



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

## “CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS MARINOS SUPERFICIALES DE LAS CUENCAS WAGNER Y CONSAG, NORTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA, MEXICO”

### T E S I S

Que como requisito parcial para obtener el grado de:  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LAS TIERRA

P R E S E N T A

VIRIDIANA VAZQUEZ FIGUEROA

JURADO EXAMINADOR

DR. CARLES CANET MIQUEL  
DRA. RUTH VILLANUEVA ESTRADA  
DRA. LIGIA PÉREZ CRUZ  
DR. PRIYADARSI ROY  
DR. EVGUENI CHOUMILINE



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



# Índice general

<b>Abreviaturas y glosario</b>	<b>xi</b>
<b>Resumen</b>	<b>xiii</b>
<b>Abstract</b>	<b>xv</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>5</b>
2.1. Objetivo General	5
2.2. Objetivos Particulares	5
<b>3. Antecedentes</b>	<b>7</b>
3.1. Materia particulada en hundimiento (MPH) y fuentes de elementos al océano	7
3.2. Sedimentos marinos	8
3.2.1 Generalidades	8
3.2.2 Clasificación de los sedimentos	10
3.2.3 Geoquímica (elementos mayores y traza en los sedimentos marinos)	10
3.3. Trabajos previos en la zona	12
<b>4. Área de estudio</b>	<b>15</b>
4.1. Ubicación	15
4.2. Marco tectónico del Golfo de California	15
4.3. Fisiografía	17
4.4. Rasgos morfológicos de las cuencas de Wagner y Consag	18
4.5. Geología, fuentes de sedimentos y estratigrafía	21
4.6. Oceanografía Física	22
<b>5. Materiales y métodos</b>	<b>25</b>
5.1. Recolección de muestras	25
5.2. Pretratamiento de las muestras	25
5.3. Análisis Granulométrico	25
5.4. Determinación de carbono orgánico y carbono inorgánico	27
5.5. Análisis de elementos mayores y traza	27

5.5.1	Análisis por Activación Neutrónica Instrumental . . . . .	27
5.5.2	Análisis por Fluorescencia de Rayos X . . . . .	28
5.5.3	Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo . . . . .	28
5.6.	Análisis Mineralógico . . . . .	29
5.6.1	Microscopio Electrónico de Barrido . . . . .	29
5.6.2	Difracción de Rayos X . . . . .	29
5.7.	Determinación de Isótopos . . . . .	31
5.7.1	Determinación de la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en barita . . . . .	31
5.7.2	Análisis de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en carbonatos . . . . .	31
5.7.3	Análisis de $\delta^{34}\text{S}$ en barita . . . . .	31
5.8.	Análisis y tratamiento de los datos . . . . .	33
5.8.1	Normalización de los elementos . . . . .	33
5.8.2	Factor de Enriquecimiento . . . . .	34
5.8.3	Normalización de los elementos de las tierras raras . . . . .	34
5.8.4	Análisis estadístico . . . . .	35
<b>6.</b>	<b>Resultados . . . . .</b>	<b>39</b>
6.1.	Tamaño de grano y tipo de sedimento . . . . .	39
6.2.	Distribución de $C_{org}$ y carbonatos . . . . .	39
6.3.	Concentración de elementos mayores y traza en los sedimentos . . . . .	43
6.4.	Distribución espacial de elementos de las cuencas de Wagner y Consag . . . . .	44
6.4.1	Distribución espacial de elementos mayores . . . . .	44
6.4.2	Distribución espacial de los elementos traza . . . . .	49
6.5.	Normalización y factor de enriquecimiento (FE) . . . . .	56
6.5.1	Elementos altamente enriquecidos . . . . .	56
6.5.2	Elementos conservativos . . . . .	57
6.5.3	Elementos ligeramente empobrecidos . . . . .	59
6.6.	Concentración y distribución de Elementos de las Tierras Raras (REE) . . . . .	61
6.6.1	Normalización de las tierras raras . . . . .	61
6.7.	Análisis de factores y cluster para los sedimentos . . . . .	66
6.8.	Mineralogía y geoquímica isotópica . . . . .	70
<b>7.</b>	<b>Discusión . . . . .</b>	<b>77</b>
7.1.	Características sedimentológicas . . . . .	77
7.2.	Componentes geoquímicos de los sedimentos y mineralogía . . . . .	79
7.2.1	Factores terrígenos: plagioclasas, arcillas y minerales pesados . . . . .	81
7.2.2	Factor autigénico: barita . . . . .	84
7.2.3	Carbonatos . . . . .	86

7.3. Tierras raras . . . . .	89
7.3.1 Normalización de las tierras raras y anomalías de Ce y Eu . . . . .	89
<b>8. Conclusiones . . . . .</b>	<b>93</b>
<b>9. Referencias . . . . .</b>	<b>95</b>
<b>Anexos . . . . .</b>	<b>101</b>
<b>A.Tablas . . . . .</b>	<b>101</b>



## Índice de figuras

Figura 3.1 . Representación esquemática de las entradas y salidas de elementos así como los procesos internos en el océano. . . . .	8
Figura 4.1 . Provincias del GC y ubicación geográfica de las cuencas de Wagner y Consag, NGC.	16
Figura 4.2 . Sitios en los cuales fueron observadas zonas de liberación de gas ( <i>flares</i> ). . . . .	19
Figura 4.3 . Ejemplos de sitios donde se observó la liberación de fluidos; imágenes acústicas registradas con los equipos de ecosonda (columna de agua) y TOPAS (sedimentos).	20
Figura 4.4 . Perfiles acústicos de los sedimentos obtenidos mediante el equipo TOPAS correspondientes a los domos de lodo de “El Puma” en el borde Este de la Cuenca de Consag. . . . .	20
Figura 5.1 . a) Ubicación de los sitios de muestreo de sedimentos en las cuencas de Wagner y Consag, NGC, b) detalle del muestreo en el borde este de la cuenca Wagner. . . . .	26
Figura 5.2 . Métodos utilizados para el análisis de sedimentos de las cuencas Wagner y Consag.	32
Figura 5.3 . Regresión lineal y correlación de los contenidos de Sc y Al, Fe, Ti en los sedimentos superficiales de las cuencas de Wagner y Consag, NGC. . . . .	33
Figura 5.4 . Procedimientos utilizados para el análisis de la información obtenida. . . . .	37
Figura 6.1 . Diagramas ternarios para los tamaños de grano observados en las muestras de sedimento de las cuencas de Wagner y Consag. . . . .	40
Figura 6.2 . Distribución puntual del tamaño de grano ( $\phi$ ) para los sedimentos de las cuencas Wagner y Consag. . . . .	40
Figura 6.3 . Distribución de la concentración de $C_{org}$ (%) en las muestras de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. . . . .	41
Figura 6.4 . Distribución de la concentración de carbonatos (%) en las muestra de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. . . . .	42
Figura 6.5 . Valores de concentración elemental para la corteza superior (Wedepohl, 1995), proyectados junto con el promedio total de las muestras analizadas y los promedios para las muestras de las cuencas de Wagner y Consag, respectivamente. . . . .	43
Figura 6.6 . Distribución del contenido Si (%) en muestras de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. . . . .	45
Figura 6.7 . Distribución del contenido Al (%) en muestras de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. . . . .	47
Figura 6.8 . Distribución del contenido Fe (%) en muestras de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. . . . .	48



Figura 6.9 . Distribución del contenido de Ca (%) en muestras de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. . . . .	49
Figura 6.10 . Distribución del contenido Ti ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) en muestras de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. . . . .	51
Figura 6.11 . Distribución del contenido Mn ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) en muestras de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. . . . .	52
Figura 6.12 . Distribución del contenido de S ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) en muestras de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. . . . .	53
Figura 6.13 . Distribución del contenido de Ba ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) en muestras de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. . . . .	54
Figura 6.14 . Distribución del contenido de U ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) en muestras de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. . . . .	55
Figura 6.15 . Valores normalizados respecto al Sc para los sedimentos de las cuencas Wagner y Consag y valores de la corteza superior (Wedepohl, 1995). . . . .	56
Figura 6.16 . Comparación entre las razones: $(\text{El})/(\text{Sc})_{\text{corteza}}$ y $(\text{El})/(\text{Sc})_{\text{muestra}}$ . . . . .	57
Figura 6.17 . Distribución de los valores promedio de FE para los elementos enriquecidos de las cuencas de Wagner y Consag, NGC. . . . .	58
Figura 6.18 . Distribución de los valores promedio de FE para los elementos conservativos de las cuencas de Wagner y Consag, NGC. . . . .	60
Figura 6.19 . Distribución de los valores promedio de FE para los elementos empobrecidos de las cuencas de Wagner y Consag, NGC. . . . .	62
Figura 6.20 . Patrón de REE presentados por las muestras de sedimento de las cuencas de Wagner y Consag NGC. . . . .	63
Figura 6.21 . Distribución de la anomalía de Ce en sedimentos de las cuencas de Wagner y Consag, NGC. . . . .	64
Figura 6.22 . Distribución de la anomalía de Eu en sedimentos de las cuencas de Wagner y Consag, NGC. . . . .	65
Figura 6.23 . Distribución de la razón $\text{La}_{\text{norm}}/\text{Yb}_{\text{norm}}$ en sedimentos de las cuencas de Wagner y Consag, Norte del Golfo de California. . . . .	65
Figura 6.24 . Gráfico de sedimentación de los factores obtenidos por el análisis de factores y criterio de raíz latente. . . . .	67
Figura 6.25 . Dendograma del análisis de cluster (modo “Q”) realizado para sedimentos de las cuencas Wagner y Consag. . . . .	69
Figura 6.26 . Imágenes de microscopía electrónica de los nódulos de barita observados en las estaciones WAG E-2 y WAG E-3. . . . .	72

