitudes de la cadena del carbono  $\delta^{13}\text{C}$  en el rango (C14:0) - 24 (C24:0) y mayores.
- Las firmas isotópicas (CSSI) después de unirse al suelo son estables y pueden sobrevivir cientos de años sin modificarse.
- Max Gibbs (2008) desarrolló la técnica CSSI para identificar origen de los suelos en sitios de depósito, determina la fuente de erosión y permite establecer medidas de conservación. En Latinoamérica su empleo es más reciente (2014).

# Conceptos de la técnica CSSI

- Los ácidos grasos etiquetan las partículas del suelo con una firma isotópica estable específica para la flora/fauna que crece en él.
- Los eventos de erosión mezclan el suelo (proveniente de diferentes usos de la tierra) en la zona de deposición de sedimentos.
- La técnica de CSSI “lee” la firma isotópica estable de cada ácido graso en la mezcla del sedimento.
- Se usan modelos de mezclas para determinar cuanto de cada suelo está presente en la mezcla.

# Protocolo de muestreo

Los dos tipos mas comunes de muestras que necesitan ser colectadas son:

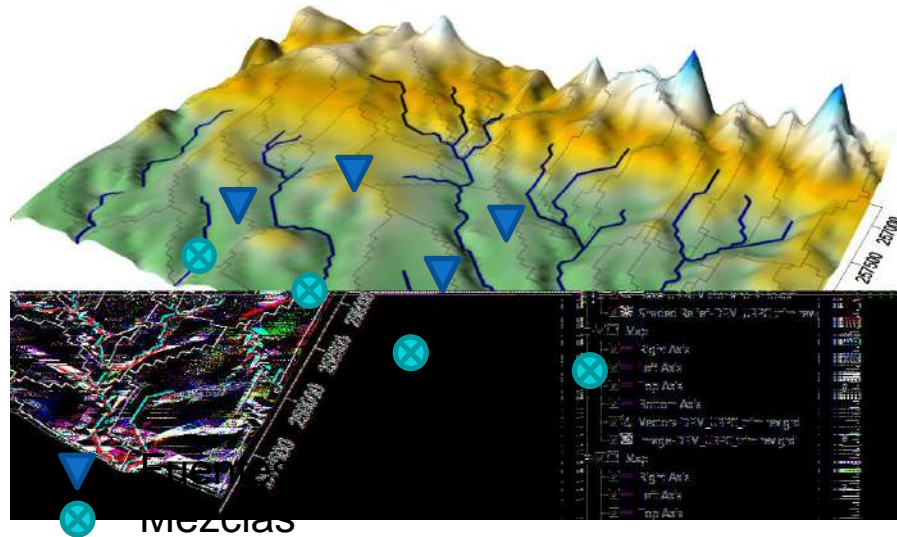
- **Fuente u origen** del sedimento de un uso de suelo especifico (para la librería de referencia). Fuentes
- **Sedimento depositado** en un cauce del río o en una llanura de diluvio o el estuario. Mezclas.

Al rastrear la redistribución del sedimento abajo del cauce del río, la muestra río arriba, se vuelve una **fuentes** para el sitio río abajo.

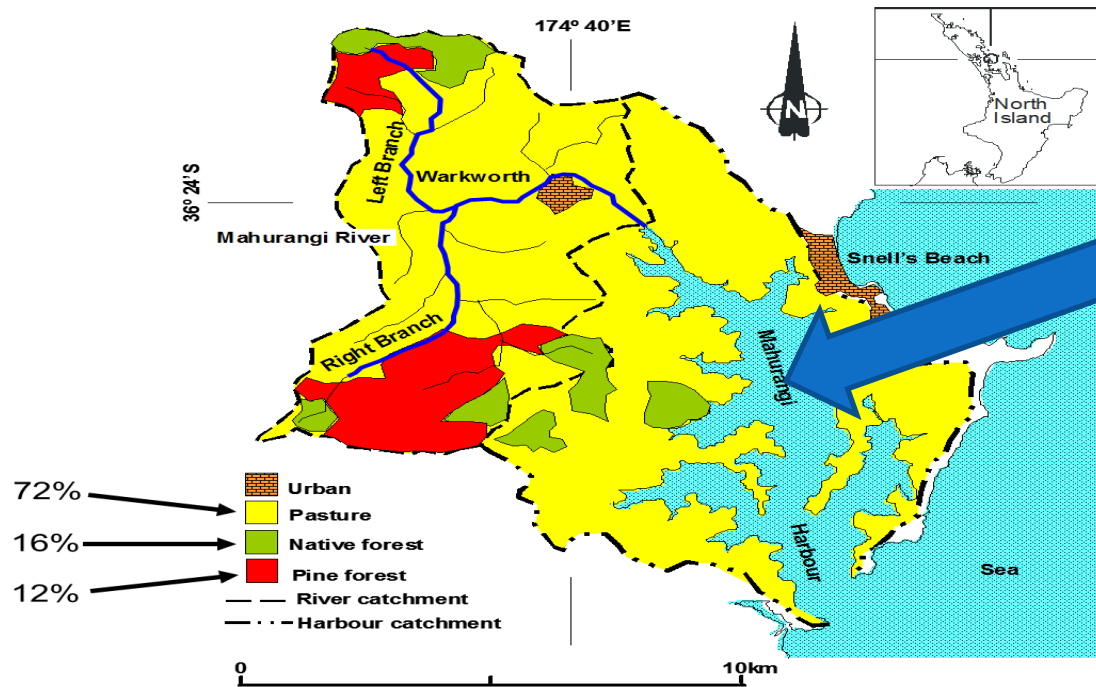
# Identificación de posibles fuentes

- Características distintivas (uso de suelos, **geología**, propiedades de suelo, geomorfología, etc)
- Ubicación. Cuencas, subcuencas, zona de captación de la cuenca, puntos aguas arriba y aguas abajo

Se debe tener en cuenta las posibles características del área de estudio que puedan afectar la interpretación de los resultados (Contaminación química, etc)



# Objetivo. Evaluar el papel en la sedimentación de los usos de suelos



**Cuáles son los diferentes aportes en los sedimentos de la desembocadura?**

# Estrategia de muestreo

- Se identifican y muestrean puntos fuentes (sources) y de mezclas (mixtures, tracers)
- **Fuentes.** Areas de interes para evaluar su posible influencia o sus aportes de sedimentos en una cuenca. Ej. Zona de pastos, agricultura, bosques, carreteras no pavimentadas, etc.
- **Mezclas.** Puntos donde se desea conocer los posibles aportes de sedimentos provenientes de las diferentes fuentes. Ej. Depositos de sedimentos en ríos, canales, presas, etc.
- Muestra de suelos/sedimentos, muestras compuestas en un área de 100 m<sup>2</sup> y 3 cm de profundidad
- Necesidad de realizar **réplicas** de fuentes y mezclas
- Se envasan y etiquetan las muestras

# CSSI muestreo de campo



# Preparación de las muestras

## Suelos

- Secado al aire
- Desagregado mecánico
- Tamizado (2 mm)
- Encapsulado para análisis de laboratorio

## Sedimentos

- Secado al aire
- Desagregado mecánico
- Tamizado (63  $\mu\text{m}$ )
- Encapsulado para análisis de laboratorio