Figura 6.27 .Imágenes de SEM de las piritas y baritas: (a) pirita framboidal; (d) y (e) de agregados fasciculares de barita; (b) y (c) espectros EDS para la pirita y barita, respectivamente. . . . .	73
Figura 6.28 .Imagen SEM de un grano de feldespatos y agregados de calcita . . . . .	74
Figura 6.29 .Imágenes SEM de: (a) granos de feldespatos (WAG 34); (b) y (d) Diatomeas (WAG-33); y (c) Foraminíferos (WAG-33). . . . .	76
Figura 7.1 . Componentes mayores de los sedimentos marinos recolectados en las cuencas de Wagner y Consag, proyectadas en el sistema $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ .2 (Brumsack, 1989). . . . .	80
Figura 7.2 . Gráfica de correlación del Al vs el Ca y Na para las muestras de sedimento del NGC. . . . .	82
Figura 7.3 . Gráfica de correlación del Al vs K para las muestras de sedimento del NGC. . . . .	83
Figura 7.4 . Gráfica de correlación del K vs REE para las muestras de sedimento del NGC. . . . .	83
Figura 7.5 . Gráfica de correlación del Zr vs Hf y Ti para las muestras de sedimento del NGC. . . . .	84
Figura 7.6 . Gráfica de correlación del Ba vs S y Sr para las muestras de sedimento del NGC. . . . .	85
Figura 7.7 . Gráfica de correlación del $C_{inor}$ vs Ca para las muestras de sedimento del NGC. . . . .	87
Figura 7.8 . Gráfica de las relaciones entre $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ para carbonatos las cuencas Wagner y Consag. . . . .	88
Figura 7.9 . Patrones de tierras raras normalizadas a lutita norteamericana (NASC, Gromet <i>et al.</i> , 1984). . . . .	90
Figura 7.10 . Gráfica de correlación de la Plagioclasa vs Eu para las muestras de sedimento del NGC. . . . .	91



## Índice de tablas

Tabla 3.1 .	Concentraciones de ET típica en sedimentos marinos (Salomons y Förstner, 1984).	11
Tabla 5.1 .	Métodos de análisis, límite de detección y exactitud para los elementos mayores y traza analizados en sedimentos de las cuencas Wagner y Consag, NGC. . . . .	30
Tabla 5.2 .	Clasificación de los elementos de acuerdo con el FE. . . . .	34
Tabla 6.1 .	Resultados de las pruebas de KMO y Bartlett obtenidas para la matriz de datos utilizada en el análisis de factores. . . . .	66
Tabla 6.2 .	Autovalores y varianza explicada través del análisis de factores modo “R”. . . . .	66
Tabla 6.3 .	Resultados del análisis de factores por el modo “R” para la geoquímica de sedimentos de las cuencas de Wagner y Consag. . . . .	68
Tabla 6.4 .	Regiones de muestreo y muestras de interés para este trabajo y cuya mineralogía ha sido descrita previamente por Birosta (2008). . . . .	70
Tabla 6.5 .	Composición mineralógica a partir del análisis por DRX. . . . .	71
Tabla 6.6 .	Composición isotópica de Sr y S de la barita. . . . .	71
Tabla 6.7 .	Composición isotópica de C y O en calcita. . . . .	75
Tabla 7.1 .	Concentraciones de metales para los estándares de Lutita Norteamericana (NASC) y de corteza superior, así como para sedimentos del paleolago de San Felipe, del AGC, del, NGC y de las cuencas de Wagner y Consag. . . . .	81
Tabla A1 .	Parámetros texturales de los sedimentos superficiales recolectados en las cuencas de Wagner y Consag. . . . .	101
Tabla A2 .	Valores mínimo, máximo, promedio y desviación estándar de la concentración de los elementos mayores y traza en las cuencas Wagner y Consag. . . . .	102
Tabla A3 .	Análisis de outliers en los elementos mayores. . . . .	103
Tabla A4 .	Análisis de outliers en los elementos menores. . . . .	104
Tabla A5 .	Valores promedio de los FE y desviación estándar para los elementos analizados en los sedimentos de las cuencas Wagner y Consag y su clasificación.. . . . .	106
Tabla A6 .	Valores mínimo, máximo, promedio y desviación estándar (DE) de la concentración de REE en las cuencas Wagner y Consag. . . . .	107
Tabla A7 .	Análisis de outliers en los elementos de las tierras raras. . . . .	107
Tabla A8 .	Valores mínimo, máximo, promedios y desviación estándar del contenido de lantánidos en sedimentos superficiales de las cuencas de Wagner y Consag. . . . .	108

Tabla A9 . Valores mínimo, máximo, promedio y desviación estándar para las anomalías de Ce, Eu y razón  $La_{norm}/Yb_{norm}$  para los sedimentos superficiales de las cuencas de Wagner y Consag del NGC y la corteza superior calculados de los datos de Wedepohl (1995). . . . . 108

## Abreviaturas y glosario

**AGC:** Alto Golfo de California.

**$C_{inor}$ :** Carbono inorgánico.

**$C_{org}$ :** Carbono orgánico.

**DRC:** Delta del Río Colorado.

**DE:** Desviación estándar.

**EM:** Elementos mayores.

**ET:**Elementos traza.

**FE:** Factor de enriquecimiento.

**GC:** Golfo de California.

**MPH:** Materia particulada en hundimiento.

**MSP:** Materia suspendiad particulada

**NGC:** Norte del Golfo de California.

**REE:** Elementos de las tierras raras.

**Análisis de factores:** Es el nombre genérico que se da a una clase de métodos estadísticos multivariantes cuyo propósito principal es definir la estructura subyacente en una matriz de datos.

**Autovalores (*Eigenvalue*):** Suma de los cuadrados de las cargas de un factor. Este valor representa la cantidad de varianza representada por un factor.

**Cargas factoriales (*factor loadings*):** Correlación entre la variable original y los factores y llave para el entendimiento e interpretación de un factor particular.

**Circulación termohalina:** Diferentes densidades entre masas de agua causadas por variaciones en la temperatura y salinidad propician una circulación vertical y a profundidad en los océanos. Estos movimientos subsuperficiales afectan aproximadamente el 90% (volumen) de los océanos del mundo.

**Cluster:** Es la denominación de un grupo de técnicas multivariantes cuyo principal propósito es agrupar objetos basándose en las características que poseen.

**Cuartil:** Uno de los tres puntos que dividen un conjunto de datos numéricamente ordenados en cuatro partes iguales. A estos tres puntos se les llama primer cuartil (también llamado el cuartil inferior), segundo cuartil (el cuartil medio; es la mediana) y el tercer cuartil (cuartil superior), respectivamente. Se pueden utilizar para darnos una idea de la dispersión.

**Esferula de hierro:** Material con forma esférica con núcleo de Zn y Ni y cubierta por magnetita (óxido de hierro).

**Esferulas meteóricas:** Material con forma esférica compuestos principalmente de olivino, magnetita y vidrio, originado de los meteoritos rocosos.

**Flares:** Manifestación en la columna de agua de la liberación de gas en el fondo oceánico. Columnas de burbujas.

**Geoquímica:** Ciencia interdisciplinaria que estudia la abundancia relativa y absoluta de los elementos químicos (incluidos los isótopos) y especies atómicas, así como su distribución y evolución en diversos ambientes terrestres y planetarios.

**Microtectitas:** Vidrios verde-oscuro meteóricos de tamaño milimétrico. Estos minerales se han encontrado hasta el momento sólo en los sedimentos profundos en el océano Indico y Atlántico ecuatorial.

**Outliers:** Un elemento de los datos que es significativamente diferente a los otros datos de la colección, o un elemento que parece implicar un patrón que es inconsistente con el grueso de la evidencia de datos.

**Pockmarks:** Son cráteres en el fondo del mar causado por fluidos (gases y líquidos) debido a erupción y infiltraciones través de los sedimentos.

**Scavenging:** La remoción de material disuelto (tales como metales traza) del agua de mar por adsorción en la superficie de las partículas.