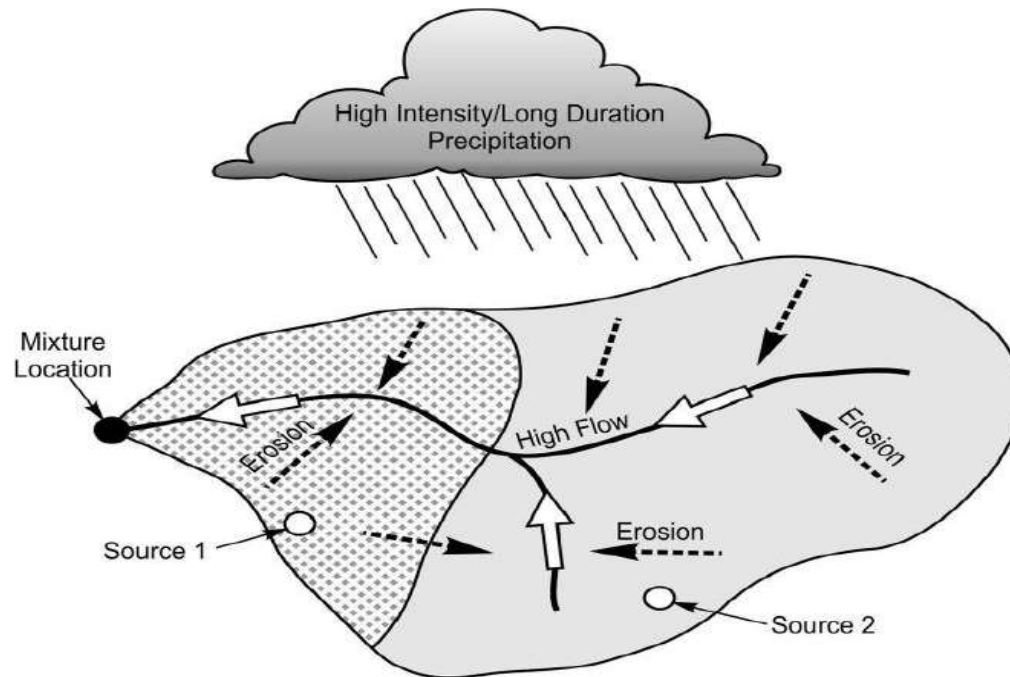
# Información relevante

Relevante para la estrategia de muestreo (fuentes/mezclas), corridas de los modelos e Interpretación de los resultados.

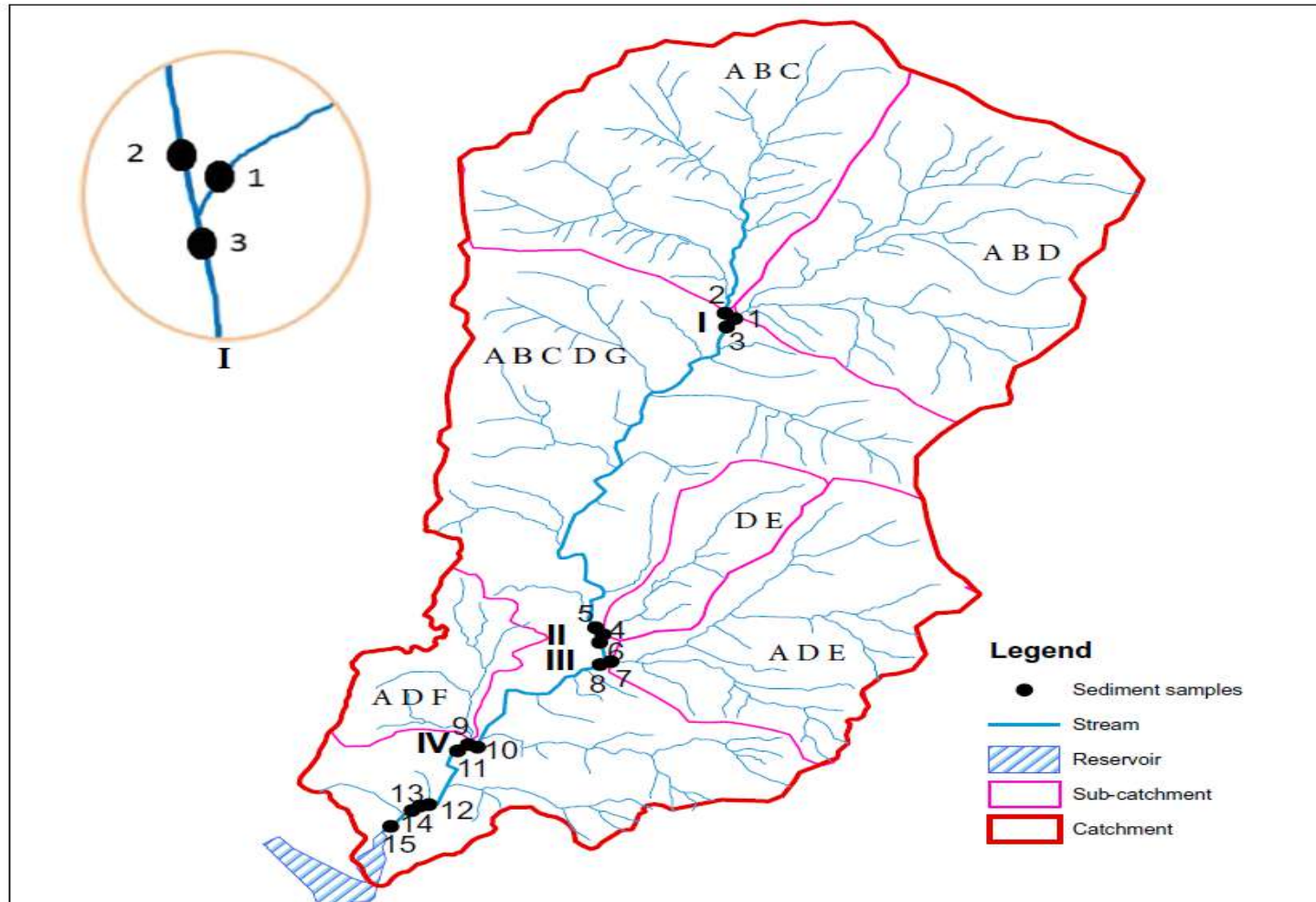
- Hidrografía, cuencas, subcuencas, microcuencas
- Relieve, usos de suelos, geología, estudios locales, cargas de sedimentos, etc.
- Información histórica de la región (socioeconómica, asentamientos, etc)

# CSSI. Muestreo

- Basado en información y estudios previos clara definición de las fuentes de sedimentos.
- Cultivos, hotspots, infraestructuras, etc.
- Realizar réplicas de muestras en las fuentes y puntos de mezclas.