## Resumen

Durante la campaña oceanográfica WAG-01 (B/O “El Puma”, Mayo del 2007) se observó, mediante ecosonda y un perfilador acústico, una gran cantidad de rasgos morfológicos (*pockmarks* y *flares*) en las secuencias sedimentarias y por encima de ellas, posiblemente relacionados con la emisión de fluidos a través de la Falla Wagner. La interacción de estos fluidos con la secuencia sedimentaria durante su ascenso en algunos sitios modifica su composición química y, al liberarse y reaccionar con el agua marina, se producen precipitados minerales característicos en el fondo marino, como piritita y barita. Por tal motivo se realizó el estudio de la composición granulométrica, mineralógica y química de los sedimentos superficiales de la zona de las cuencas de Wagner y Consag, con el objetivo de conocer su posible procedencia y además relacionar la composición elemental con la mineralogía, tratando de identificar anomalías geoquímicas que pudieran estar relacionadas con la emisión de fluidos. Para cumplir con dicho objetivo se recolectaron 31 muestras de sedimento superficial utilizando una draga Smith McIntyre. Posteriormente se realizaron análisis textural y composicional (INAA, FRX y ICP-MS) y se hicieron observaciones por microscopio electrónico de barrido (MEB por sus siglas en inglés); el análisis de los resultados incluyó algunas herramientas de estadística básica y multivariada. El tamaño de grano de los sedimentos destaca por su homogeneidad; los sedimentos se caracterizan texturalmente por ser fangos ( $8.68 \pm 1.4 \phi$ ). El promedio en el contenido de carbono orgánico y carbonato fue de  $1.01 \pm 0.60\%$  y  $7.9 \pm 2.8\%$ , respectivamente. El resultado de comparar la composición de los sedimentos de las cuencas de Wagner y Consag con la composición promedio de la corteza superior muestra que en su mayoría los elementos analizados se encuentran en concentraciones similares, sugiriendo así que son aportes de origen natural producto de la erosión de la estructura deltaica del Río Colorado y, en menor proporción, de otros ríos y del Desierto de Sonora. El análisis geoquímico resalta un importante enriquecimiento en Ba y S (con un promedio del factor de enriquecimiento de 8.8 y 3.37, respectivamente) que corrobora las características mineralógicas observadas en algunas estaciones, donde además de plagioclasas destaca la presencia de minerales autigénicos como barita, piritita (framboidal) y calcita.

La composición isotópica del S ( $\delta^{34}\text{S}_{CDT}$ , +38.6 a +44.8 ‰) en baritas, y del O ( $\delta^{18}\text{O}_{PDB}$ , 3.66 a 3.97‰) y el C ( $\delta^{13}\text{C}_{PDB}$ , -39.11 to -39.27‰) en carbonatos indica que durante la precipitación de barita ocurre un proceso de reducción bacteriana del sulfato marino acompañado de la oxidación anaeróbica de metano.

Las muestras de sedimento de las cuencas de Wagner y Consag están empobrecidas en elementos de las tierras raras (REE por sus siglas en inglés) respecto al estándar de lutita norteamericana (NASC por sus siglas en inglés). Los patrones de REE normalizadas a NASC no muestran



anomalías importantes derivadas de la actividad hidrotermal; únicamente se observan ligeras anomalías positivas de Eu atribuibles al contenido de plagioclasas de los sedimentos.

El análisis multivariado de los datos geoquímicos muestra que cuatro factores describen principalmente la composición de los sedimentos, los cuales en orden de importancia son: (a) terrígeno I, controlado por el Delta del Río Colorado y caracterizado por feldspatos y arcillas, (b) terrígeno II, caracterizado por incluir a los minerales pesados, un autigénicos (c) caracterizado por la asociación de Ba con S (correspondiente a la barita), relacionada posiblemente con la emisión de fluidos reducidos a través de la Falla de Wagner y finalmente el descrito por (d) los carbonatos. El análisis de cluster en su modo Q de los análisis elementales muestra dos regiones geoquímicas diferenciadas para el área de estudio: (1) el este de la Cuenca Wagner y los depocentros de ambas cuencas, y (2) el margen Sureste de la Cuenca Consag. El primer grupo se caracterizó por mostrar la asociación de Ba y S, sin embargo ambos muestran la influencia de los factores terrígeno I,II y los carbonatos.

## Abstract

During the oceanographic cruise WAG-01 (R.V. “El Puma”, May 2007), a large number of morphological features (*pockmarcks* and *gas flares*) were observed in echosounder and TOPAS (*sub-bottom acoustic profiler*) profiles, mostly at the top of the sedimentary sequences and in the seafloor, possibly related to the seepage and discharge of fluids throughout the Wagner Fault. These fluids interact with sediments, modifying their chemical composition, and, when released to the seafloor, they react with seawater, precipitating pyrite and barite on the seabed.

Geochemical analyses of the surface sediments were done aiming (a) the characterization of potential sources from sedimentary materials and (b) the determination of anomalies that may be associated with fluid venting.

Thirty one surface sediment samples were collected with a MacIntyre grab sampler, and were examined for grain size. Subsequently, bulk concentrations of 44 major and trace elements were determined by INAA, FRX and ICP-MS. The analysis of the results included the calculation of enrichment factors (EF) using Sc as a normalizing element, and the application of descriptive and multivariate statistics. The grain size of sediments is characterized by its homogeneity, being the sediments mainly muds ( $8.68 \pm 1.4 \phi$ ). The average contents of organic carbon and carbonate were of  $1.01 \pm 0.60$  and  $7.90 \pm 2.83$  % wt., respectively. The comparison of sediment compositions of Wagner and Consag basins with the average upper crust values suggests that the main contributions derived from the Colorado River deltaic structure erosion and, to a lower degree, from other rivers and from the Sonora Desert. The significant enrichments in S and Ba (EF of 3.37 and 8.0, respectively) are highlighted, being in agreement with the mineralogical composition of the sediments, which contain, besides detrital feldspars, authigenic barite, pyrite and calcite.

The isotopic composition of S in barite ( $\delta^{34}\text{S}_{CDT}$ , +38.6 a +44.8 ‰) and O ( $\delta^{18}\text{O}_{PDB}$ , 3.66 a 3.97‰) and C ( $\delta^{13}\text{C}_{PDB}$ , -39.11 to -39.27‰) in carbonates indicate that during precipitation of barite bacterial reduction of marine sulfate takes place coupled to a reaction of anaerobic oxidation of methane.

Sediment samples of Wagner and Consag basins are depleted in REE compared to the North American Shale Composite (NASC) standard. Profiles of NASC-normalized REE show no significant anomalies resulting from hydrothermal activity; only slight positive Eu anomalies were observed associated to high plagioclase contents of the sediments.

Multivariate analyses of geochemical data showed four factors that describe the composition of sediments: (a) terrigenous I, controlled by the Colorado River Delta and characterized by feldspars and clays, followed in importance by (b) another factor terrigenous II, characterized

by heavy minerals, (c) the association of Ba with S (for barite), possibly related to emission of reduced fluids through the Wagner Fault and finally (d) carbonates.

The cluster analysis in Q mode of chemical analysis showed two distinct geochemical regions for the study area: (1) the eastern Wagner Basin and both basin depocenters, and (2) the southeast margin of the Consag Basin.

## 1. Introducción

Desde principios de los años 1970s ha surgido un auge en el interés sobre los ciclos biogeoquímicos de los elementos en la tierra y entre sus compartimientos; atmósfera-continente y el océano. Muchas investigaciones se han centrado principalmente en el entendimiento de la distribución y comportamiento de los elementos mayores (EM) y traza (ET) en los ambientes marinos. Además, factores importantes como el desarrollo de técnicas analíticas e instrumentación con alta sensibilidad han permitido la detección de bajas concentraciones a las cuales encontramos algunos elementos (ET) ya no sea un problema, obteniéndose de esta manera resultados confiables y representativos del ambiente, donde se encuentran los ET y de los procesos, en los que participan (Bruland y Lohan, 2003).

Los ciclos biogeoquímicos de los elementos involucran los flujos de materia y energía entre los diferentes compartimientos (corteza, manto terrestre, atmósfera y océanos) que constituyen al planeta. Se les llama ciclos biogeoquímicos debido a que el flujo de los materiales sigue un circuito cerrado el cual se completa después de un largo periodo de tiempo. Durante este ciclo los materiales tienden a interactuar con los organismos vivos (biota), la parte abiótica involucrando diversas transformaciones químicas. El estudio de los ciclos biogeoquímicos de los elementos provee información que es necesaria para el entendimiento de los procesos responsables del intercambio entre estos apartados y el funcionamiento de los ecosistemas.

Actualmente se considera a los ET como herramientas geoquímicas que proporcionan información indirecta de los ciclos globales de los elementos tales como el del C y el N, entre otros. El conocimiento de estos ciclos biogeoquímicos y de los factores que los perturban bajo diversas condiciones permitirá entender procesos y fenómenos que ocurren en los continentes y en los océanos a escalas regionales y locales. Además, el estudio de los ciclos biogeoquímicos ayuda a comprender la influencia antropogénica y sus efectos en los diversos ambientes terrestres y marinos.

En las ciencias marinas las aplicaciones de los EM y ET son variadas, algunos ejemplos incluyen: (a) la distribución de ET entre el agua marina, el agua intersticial y los componentes sólidos de los sedimentos permite realizar interpretaciones sobre los origen y evolución de los diversos ambientes marinos (Salomons y Förstner, 1984; Chester, 2003); (b) algunos ET sirven como micronutrientes esenciales, por lo mismo, la disponibilidad de éstos influenciará la productividad biológica en los ambientes marinos (Libes, 1992); (c) otros ET como el Pb, As y Hg son esencialmente controlados por las emisiones antropogénicas y, por ello, utilizados en estudios de contaminación (Rodríguez Figueroa, 2004; Leal Acosta, 2008); (d) algunos elementos como Ba, Cd y Zn sirven como herramientas para la reconstrucción de paleoambientes, así como de la

productividad oceánica o de los patrones de circulación, entre otros (Gibbs, 1977; Chester, 2003; Bruland y Lohan, 2003).