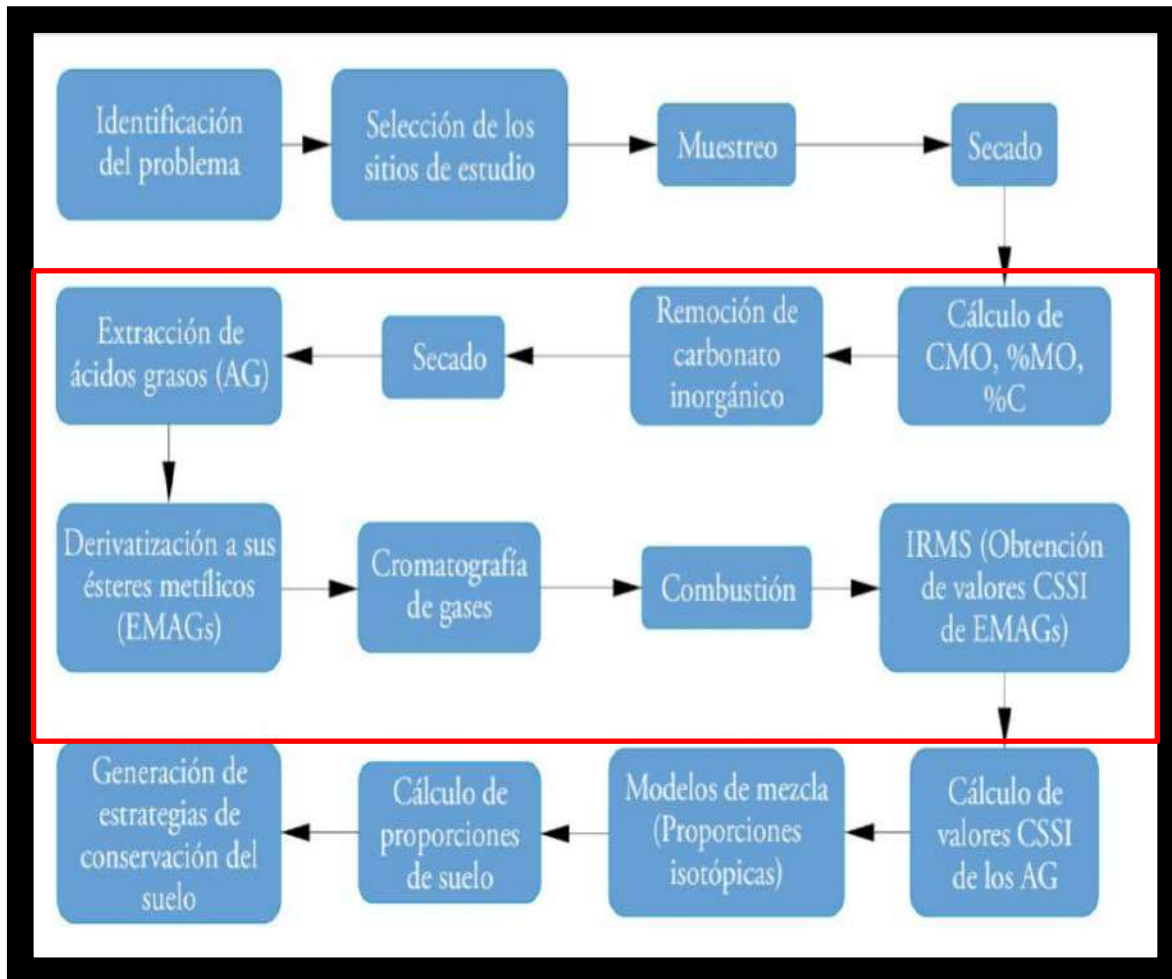


# CSSI. Muestreo



- División espacial del área de estudio (cuencas, subcuencas, etc)

# Análisis de laboratorio de (CSSI)



Las muestras se miden en un espectrómetro de masa de relaciones isotópicas (IRMS)

# Resultados análisis. Ácidos grasos

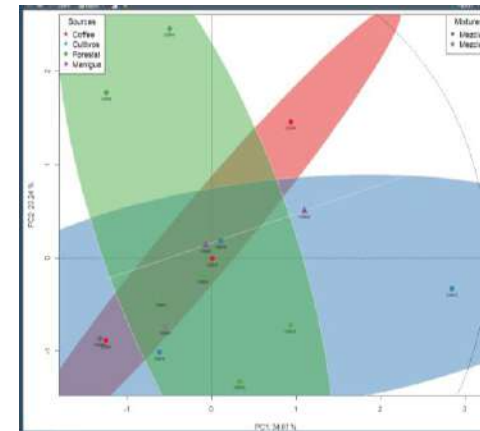
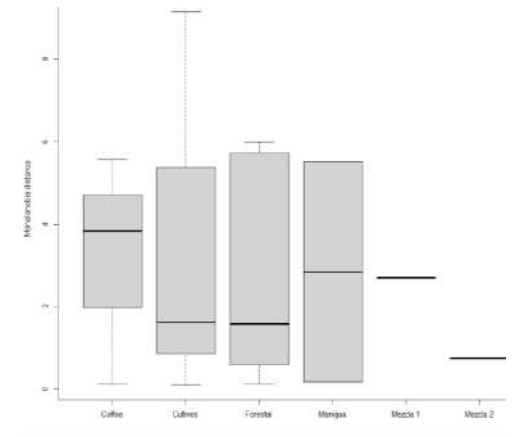
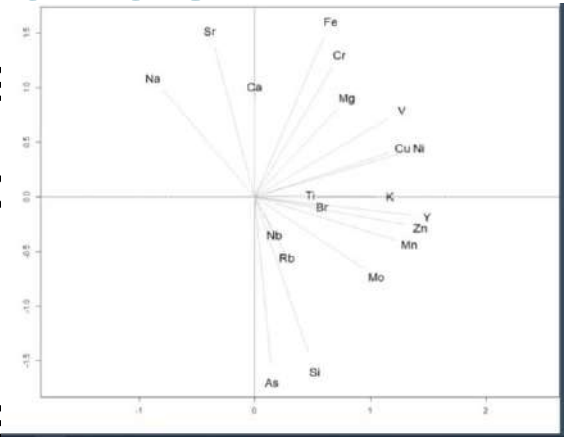
Table 3. Isotopic ratio measurements of carbon chain fatty acids.

Sample	$\delta^{13}\text{C}$	C14:0	C15:0	C16:0	C17:0	C18:0	C19:0	C20:0	C21:0	C22:0	C23:0	C24:0	C25:0	C26:0	C27:0	C28:0	C29:0	C30:0	C31:0	C32:0	C33:0	C34:0
PAN-F01	-26.45	-35.31	-31.32	-30.5		-30.31	-32.72	-33.18		-35.97	-36.71	-35.78	-37.7	-36.21	-38.01	-35.91	-37.42	-35.5	-37.91	-36.03	-38.42	-35.87
PAN-F02	-23.16	-26.2		-25.98		-25.88		-24.77		-27.38	-25.73	-26.74	-29.41	-28.64	-31.5	-27.94	-33.12	-29.75	-33.36	-32.18	-33.28	-30.82
PAN-F03	-19.71	-18.81		-17.69	-19.46	-19.87		-20.3	-22.51	-23.66	-22.79	-24	-26.95	-27.17	-31.52	-27.95	-32.62	-29.11	-31.62	-30.8	-30.51	-28.09
PAN-F04	-18.22	-21.72		-19.14	-18.71	-20.35	-17.47	-20.12	-21	-21.25	-21.27	-22.46	-25.67	-25.28	-29.47	-26.14	-32	-27.53	-31.24	-29.04	-29.57	-26.28
PAN-F05	-21.28	-26.33	-25.54	-24.6	-24.06	-25.32	-24.31	-25.61		-27.15	-26.41	-26.67	-29.51	-27.71	-30.76	-27.5	-32.67	-29.09	-32.94	-31	-31.24	-28.68
PAN-F06	-23.13	-21.1		-19.81		-21.77		-23.05		-26.4	-25.48	-27.48	-29.81	-29.7	-34.09	-30.55	-35.57	-31.09	-35.83	-34.04	-35.98	-32.48
PAN-F07	-28.71	-33.31	-31.46	-30.1	-31.55	-29.42	-27.56	-34.15	-35.61	-34.17	-35.24	-32.45	-35.56	-33.38	-36.28	-35.18	-37.14	-36.88	-37.28	-36.57	-38.24	-35.64
PAN-F08	-26.36	-30.77	-29.82	-28.56	-29.83	-29.22	-31.4	-31.04	-35.36	-34.48	-34.22	-32.54	-34.31	-32.7	-34.44	-30.8	-34.78	-33.68	-35.47	-34.39	-36.51	-34.48
PAN-F09	-24.64	-27.45	-28.06	-25.85	-28.95	-27.51	-29.1	-29.25	-	-31.91	-31.36	-32.72	-34.58	-34	-36.26	-34.05	-36.53	-34.53	-36.28	-34.62	-36.11	-33.29
PAN-F10	-28.53	-33.89	-31.71	-29.05	-32.17	-29.99	-33.54	-35.05	-37.37	-36.2	-38.05	-35.92	-38.38	-36.6	-38.5	-36.67	-38.63	-37.57	-38.81	-37.56	-39.81	-37.92
PAN-M01	-28.46	-34.37	-32.86	-29.38	-33.22	-30.98	-35.02	-35.36	-36.68	-36.72	-37.84	-36.34	-38.08	-36.55	-37.87	-36.88	-38.78	-37.37	-39.43	-37.93	-40.54	-39.15
PAN-M02	-28.73	-31.96	-33.09	-30.2	-34.07	-31.16	-33.73	-36.8	-38.99	-36.99	-38.97	-36.96	-38.67	-36.34	-37.45	-36.36	-38.5	-37.31	-39.56	-37.9	-40.67	-39.07
PAN-M03	-28.85	-36.01	-35.62	-34.67	-36.01	-33.66	-35.02	-35.86		-36.18	-37.9	-35.26	-38.65	-36.86	-38.78	-37.23	-39.19	-37.8	-39.75	-38.14	-40.72	-39.5
PAN-M04	-29.44	-32.63	-34.13	-27.91	-33.95	-28.86	-32.71	-36.7	-38.63	-36.58	-38.81	-36.85	-38.97	-37.28	-37.92	-36.72	-38.56	-37.44	-38.56	-37.69	-40.37	-39.02
PAN-M05	-27.34	-31.84	-30.4	-26.58	-30.96	-28.64	-31.52	-32.16	-34.84	-34.55	-35.56	-34.47	-37.04	-36.08	-37.61	-35.88	-38.35	-36.2	-38.6	-36.46	-39.04	-35.85

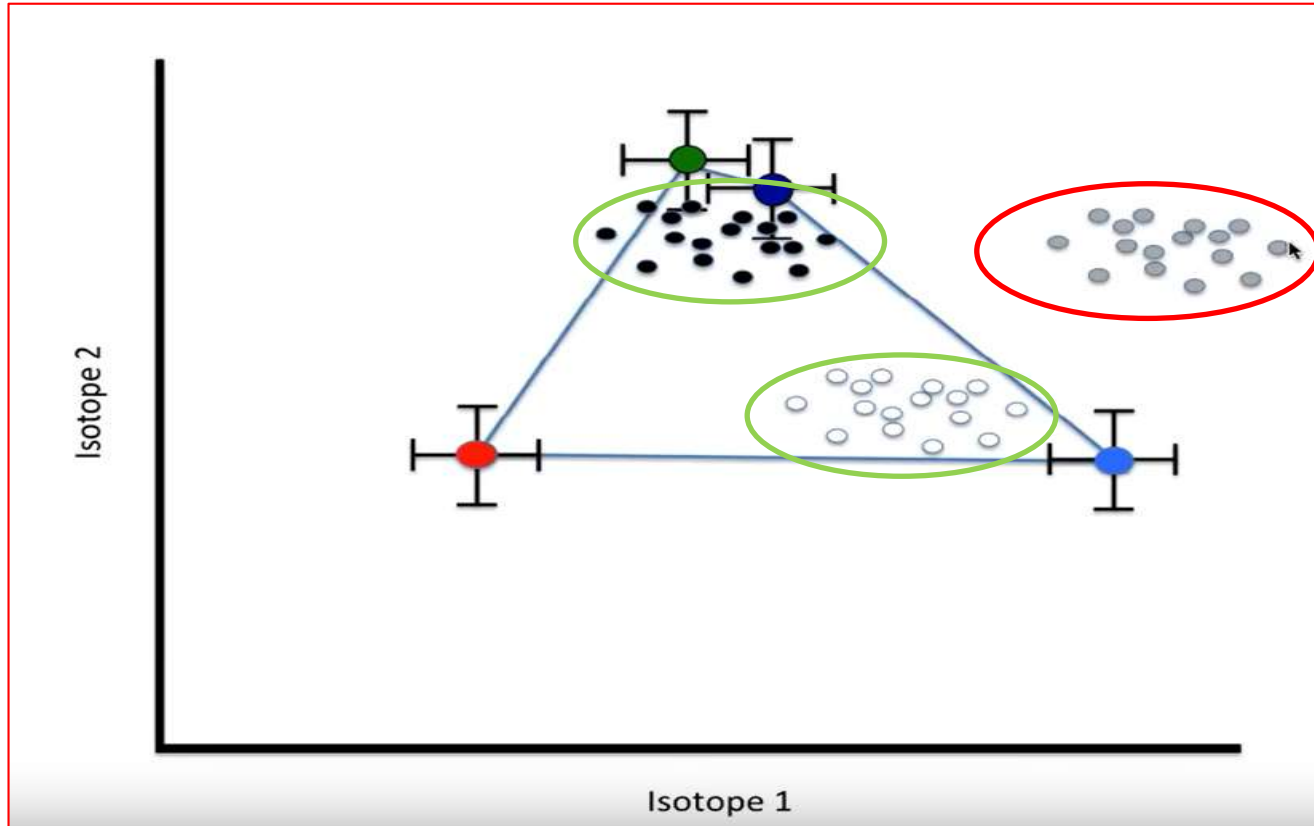
- De los datos de relaciones isotópicas medidos se deben seleccionar los que son más representativos como trazadores, Ex. algunas cadenas del carbono se asocian a bacterias (**C17:0, C19:0, C21:0**) y no a plantas.
- Se realiza un **procesamiento estadístico** para evaluar cuales son más representativos para los distintos tipos de usos de suelos presentes en el área de estudio.

# Análisis estadístico de los trazadores

- Existe la necesidad de **discriminar/distinguir** cuales de los elementos medidos pueden ser empleados como trazadores (**fingerpint**) del sedimento.
- Este análisis se puede realizar mediante técnicas estadísticas incluidas en cualquier paquete estadístico. **Técnica Kruskal-Wallis, Análisis de funciones discriminantes, gráficos boxplots, análisis de rangos, componentes principales, etc..**