Los trabajos desarrollados sobre los ciclos biogeoquímicos de los elementos se remontan a principios del siglo XX, y para su mejor comprensión pueden dividirse en tres periodos hasta el presente. Un primer periodo en los años 1970s, en el que destacaron Vernadsky (2007), Vinogradov (1962), Krauskopf (1956) y Goldberg (1954) por sus estudios sobre especiación, distribución y transformaciones biogeoquímicas de los elementos. Posteriormente, en los años 1980s, con la creación del programa internacional “IGBP” (International Geosphere Biosphere Programme) y sus programas específicos “JGOFS” (Joint Global Ocean Flux Study) y “LOICZ” (Land-Ocean Interaction in the Coastal Zone), se retomaron los trabajos previos, y además se realizaron importantes estudios sobre contaminación, y sobre el papel del plancton y la materia orgánica. Los estudios de ET en los océanos ya consideraban de manera integral la columna de agua (de forma disuelta o asociados a partículas suspendidas) y los sedimentos marinos. Finalmente, a principios de los 1990 surgieron nuevos programas internacionales de IGBP como “SOLAS” (Surface Ocean-Lower Atmosphere Studies) y “LOICZ-II”, además de “GEOTRACES”, este último enfocadas directamente hacia los estudios sobre los ciclos biogeoquímicos marinos globales de los ET y sus isótopos.

Recientemente el estudio de los ciclos biogeoquímicos ha tomado mayor relevancia en los sistemas costeros. Los márgenes continentales se han reconocido como regiones, donde los procesos físicos y químicos se intensifican, lo que influye directamente en el intercambio de materiales entre el continente y los océanos (Shumilin *et al.*, 2002; Domínguez-Rosas, 2008). Estas áreas se caracterizan por ser regiones donde además se depositan materia orgánica y muchos EM y ET.

En el caso del Golfo de California (GC) su rasgos oceanográficos de alta productividad (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991), fuerte dinámica (Álvarez-Borrego y Gaxiola Castro, 1988; Bray, 1988; Lavín y Organista, 1988; Parés-Sierra *et al.*, 2003), además de su contexto geológico (Lonsdale, 1989; Martín-Barajas, 2000) lo convierten en un área de gran interés científico. Particularmente las regiones del Delta del Río Colorado(DRC), Alto Golfo de California (AGC) y Norte del Golfo de California NGC) son actualmente el objeto de estudio de diversos grupos de trabajo multidisciplinarios.

Durante la campaña Oceanográfica WAG-01, en mayo del 2007, se observaron mediante ecosonda y un perfilador acústico de los sedimentos una gran cantidad de rasgos morfológicos en las cuencas de Wagner y Consag, principalmente cientos de columnas de burbujas, “*flares*”, asociadas a fallas derivadas de la Falla de Wagner, por las cuales tiene lugar la infiltración de fluidos (Canet *et al.*, 2010). La interacción de estos fluidos con la secuencia sedimentaria durante su migración hacía la superficie modifican paulatinamente su composición elemental e isotópica y, al liberarse y reaccionar con el agua marina, producen precipitados minerales característicos en el piso oceánico

(Von Damm *et al.*, 1985; Alt, 1995; Canet *et al.*, 2006), que son diferentes del material particulado depositado de la columna de agua.

Por tal motivo se planteó realizar el análisis de sedimentos superficiales de las cuencas de Wagner y Consag, con el objetivo de conocer su composición química e isotópica y correlacionarla con la mineralogía, tratando de identificar anomalías geoquímicas que pudieran estar relacionadas con la intensa actividad de emisión de fluidos del área de estudio. Así, a partir de esta información, se podrían inferir las condiciones físicas y químicas que prevalecían en el momento en que se depositaron y, por lo tanto, la naturaleza de dicha actividad.



## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Caracterizar geoquímicamente los sedimentos marinos superficiales de las cuencas de Wagner y Consag, con el propósito de definir su procedencia, patrones de distribución y posibles anomalías relacionadas con la actividad de emisión masiva de fluidos en el fondo marino.

### **2.2 Objetivos Particulares**

- Describir las características texturales y de composición de las muestras de sedimento superficial del área de estudio.
- Identificar las anomalías geoquímicas presentes en los sedimentos utilizando como herramienta el factor de enriquecimiento y análisis de las tierras raras; tomando como referencia la composición de la corteza superior promedio y la Lutita Norteamericana, respectivamente.
- En función de las anomalías geoquímicas observadas y de la composición mineralógica para la zona, determinar y describir la geoquímica de isótopos estables (C, O, Sr, y S) en las muestras de mayor interés.
- Identificar y clasificar mediante herramientas de estadísticas (análisis exploratorio de datos y multivariada) las principales asociaciones geoquímicas.
- Describir la distribución espacial de los rasgos texturales y componentes geoquímicos observados para el área de estudio.





### 3. Antecedentes

#### 3.1 Materia particulada en hundimiento (MPH) y fuentes de elementos al océano

La materia suspendida particulada (MSP) se define como las partículas que quedan retenidas en un filtro con tamaño de poro  $0.45 \mu\text{m}$  (Riley y Chester, 1989; Libes, 1992). La MSP se divide en materia particulada fina ( $5\text{-}10 \mu\text{m}$ ) y materia particulada en hundimiento (MPH). Esta última caracterizada por tener una mayor masa y tamaño de grano ( $>50 \mu\text{m}$ ) (Chester, 2003; Rodríguez Castañeda, 2008). En el agua estas partículas tienden a caer bajo la acción de la gravedad. La velocidad de su caída depende de la masa, tamaño y forma de las partículas, además de otros factores como superficies reactivas, solución electrolítica y sustancias orgánicas disueltas (Salomons y Förstner, 1984). Además los procesos oceánicos tendrán influencia en los mecanismos de transporte y transformación que sufrirán estas partículas hasta su incorporación a los sedimentos.

En su mayoría los elementos en los ecosistemas marinos son transportados hacia al fondo y depositadas en los sedimentos en forma de MPH. Esta es una mezcla de materiales que pueden ser de fuentes externas, o bien por generación interna de partículas, debida principalmente a la producción primaria (Figura 3.1). Las componentes externas son productos de la erosión continental por procesos químicos y físicos, y son transportados en forma particulada o disuelta a los márgenes oceánicos por flujos de ríos, aguas subterráneas y hielo de los glaciares y además a través de la atmósfera en forma gaseosa o particulada por transporte eólico y precipitación pluvial (Anónimo, 2006). Estos productos del intemperismo están integrados principalmente por aluminosilicatos (arcillas y feldespatos) y cuarzo, además de coloides metalorgánicos floculados y óxidos de hierro y manganeso formados en ambientes fluviales y estuarinos (Chester, 2003).

Los componentes internos incluyen restos orgánicos (tejidos y conchas), precipitados inorgánicos y componentes resuspendidos del sedimento (estos últimos funcionan como un sistema que absorbe y libera simultáneamente ET al agua marina). La materia orgánica particulada está compuesta de organismos vivos (fitoplancton y zooplancton) y detritus (organismos muertos y desechos fecales), que son principalmente restos de carbonato de calcio y ópalo. Los componentes no biogénicos o precipitados inorgánicos de la MPH se producen dentro del mismo océano a partir de compuestos disueltos dentro del agua, esto incluye a la barita, algunos carbonatos y oxihidróxidos de hierro y manganeso. Finalmente en regiones de expansión del piso oceánico, la actividad hidrotermal causa un intercambio de elementos entre la litosfera y el manto, propiciando la precipitación de minerales, como barita y sulfuros metálicos, que se suman a la MPH (Chester, 2003; Anónimo, 2006).

Además de las fuentes anteriores existen varios elementos antropogénicos que se pueden encontrar en la MSP marina en las regiones costeras como: descargas residuales, desechos nucleares, hidrocarburos y pesticidas, entre otros. La formación de partículas por procesos bioquímicos (bioacumulación) y de *scavenging*, entre otros, son los mecanismos que controlan los procesos de extracción, eliminación o depositación de muchos ET de la columna de agua (Bruland y Lohan, 2003).