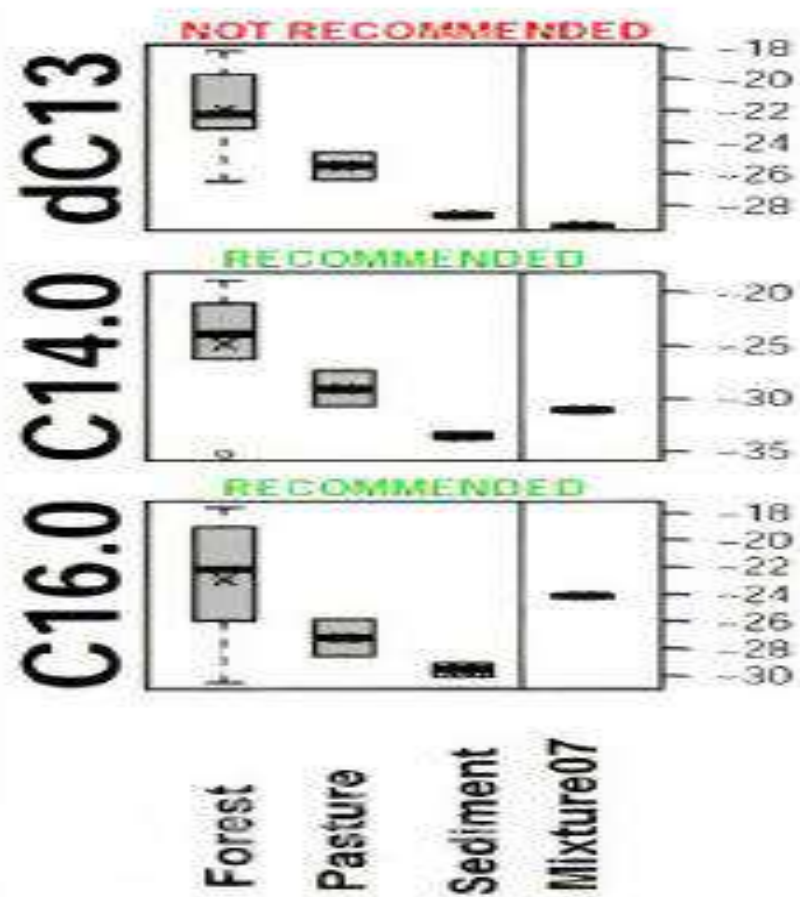


# Selección de isótopos 1/3



Las muestras deben quedar dentro de polígono formado por las distintas fuentes evaluadas en el estudio.

# Selección de isótopos 2/3



- Los gráficos box-plot pueden ayudar a evaluar el comportamiento de los rangos de los valores isotópicos presentes en las fuentes y mezclas, la relevancia de las variables ( $C_{18.0}$ , K, Al...) para evaluar los aportes de las distintas fuentes

# Selección de isótopos (CSSI) 3/3

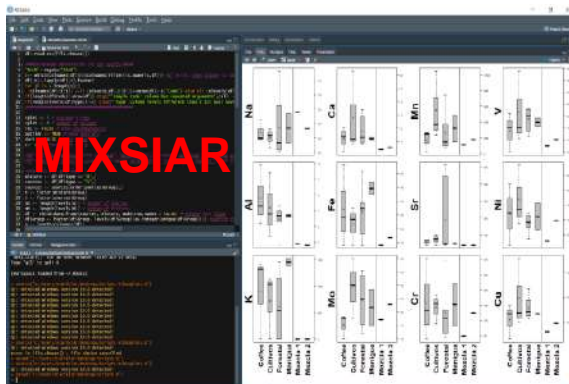
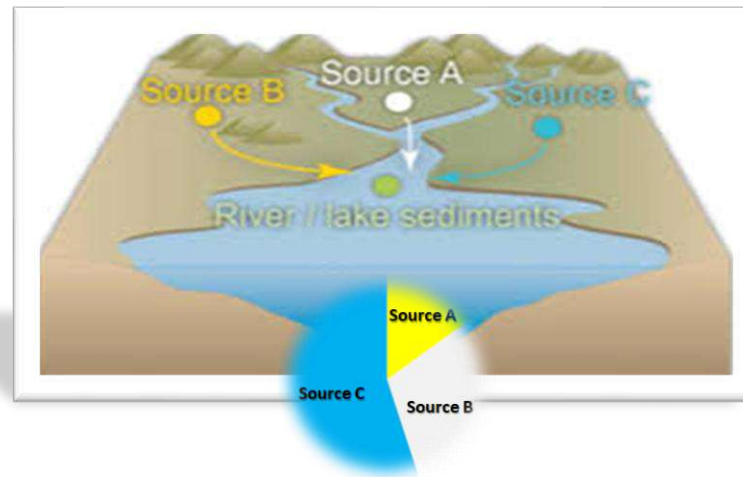
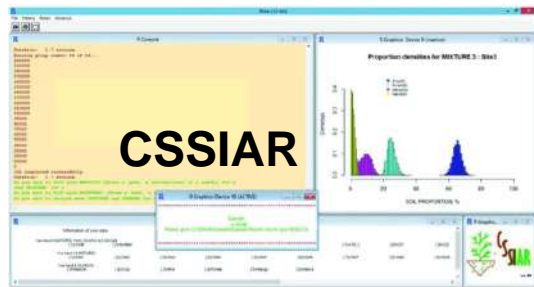
- Algunos recomiendan cadenas de ácidos grasos con cadenas de más de 22 carbonos
- Se deben evaluar su representatividad en los análisis y no descartar antes de tiempo de la corrida

Otros criterios (a valorar, no obligatorias)

- Isótopos de ácidos grasos (AG) de cadenas largas (mayores de C12; otros estudios recomiendan usar cadenas ultra largas, mayores de C22)
- No usar AG con número impar de carbono (C13, 15, 17, 19, 21 y 23) mayormente producidos por bacterias

# Aplicación de modelos de mezclas

- Utilizan los resultados CSSI ( $\delta^{13}\text{C}$ )
- Modelos de mezclas que permitan **discriminar** en los puntos de mezclas los aportes de las diferentes fuentes.
  - IsoSource
  - SIAR, CSSIAR
  - MIXSiar, FingerPro



- Modelo bayesiano de mezclas
- Corre sobre el programa R (estadístico) de código abierto
- Implementado con varios códigos para poder identificar las trazas más relevantes para poder discriminar los aportes.

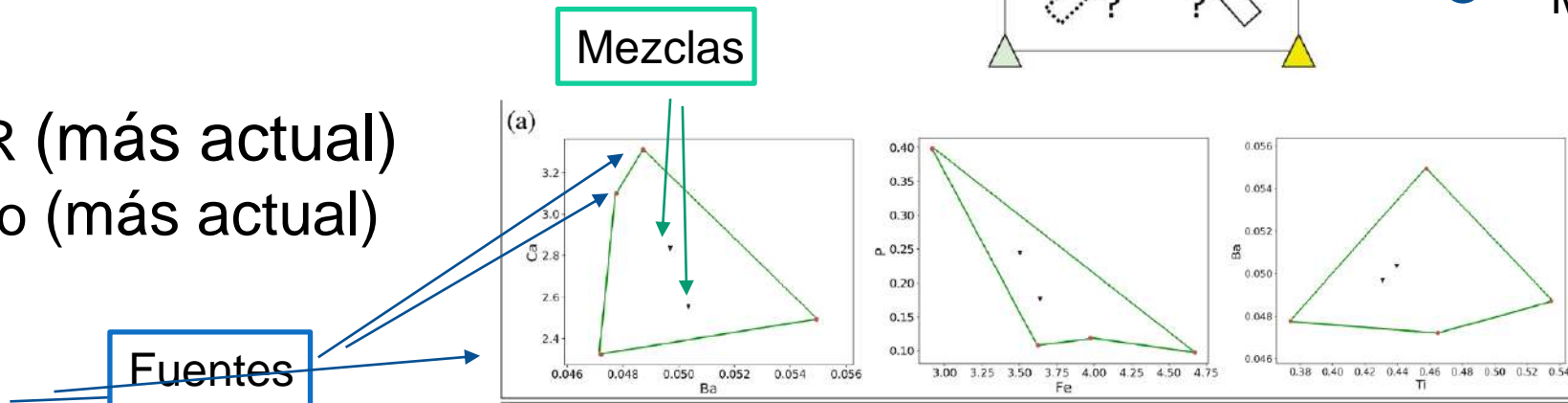
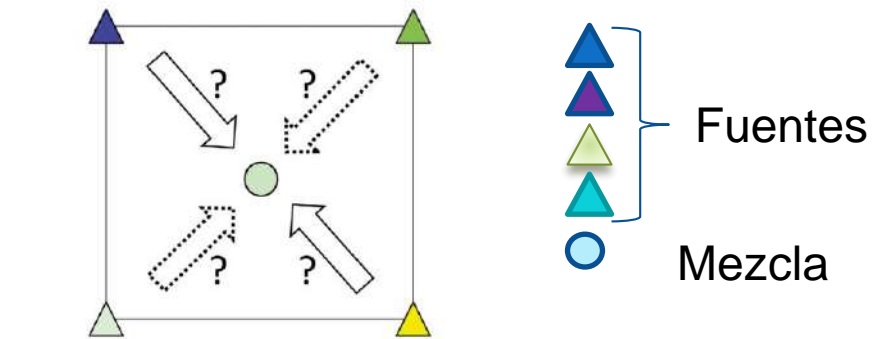


# Aplicación de los modelos de mezclas

- Para poder identificar los aportes de las diferentes fuentes de sedimentos es necesario emplear los **modelos de mezclas**, estos modelos tienen como **objetivo** determinar **la proporción** del componente **fuentes** en las **mezclas** de sedimentos, minimizando los errores.

Algunos modelos utilizados:

- IsoSource (relaciones isotópicas)
- SIAR
- SedMC
- CSSIAR
- MIXSIAR (más actual)
- Fingerpro (más actual)

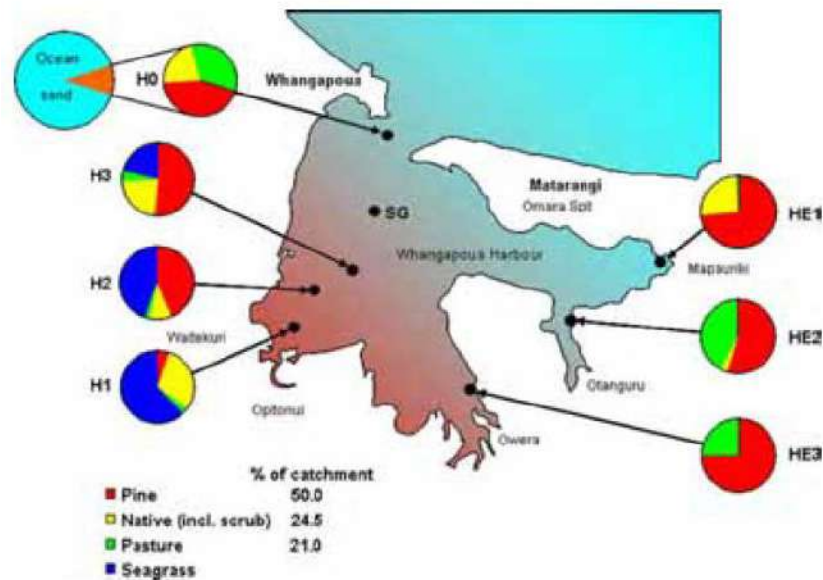


Fuente: Romina, et al. 2018

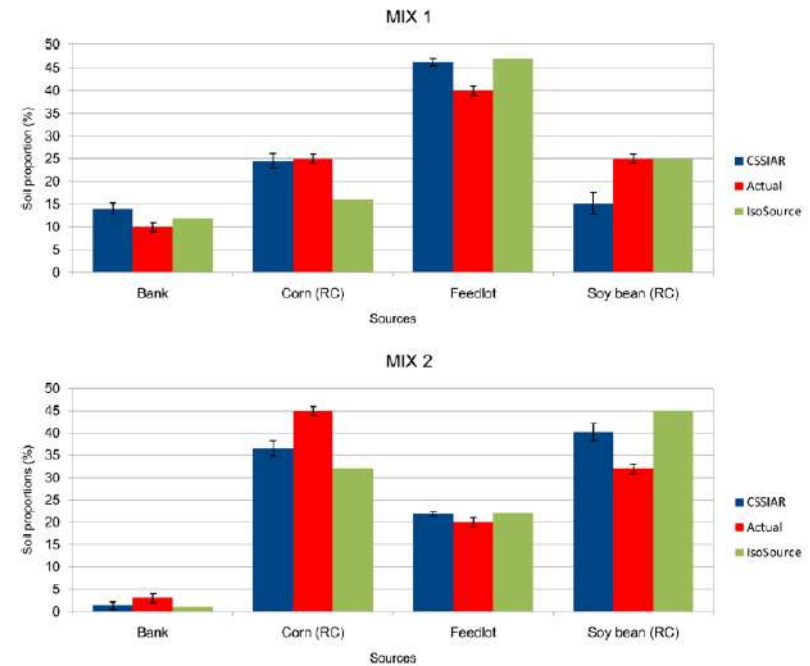
Los puntos de mezclas deben quedar dentro de los polígonos en los gráficos conformados por las fuentes, el modelo puede discriminar la proporción de cada fuente.

# Interpretación de los resultados

- Los resultados de los modelos de mezclas permiten identificar los aportes de las diferentes fuentes de sedimentos en los puntos de mezclas en la cuenca bajo estudio.