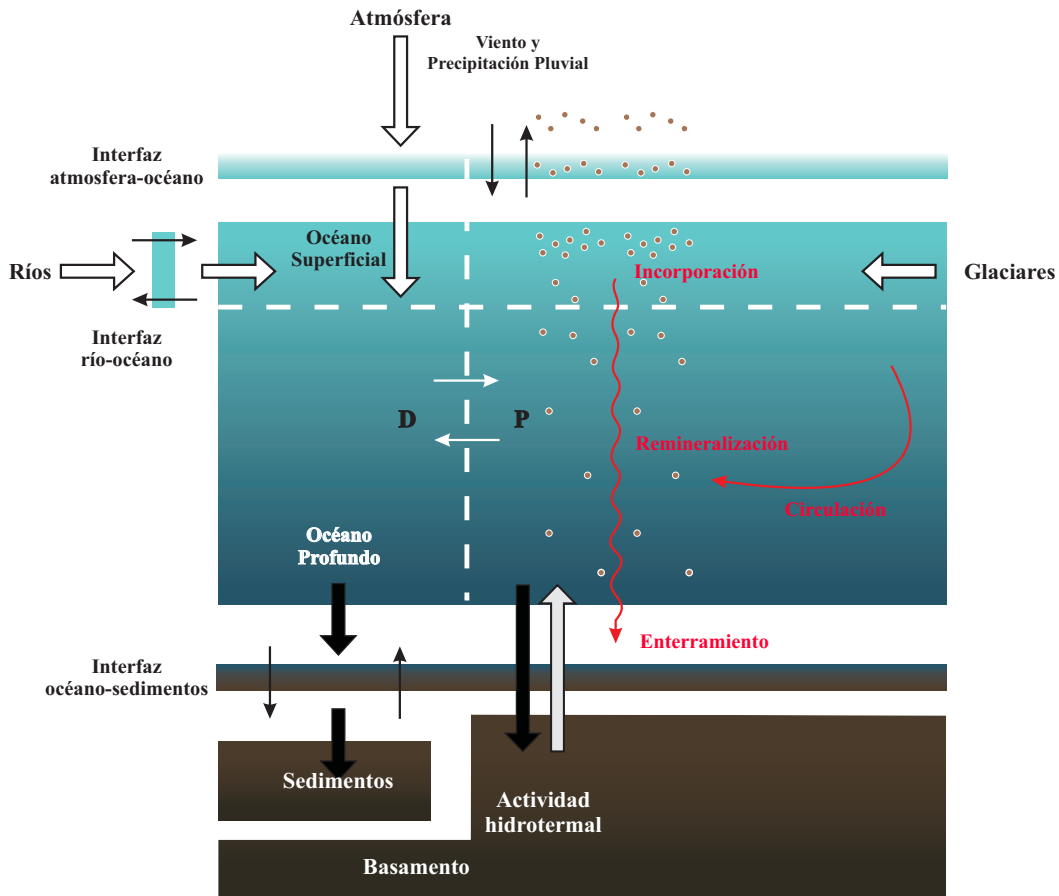


Figura 3.1. Representación esquemática de las entradas y salidas de elementos al océano. Las flechas en blanco indican el transporte desde las fuentes de origen y las flechas en negro indican el transporte de material dentro del sistema. Las flechas pequeñas indican que los procesos ocurren en ambas direcciones. La letras D y P indican disueltos y particulados, respectivamente, refiriéndose a las formas en que pueden presentarse los elementos en la columna de agua (modificado de Chester, 2003). Las flechas en rojo hacen referencia a los procesos oceánicos internos de mayor importancia en la distribución de elementos.

### 3.2 Sedimentos marinos

#### 3.2.1. Generalidades

Los sedimentos marinos son un reservorio rico en composición elemental y constituyen un compartimiento importante dentro del ciclo global de los elementos. Los sedimentos marinos se componen de material particulado de naturaleza y origen muy variado que sobrevive a la destrucción (remi-

neralización) durante su hundimiento depositándose en el fondo marino, y en menor grado por otras fuentes alternas como ocurren en las regiones de apertura oceánica.

La composición y distribución de los depósitos sedimentarios está controlada por gran variedad de factores físicos, químicos y biológicos. Los patrones de sedimentación, la productividad y las condiciones climáticas están entre otros factores afectarán la formación y composición de los sedimentos y los depósitos sedimentarios. A *grosso* modo pueden describirse dos grandes tipos de sedimentos en el océano, aquellos cercanos a las costas y los de mar profundo. Los primeros son depositados en zonas de plataforma continental bajo una gran variedad de regímenes que son fuertemente influenciados por las masas continentales adyacentes y el segundo, restringido a profundidades mayores a 500 m y bajo una dinámica diferente en comparación con los costeros. Las características distintivas de ambos tipos de sedimento son: a) el tamaño de grano; y b) la tasa de acumulación (Salomons y Förstner, 1984; Chester, 2003).

Otro factor característico de los sedimentos marinos es el contenido de materia orgánica, la cual juega un papel importante en el ciclo global del carbono, distribución de ET y en algunos procesos particulares como la diagénesis. La materia orgánica que encontramos en los sedimentos puede tener un origen terrestre, marino y antropogénico, y alrededor del 90 % de ella se deposita en la plataforma continental, principalmente en ambientes deltaicos. En regiones costeras la alta productividad primaria y como consecuencia la formación de materia orgánica tiene como consecuencia la formación de ambientes anóxicos a profundidad. Durante el hundimiento de la materia orgánica los procesos de remineralización (Figura 3.1) consumen el oxígeno presente en la columna de agua, estableciendo ambientes con bajo contenido de oxígeno, lo cual es un factor determinante para el desarrollo de algunos minerales autigénicos como pirita y marcasita, glauconita, algunos carbonatos, además de óxidos de hierro y manganeso (Lisitzin, 1996; Chester, 2003; Fütterer, 1999).

El transporte de los sedimentos en los océanos está estrechamente relacionado con los fenómenos hidrológicos y geomorfológicos. Los principales procesos incluyen: (a) erosión de los sedimentos en los fondos; (b) transporte vertical de las partículas en el cuerpo de agua; (c) transporte horizontal por el flujo; (d) depositación en el fondo; y (e) compactación. De manera general, los sedimentos gruesos se mueven únicamente en una delgada capa por encima del fondo marino, la distancia desde el área fuente hasta la zona de sedimentación es corta, y su movimiento en la vertical es rápido. Bajo las mismas condiciones, los sedimentos finos (limos y las arcillas) son transportadas como una capa suspendida que alcanza el cuerpo de agua por completo, y sus movimientos verticales se caracterizan por el movimiento lento de las partículas (Salomons y Förstner, 1984).

### 3.2.2. Clasificación de los sedimentos

Los sedimentos marinos se dividen en cuatro tipos básicos de acuerdo con su origen: terrígeno, biogénico, hidrogénico y cosmogénicos. El material terrígeno tiene su origen en el continente y es resultado de los procesos de intemperismo y erosión que afectan a las diversas rocas del continente y, en menor medida, submarinas. Estos materiales no sufren demasiados cambios debido a la interacción y residencia en el agua marina. En general, son movilizados y transportados a los océanos a través de los ríos y, en menor grado, por depositación atmosférica y transporte glaciar. Cuantitativamente los minerales más importantes de origen detrítico son las arcillas y el cuarzo, además de los feldspatos. La mayoría de estos minerales se depositan en las regiones costeras; sin embargo, la fracción más fina puede alcanzar regiones del océano abierto (Chester, 2003).

La componente definida como biogénica incluye la materia orgánica y los restos esqueléticos inorgánicos como las conchas (carbonatos de calcio y sílice opalina), principalmente. Este grupo también incluye fosfatos (esqueletos de vertebrados de apatita). La formación de estructuras de carbonato de calcio y su incorporación a los sedimentos marino juega un papel importante en la regulación del ión Ca y del CO<sub>2</sub> en a nivel global, y, aunque no se les considera como transportadores de ET y nutrientes, puede contener pequeñas concentraciones de Sr (Chester, 2003; Schneider, 1999).

Los minerales autigénicos son aquellos que se forman inorgánicamente a partir de constituyentes presentes en la columna de agua, depositándose sobre o cerca de la superficie de los sedimentos o por precipitación directa del agua (autigénicos primarios), o como resultado de reacciones químicas entre minerales presentes en los sedimentos (autigénicos secundarios). Los primarios incluyen oxihidróxidos, carbonatos, fosfatos, sulfuros y sulfatos, y los secundarios incluyen glauconita, montmorillonita (esmectita) y varias zeolitas (Chester, 2003; Burdige, 2006).

Finalmente los sedimentos cosmogénicos son aquellos que se han formando en el espacio y que han alcanzado la superficie de la tierra a través de la atmósfera. Este material esta integrado principalmente por esferulas de hierro, esferulas meteóricas y microtectitas (vidrio meteórico), de manera global estos materiales representan sólo una mínima parte de los sedimentos marinos.

### 3.2.3. Geoquímica (elementos mayores y traza en los sedimentos marinos)

El conocimiento de la composición química de los sedimentos es importante para el entendimiento de los ciclos globales de los elementos. La concentración de los EM está principalmente determinada por los minerales que integran los sedimentos (p.e., arcillas, carbonatos y ópalo), los cuales presentan elevados contenidos de Si, Al, Mg, Ca, Na, K y P. Sus concentraciones se expresan regularmente en % en peso. En cambio, los ET se encuentran en concentraciones del orden de mg·kg<sup>-1</sup>, y su abundancia y distribución en los sedimentos refleja diversos procesos

físicos, químicos y biológicos (Rodríguez-Meza *et al.*, 2009). Sin embargo cabe mencionar que la definición de EM o ET radicarán del área o interés científico del estudio.

Los ET se presentan como impurezas en la red cristalina de los minerales, en solución sólida, o adsorbidos tanto en la materia orgánica como en los oxihidróxidos (Gibbs, 1977). En general, los ET no se encuentran fijados permanentemente en los sedimentos; por lo tanto, los sedimentos pueden considerarse compartimientos que, además de concentrar ET, también los liberan a la columna de agua debido a procesos biológicos y químicos, como por ejemplo: la oxidación de la materia orgánica, la disolución mineral por factores fisicoquímicos.

En general los sedimentos se caracterizan por transportar los ET en diversos ambientes terrestres y marinos (lagos, estuarios, regiones costeras y mares), siendo trazadores eficientes de las características de éstos, puesto que son muy sensibles a los cambios de las condiciones ambientales (Chester, 2003).