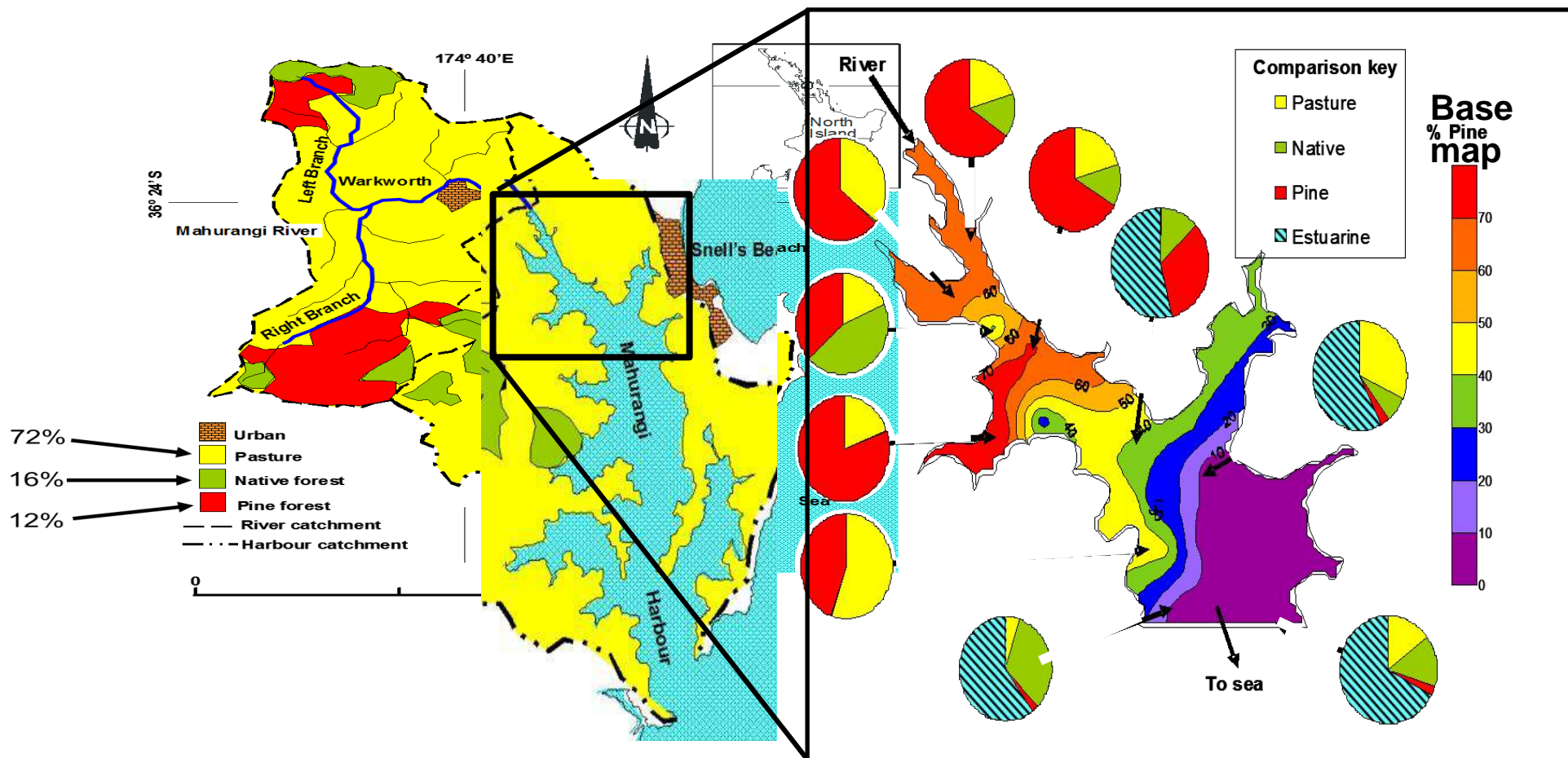
Fuente: Max Gibbs, 2018



Fuente: Romina, et al. 2018

Se presentan como **aportes porcentuales** de cada **fuentes** en los puntos de **mezclas**, se debe evaluar la factibilidad de los resultados, según las características del área de estudio.

# Ejemplos de Resultados (CSSI)



Cuáles son los aportes de los diferentes usos de suelos?

# Posibles aplicaciones de la técnica CSSI

- Distinguir los aportes de diferentes usos de la tierra en función de las diferencias en los ácidos grasos producidos por las comunidades de plantas.
- Identificar los pastos utilizados por diferentes animales asociados a su alimentación.
- Distinguir las fuentes de sedimentos procedentes de la tierra o del mar
- Estas diferencias permiten que la técnica CSSI identifique y distribuya las fuentes del suelo en función del uso de la tierra que contribuyen a la generación de sedimentos provenientes de una zona de erosión.
- La técnica CSSI puede apoyarse por técnicas que emplean elementos químicos estables (FRX) hasta 40 elementos químicos para identificar fuentes de sedimentos.



# **Técnica de Fingerprinting usando elementos químicos (FRX)**

# Fingerprint (Elementos químicos, FRX)

Esta técnica complementaria se basa en principios semejantes a CSSI, el suelo posee una huella **geoquímica específica** que puede utilizarse para evaluar el impacto de los diferentes usos de suelos. **Esta técnica es menos precisa que CSSI, pero más barata.** El **pre-tratamiento y el análisis de laboratorio** es diferente, el resto de la metodología con elementos químicos es similar a CSSI,

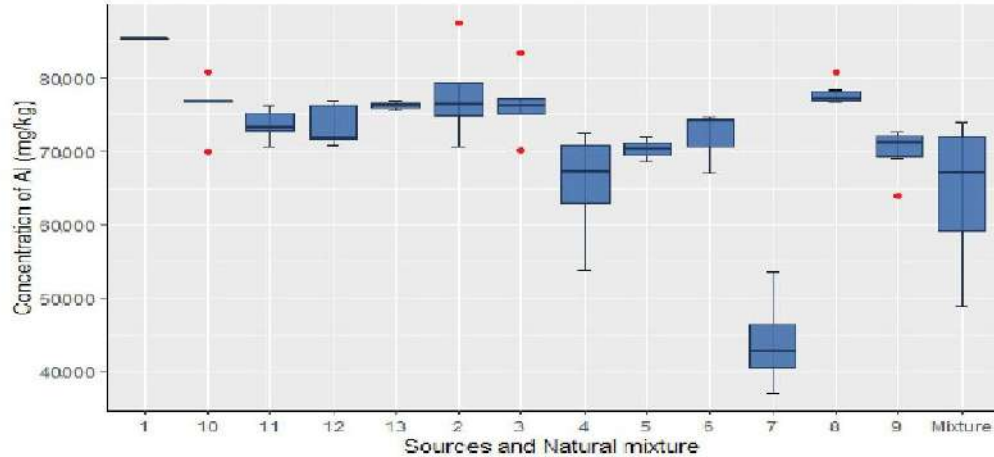
- Muestreo (Fuentes y Mezclas).
- Modelos de mezclas.
- Interpretación de los resultados.

# Fingerprint. Elementos químicos

Principales elementos químicos empleados

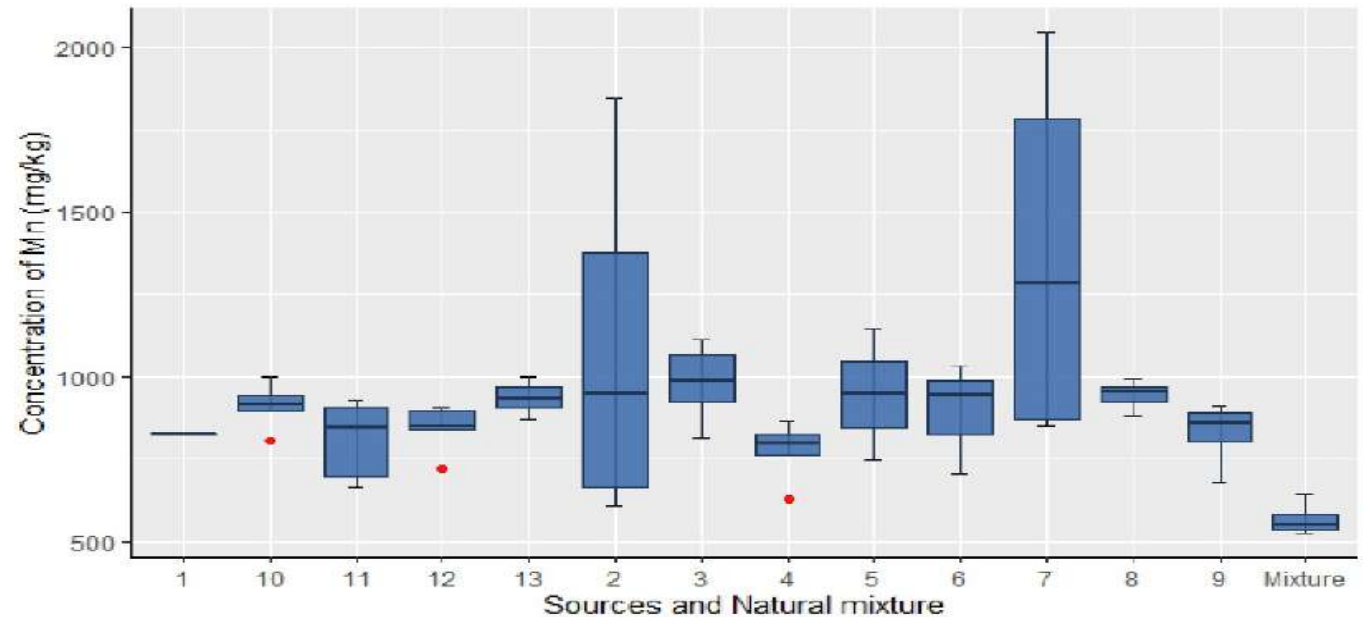
- Metales pesados, elementos trazas, etc.
- Algunos ejemplos:
  - Na, Al, K, Ca, Fe, Mo, Mn, Sr, Cr, V, Ni, Cu, Zn, As, Pb, Mg, Si, S, Ti, Br, Rb, Y, Zr, Nb
- Importante **criterio conservativo** del trazador:
  - Las variaciones del comportamiento (aumento/disminución) del trazador empleado sólo se asocian al proceso evaluado (transporte de sedimentos), no hay fuentes o sumideros adicionales que modifiquen de forma desconocida sus niveles.