Los sedimentos se clasifican granulométricamente en dos grandes grupos: (a) Sedimentos finos, compuestos por partículas menores a 50  $\mu\text{m}$ , que a su vez se subdividen en arcillas y limos; y (b) sedimentos gruesos, con tamaño de grano mayor a 50  $\mu\text{m}$ , subdivididos en arenas y gravas. Ambos grupos difieren considerablemente entre sí por sus propiedades mineralógicas, morfológicas, fisicoquímicas y mecánicas. Los ET no se distribuyen homogéneamente sobre todas las fracciones de tamaño de grano. La fracción fina, compuesta principalmente por minerales de las arcillas, presenta altos contenidos en ET. En los limos y arenas finas la concentración de ET generalmente disminuye de acuerdo al incremento en la fracción dominada por cuarzo (Gibbs, 1977; Salomons y Förstner, 1984). La materia orgánica juega un papel importante en el transporte de los ET. Las partículas suspendidas en la columna de agua se cubren por una capa orgánica fina, la cual determinará sus características de absorción (*scavenging*).

La composición de los sedimentos, cercanos a la costa, está determinada en su mayor parte por la química de los materiales detríticos y, en última instancia, por las litologías del área de procedencia. En este contexto son los silicatos terrígenos los que determinarán el contenido de los ET. La Tabla 3.1 muestra las concentraciones típicas de algunos elementos traza en los sedimentos marinos. Por otro lado, los depósitos de oxihidróxidos de Fe-Mn están muy enriquecidos en muchos ET, como As, Co, Ni, Zn y V (Chester, 2003; Canet *et al.*, 2008).

Tabla 3.1. Concentraciones de ET típicas en sedimentos marinos (Salomons y Förstner, 1984).

	Fe (%)	Mn (%)	Cu ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	Ni ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	Co ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	Zn ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
Lodos cercanos a la costa	6.99	0.09	48	55	13	95
Lodos volcanoclasticos	10.45	0.41	441	83	96	347
Arcillas pelágicas rojas-cafés	6.50	0.67	250	225	74	165
Concreciones de Fe y Mn	15.61	16.17	2561	4888	2987	710
Oozes de silicio	3.33	0.30	394	138	54	171
Carbonatos de mar profundo	0.90	0.10	30	30	7	35

### 3.3 Trabajos previos en la zona

La primera información sedimentológica del GC fue obtenida por los científicos de Instituto de Oceanografía de *Scripps* de San Diego, Estados Unidos, durante el periodo comprendido entre 1936-1940. Grim *et al.*, (1949) y van Andel (1964) concluyen que los sedimentos marinos recolectados en las regiones costeras del GC claramente reflejan la litología de las cuencas de drenaje adyacentes. La región del NGC se encuentra mayormente influenciada por el DRC, y las regiones Centro y Sur asociadas con la litología de varias cuencas de drenaje, ubicadas al este y oeste del GC. Además, estos autores mencionan que la región NGC puede ser considerado como una provincia mineralógica-sedimentaria, dominada por anfíboles, epidota y piroxenos, resultado de la influencia directa del DRC, a pesar de su represamiento (1935-1941). Uno de los primeros trabajos donde se detallan las características geoquímicas de los sedimentos marinos de GC fue el desarrollado por Baba *et al.* (1991), quienes analizaron 87 muestras de sedimentos marinos superficiales y utilizaron un análisis de factores de modo Q. Estos autores establecieron 4 posibles procedencias: (1) clastos terrígenos; (2) ópalo (sílice biogénico); (3) carbonatos y, (4) óxidos de manganeso, siendo el factor terrígeno el más importante (80 % para la región este y el 40 % para la región oeste del GC). Además, señalan que los sedimentos se caracterizan por ser de grano fino, y mencionan que el enriquecimiento en terrígenos derivados del DRC, reflejan sus características estuarinas y dinámicas.

En la región central del GC, a partir del descubrimiento de actividad hidrotermal en la Cuenca de Guaymas, ha sido ampliamente descrita en cuanto a sus fluidos, sedimentos, fauna y flora por diversos autores como Von Damm *et al.* (1985a y b), Mercado (1990), Gieskes *et al.* (1991), Lanza-Espino y Soto (1999), Cheng-Feng y Gieskes (2001), Weber y Jorgensen (2002), Otero *et al.* (2003), Barron *et al.* (2004 y 2005) y Demina *et al.* (2009), entre otros. Además también se han estudiado los sedimentos en regiones sin actividad hidrotermal. Brumsack (1989) realizó análisis geoquímicos de 5 núcleos, obtenidos al norte de la Cuenca de Guaymas, y concluyó que la química de los sedimentos refleja los procesos de remineralización, que ocurren en la columna de agua. La influencia de la zona de oxígeno mínimo presente sobre la cuenca Guaymas propicia el secuestro de elementos redox-sensibles (U y Mo) por partículas y sedimentos superficiales. Posteriormente, Dean (2006) analizó dos núcleos del margen oeste de la Cuenca de Guaymas, encontrando que consisten esencialmente en materiales detríticos y ópalo, con cantidades menores de carbonato de calcio. Además señala que los sedimentos del centro del GC, a diferencia de las regiones que subyacen la zona de oxígeno mínimo, no presentan altos contenidos de carbono orgánico y compuestos de algunos ET como podría esperarse.

En la actualidad existen varios trabajos en los que se describen la composición química, mineralogía y transporte, entre otras variables, del material sedimentario ubicado en la región del DRC y AGC. Por ejemplo, Carriquiry y Sánchez (1999) determinaron, a partir del análisis de

68 muestras de sedimento recolectado en la región de transición entre el DRC y AGC el impacto provocado por el embalse del Río Colorado y la fuerte influencia de la dinámica oceánica en la región. Estos autores describen una disminución del tamaño de grano del NE al SO, el cual responde a un transporte de los sedimentos en la misma dirección, además de dos componentes litorales: una de SE a NO en la costa de Sonora y la otra de N a S en la Costa de Baja California Norte. El análisis multivariado basado en los datos de minerales pesados mostró dos provincias: (1) la de Sonora, caracterizada por la presencia de granates y zircón provenientes del desierto de Sonora, y (2) la de Baja California, caracterizada por la abundancia de hornblenda, epidota y piroxenos, procedentes de la región del DRC. Carriquiry *et al.* (2001), retomando el trabajo anterior y con el análisis textural y mineralógico de 141 muestras distribuidas en la misma área, establecieron cuatro provincias sedimentarias en función de los minerales pesados y del contenido de arcillas: (1) Provincia del DRC, (2) Provincia del Río Concepción, (3) Provincia Transicional, y (4) Provincia de la Baja-Sonora, y señalan que la primera es la fuente más importante de material sedimentario a la región NGC.

Shumilin *et al.* (2002) estudiaron la distribución de los elementos dentro de la fase sedimentaria para la región del DRC y AGC, concordando sus resultados con los previamente obtenidos por Carriquiry y Sánchez (1999) concluyendo además que para la región del AGC no existe la influencia por contaminación antropogénica ya que elementos como el Cr, Co, Sb y As no mostraron anomalías, asimismo observaron una disminución en superficie de Fe y Sc, y un enriquecimiento de carbonatos (Ca y Sr) en los sedimentos profundos. Daesslé *et al.* (2002) estudiaron la distribución de Fe y Mn en las fracciones geoquímicas para sedimentos marinos del NGC. Establecieron que la distribución de dichos elementos está controlada por las partículas de grano fino (arcillas  $<4\mu\text{m}$ ) derivadas de la erosión del DRC, además para esta porción, el Fe se encuentra principalmente asociado a fases litogénicas (residual), lo que no ocurre con el Mn, el cual se concentra principalmente en la fracción intercambiable y en los carbonatos. Continuando con la misma investigación Daesslé *et al.* (2004) estudiaron la distribución de metales y fósforo en sedimentos del NGC, identificando por análisis de componentes principales, cuatro factores: (a) arcillas y limos terrígenos; (b) carbonatos biogénicos; (c) barita, y (d) fosfatos. Del análisis de fracciones geoquímicas determinaron que los sedimentos del NGC contienen  $> 90\%$  de Al y Ba y menos del  $70\%$  de Fe, Cu, Cr, Co, Zn y La en las fracciones residuales.

Birosta (2008) observó que los sedimentos predominantes en ambas cuencas son de tamaño limo-arena, compuestos principalmente de silicatos (cuarzo, feldespatos y arcillas), con cantidades subordinadas de carbonatos (calcita, dolomita y aragonita). En las zonas con emisión de gas a través de los sedimentos del margen este de la Cuenca de Wagner (Canet *et al.*, 2010) se observó sedimentos ricos en barita y en piritita con textura framboidal. En la región este de la Cuenca Consag se observaron sedimentos ricos en anhidrita (Birosta, 2008).





## 4. Área de estudio

### 4.1 Ubicación

Las cuencas de Wagner y Consag están localizadas en el NGC, entre las coordenadas geográficas 30.5° y 31.2° N, y 114.4° y 113.9° O, con áreas de aproximadamente 700 km<sup>2</sup> y 750 km<sup>2</sup>, respectivamente son las cuencas más septentrionales, pequeñas y someras (210 m aproximadamente) del GC. La Cuenca de Wagner es la depresión más septentrional del GC y se considera una cuenca de tipo *pull-apart*; su geometría no está bien definida, limita al norte por el sistema transcurrente de la Falla Cerro Prieto, mientras que al sur con un sistemas de fallas que va a lo largo de la Cuenca Consag (Aguilar Campos, 2007; Vázquez-Figueroa *et al.*, 2009). En esta cuenca no existen indicios de actividad volcánica reciente, pero si presencia de actividad sísmica y alto flujo de calor. La Cuenca Consag es una depresión angosta localizada al sur de la Cuenca Wagner, y por su estructura puede considerarse como una zona de transición entre las cuencas de Wagner y Delfín Superior (Hernández Pérez, 2008) (Figura 4.1).

### 4.2 Marco tectónico del Golfo de California

El GC es parte del océano Pacífico con un ancho de 100 a 150 km y 1,200 km de largo, es una cuenca que separa la Península de Baja California del resto de México. Esta depresión se formó como consecuencia de la separación de la Península de Baja California con respecto al continente, debido a la tectónica extensional que dominó la región desde fines del Terciario (Lonsdale, 1989).

A diferencia de la boca del GC, donde la formación de corteza oceánica inició alrededor de los 3.5 Ma (Persaud *et al.*, 2003), en el NGC no se ha identificado este tipo de corteza, por la ausencia de anomalías magnéticas simétricas (Aguilar Campos *et al.*, 2008).

La evolución tectónica del noroeste de México está estrechamente relacionada con los cambios en el límite entre las placas de Norteamérica y Farallón desde el Mioceno. El actual GC es un *rift* oblicuo, formado como resultado de la interacción entre una placa continental y varias placas oceánicas, que empezó desde el Mesozoico y tuvo los mayores cambios en el Cenozoico. Su origen y evolución hasta la actualidad pueden ser descritos a grandes rasgos en tres periodos: (a) el primero, caracterizado por la transición de un régimen de subducción, activo hasta el Mioceno Medio (hace 12.5 Ma ), seguido (durante el Plioceno inferior) por (b) una extensión cortical que produjo la apertura del protogolfo y la transferencia de la Península de Baja California desde la Placa Norteamericana hacia la Placa Pacífico, y (c) el establecimiento de un régimen de transición entre un límite divergente, al Sur y centro del GC, y un límite transformante, al NGC de éste (12 y 5.5 Ma). Esta última fase es responsable de la configuración actual del GC, con la creación local de corteza oceánica (Bigioggero *et al.*, 1995).

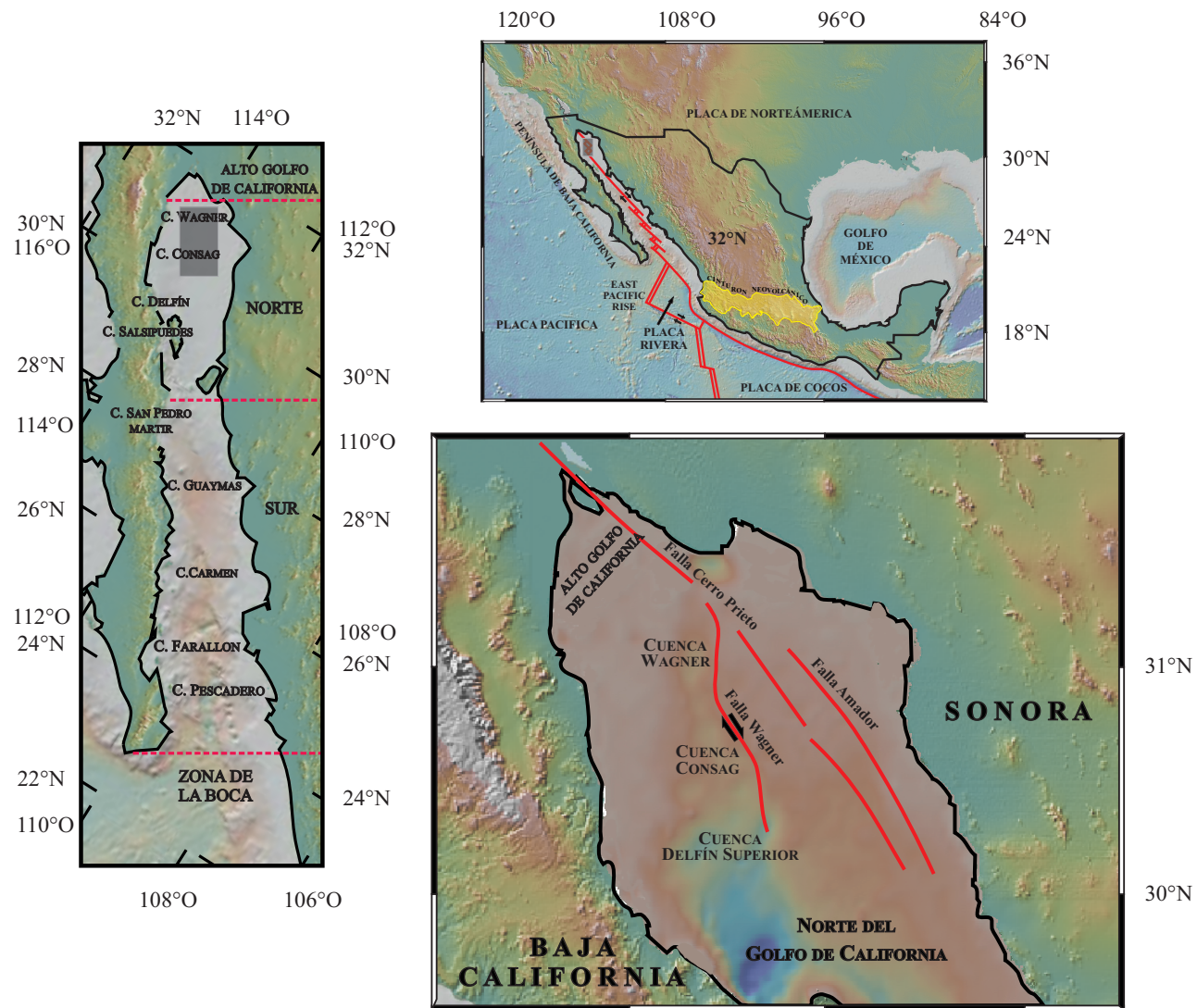


Figura 4.1. Provincias del GC y ubicación geográfica de las cuencas de Wagner y Consag, NGC. Se utilizó la base de datos: Global multi resolution topography (GMRT) y el GeoMapApp2.4.4 para la creación del modelo de la topografía y batimetría.

Durante el Oligoceno, hace 28 Ma, la subducción de la Placa Farallón ocurría a lo largo del margen oeste de la placa de Norteamérica. Posteriormente, en el Mioceno, la Placa Farallón se fragmentó en múltiples placas oceánicas de menor tamaño, cada una aislada y con movimiento propio de subducción por debajo de Norteamérica (Mora-Klepeis y McDowell, 2004). Este contacto dio origen a la subsiguiente formación de los puntos triples Rivera y Mendocino. Durante el Mioceno Medio y el Plioceno Temprano sucedió un cambio en la configuración entre el límite de las placas Pacífico y Norteamericana. La subducción de la Placa Farallón a lo largo de Baja California cesó simultáneamente con la migración del punto triple Mendocino hacia el sur de la península (Martín-Barajas y Delgado-Argote, 1995). Así, la región evolucionó a un contexto de *rift* y tuvo lugar la transferencia progresiva de la Península de Baja California hacia la Placa del Pacífico. El movimiento entre las placas Norteamérica y Pacífica se desarrolló principalmente mediante el sistema de fallas Tosco-Abreojos.

Hace aproximadamente 5 Ma y hasta el presente se ha creado localmente nueva corteza oceánica en la boca del GC. Las primeras cuencas *pull-apart* se formaron hace aproximadamente 4 Ma (Lonsdale, 1989, Martín-Barajas 2000).

El GC es una región intensamente estudiada debido a la singularidad de su origen, desarrollo y evolución; por ello actualmente se tiene una comprensión de la relación existente entre la tectónica, la morfología de las cuencas y sus efectos en la hidrodinámica de la región.

### 4.3 Fisiografía

El GC varía morfológica y estructuralmente de norte a sur, su batimetría es compleja y consiste de una serie de cuencas separadas por umbrales (*sills* en inglés), las cuales se vuelven progresivamente más someras conforme se avanza hacia el norte, en función de los rasgos batimétricos el GC se subdivide en cuatro provincias: El AGC, el NGC, la zona entre las islas, el SGC y la zona de la boca (Figura 4.1) (Lavín *et al.*, 1997b) Como se mencionó en un principio las cuencas de Wagner y Consag están localizadas en la provincia del NGC.

La región del AGC comprende el triángulo descrito por la desembocadura del río Colorado, Punta estrella y Punta Borrascosa (Lavín *et al.*, 1998). Es una plataforma con profundidades <30 m; la batimetría muestra varias cordilleras submarinas con dirección NW-SE, con longitudes mayores a los 40 km y 15 m de altura, amplitudes de 5-10 km y pendientes suaves hacia el oeste, producto de la erosión de la estructura deltaica debido a las fuertes corrientes de mareas y la baja energía del oleaje. Estos canales pueden jugar un papel importante en los procesos de intercambio a lo largo y ancho entre la región del AGC y el NGC, transportando los sedimentos en suspensión hacia las cuencas ubicadas al sur (Álvarez *et al.*, 2009).