# Selección de trazadores



El **AL** como trazador es adecuado para evaluar los aportes en el punto de mezcla, menos la fuente 7.

El **MN** como trazador no es adecuado para evaluar los aportes en el punto de mezcla, ninguna de las fuentes explica el comportamiento de la mezcla.



# Selección de trazadores (geoquímicos)

**Criterio de solubilidad.** Se recomienda emplear trazadores químicos que posean niveles de índice de transporte disueltos (DTI) igual o menor al 10%

Ratio between the natural dissolved and total elemental river transport to oceans (modified from Martin and Meybeck, 1979)

99%	90%				50%									10%	5%					
Cl Br	S	NaSr	C	CaLi	SbMg	N	B	Mo	As	F	Ba	K Cu	P NiSi	Rb	U	Co	Cd	Mn		
Th	V	1% Cs Ga	Pb	0.5% Lu TiGd	La	Ho	Yb	Tb	Er	Sm	Cr	Fe	Eu	Ce	0.1% ZnAl	Sc	0.05% Hg			

Meybeck, M. and Helmer, R., 1989. The quality of rivers: from pristine stage to global pollution. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. (Global Planet. Change Sect.)*, 75: 283–309.

# Análisis de laboratorio de muestras ambientales (Elementos químicos, FRX)

Para identificar *elementos químicos como trazadores* se pueden emplear como equipamiento, entre otros.

- Espectrometría Fluorescencia de Rayos X por Dispersión de Energías (**EDXRF**) – Espectroscopia de Emisión Atómica por Plasma Acoplado Inductivamente (**ICP**)
- Permite la determinación de elementos químicos estables/trazas, metales pesados
- Ejemplos de **elementos químicos** medidos: Na, Al, K, Ca, Fe, Mo, Mn, Sr, Cr, V, Ni, Cu, Zn, As, Pb, Mg, Si, S, Ti, Br, Rb, Y, Zr, Nb



Código de la muestra	Nombre del ensayo Na			Nombre del ensayo Al		
	Valor	Incertidumbre %	Fecha	Valor	Incertidumbre %	Fecha
FRN-45,1	0,280	± 0,066	14/11/2018	5,71	± 0,80	14/11/2018
CSSI-18,1	0,280	± 0,066	14/11/2018	4,81	± 0,67	14/11/2018
FRN-99	0,52	± 0,12	14/11/2018	8,1	± 1,1	14/11/2018
FRN-5,1	0,47	± 0,11	14/11/2018	7,7	± 1,1	14/11/2018
CSSI-20	0,76	± 0,18	14/11/2018	4,91	± 0,69	14/11/2018
FRN-57,1	0,360	± 0,085	14/11/2018	7,3	± 1,0	14/11/2018
FRN-69,1	0,350	± 0,082	14/11/2018	8,5	± 1,2	14/11/2018
FRN-65,1	0,50	± 0,14	14/11/2018	7,3	± 1,0	14/11/2018
FRN-63,1	0,46	± 0,11	14/11/2018	5,40	± 0,76	14/11/2018
FRN-95	0,83	± 0,20	20/11/2018	9,7	± 1,3	20/11/2018
FRN-60,1	0,68	± 0,16	20/11/2018	8,8	± 1,2	20/11/2018
FRN-94	0,320	± 0,075	20/11/2018	6,08	± 0,85	20/11/2018
FRN-103	0,56	± 0,13	20/11/2018	10,2	± 1,4	20/11/2018
FRN-7,1	0,87	± 0,21	20/11/2018	8,8	± 1,2	20/11/2018
FRN-72,1	0,49	± 0,12	20/11/2018	8,6	± 1,2	20/11/2018
FRN-96	1,06	± 0,25	20/11/2018	> 11,1 (11,55)	-	20/11/2018
FRN-68,1	0,410	± 0,097	20/11/2018	7,01	± 0,98	20/11/2018
FRN-67,1	0,280	± 0,066	21/11/2018	6,52	± 0,91	21/11/2018
FRN-10	0,420	± 0,099	21/11/2018	8,7	± 1,2	21/11/2018
FRN-98	0,53	± 0,13	21/11/2018	7,7	± 1,1	21/11/2018
FRN-101	0,360	± 0,085	21/11/2018	8,0	± 1,1	21/11/2018
FRN-62,1	0,48	± 0,11	21/11/2018	8,2	± 1,2	21/11/2018
FRN-14,1	0,280	± 0,066	21/11/2018	6,97	± 0,94	21/11/2018

# FRN-Trazadores Químicos (Modelos)

- Se pueden emplear los mismos modelos de mezclas antes mencionados
- No hay corrección por metilo de CSSI
- No hay que corregir el porcentaje de carbono en la muestra, los valores isotópicos
- El CSSIAR puede correr este análisis haciendo pequeñas modificaciones al programa.

# Comparación CSSI vs FRX

- Similares metodologías y modelos de desmezcla
- Pretratamiento de muestras diferenciado, más simple FRX
- Diferentes determinaciones analíticas (IRMS vs FRX)
- CSSI más discriminante (>90%), FRX (>75%)
- Costos diferenciados
  - Por muestra CSSI 150 – 350 USD      FRX 25 – 80 USD
  - Equipamiento IRMS 0.3 – 0.8 MUSD      FRX 60-180 000 USD

# Conclusiones

- El **fingerprint** (CSSI, FRX) es una herramienta valiosa para identificar aportes de sedimentos a nivel de cuencas y es de amplio uso internacionalmente.
- Apoyada por las técnicas FRN además de **identificar** los principales fuentes de aportes de sedimentos a nivel de cuenca, subcuenca, etc se pueden **cuantificar** las contribuciones.
- La técnica de Fingerprint con trazadores químicos permiten complementar los trabajos de CSSI, aunque con menor capacidad discriminante, sus costos más reducidos permiten ampliar la extensión de los estudios a realizar.

Se debe ser cuidadoso en su utilización.

- Según la información disponible del área de estudio y la heterogeneidad de las zonas de captación de la cuenca, se deben seleccionar adecuadamente los trazadores a emplear, las fuentes, los puntos de mezclas y la estrategia de muestreo.

# Gracias por su atención



**Proyecto** “Fortalecimiento de capacidades I+P+P para restaurar suelos degradados en la región oeste del Canal de Panamá”