En la región NGC se alcanzan profundidades máximas de hasta 500 m en la Cuenca Delfín, pero las cuencas de Wagner y Consag tienen máximos de ~210 m de profundidad (Rusnak *et al.*, 1964). Además en el NGC existen anchas zonas de deformación difusa, semejantes a las que hay

en continente, como la región del Mar de Salton y la de Cuencas y Sierras (*Basin and Range* en inglés). Debido a la ausencia de corteza oceánica, se puede considerar a estas regiones como una corteza transicional. Por otro lado, el límite entre las placas Pacífico y Norteamérica muestra zonas de deformación bien definidas como la Cuenca de Guaymas y el Canal de Ballenas (Aguilar Campos *et al.*, 2008).

La región de las islas en la zona que comunica a la región NGC con la región SGC. La región del SGC es la más extensa y abarca desde la línea de cabo San Lucas hasta los umbrales de las grandes islas. Una característica batimétrica importante es la angosta plataforma continental presente del lado de la península. Las mayores profundidades del GC se observan en la zona de la Boca (hasta 3000) (Lavín *et al.*, 1997b; Aguilar Campos, 2007).

#### 4.4 Rasgos morfológicos de las cuencas de Wagner y Consag

Los trabajos realizados por Vázquez-Figueroa *et al.* (2009) y Canet *et al.* (2010), que se desarrollaron a partir de los resultados de la campaña oceanográfica WAG-01 (Mayo de 2007), describen los rasgos morfológicos y batimétricos de las cuencas Wagner y Consag. La batimetría del área de estudio se realizó utilizando dos ecosondas: *ES-60 Simrad* (18 Khz) y *Simrad EY-60* (120 Khz) y un equipo *TOPAS Kongsberg* (1-6 Khz). Se obtuvo un registro continuo de 2164 millas náuticas, distribuidas en transectos a lo largo y ancho de las cuencas. El ecosondeo permitió detectar columnas de burbujas de gas (*flares*) del fondo marino, mientras que el equipo *TOPAS* permitió caracterizar los rasgos sedimentarios y tectónicos más superficiales (Canet *et al.*, 2010).

En los bordes orientales de ambas cuencas, es decir, siguiendo el trazado inferido de la Falla de Wagner, Canet *et al.* (2010) describen abundantes rasgos morfológicos, así como estructuras sedimentarias relacionados con la liberación masiva de fluidos a profundidades que van de los 65 a los 150 m, principalmente *flares*, *pockmarks*, sedimentos saturados de gas y posibles volcanes de lodo. Mediante ecosonda se registraron un total de 246 sitios con liberación de burbujas (*flares*), concentrados en su mayor parte en tres grupos alineados hacia el NNO y distribuidos sobre el borde oriental de las cuencas de Wagner y Consag (Figura 4.2).

Las imágenes obtenidas con el perfilador acústico del subsuelo marino TOPAS muestran canales de gas y chimeneas asociadas en las capas sedimentarias por debajo de las columnas de burbujas. Además, en muchos casos se observan reflectores y blanqueamiento acústico que indican la acumulación subsuperficial de gas en los sedimentos (Figura 4.3).

En la Cuenca de Consag, Canet *et al.* (2010) descubrieron la presencia de dos posibles volcanes de lodo que fueron denominados “El Puma”, los cuales se hallaron sobre un arreglo de fallas sinsedimentarias. Por encima de ellos se observaron abundantes columnas de burbujas con los equipos de ecosonda (Figura 4.4).

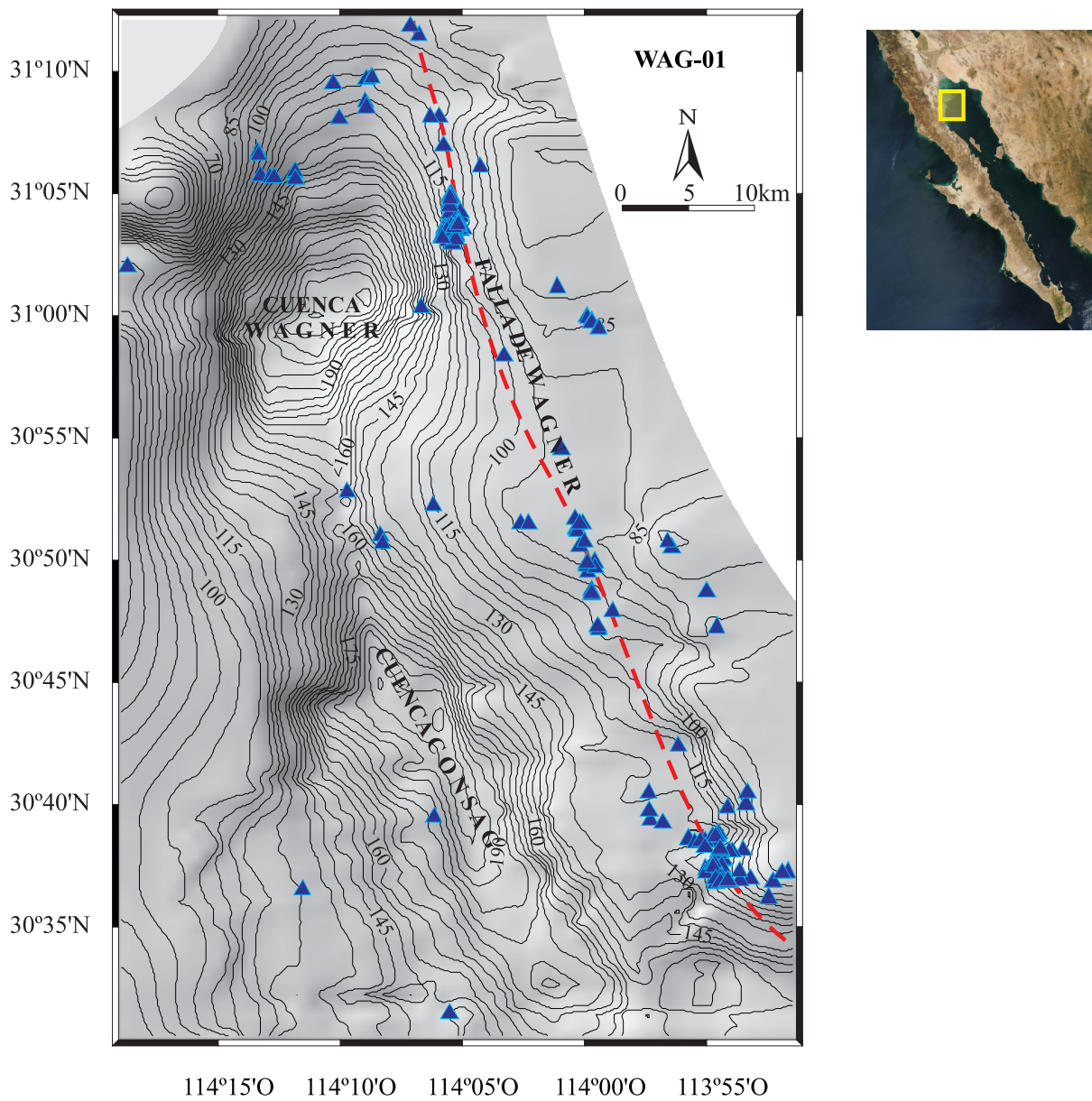


Figura 4.2. Sitios en los cuales fueron observadas zonas de liberación de gas (*flares*; en triángulos azules). La línea discontinua roja indica el trazado inferido de la Falla de Wagner (Canet *et al.*, 2010).

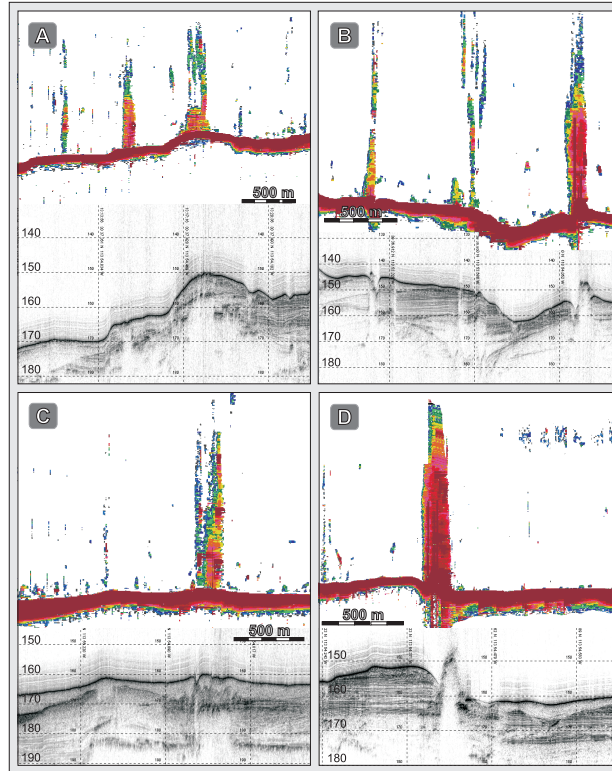


Figura 4.3. Ejemplos de sitios donde se observó la liberación de fluidos; imágenes acústicas registradas con los equipos de ecosonda (columna de agua) y TOPAS (sedimentos). Nótese la correlación entre las columnas de burbujas o *flares* y las estructuras sedimentarias de acumulación y ascenso de gas. Es posible observar como las liberaciones se ubican sobre sitios del piso oceánico que presentan diversos rasgos morfológicos domos (A, C, D) y fallas acompañadas de *pockmarks* (B). Por debajo de las estructuras es observable el blanqueamiento acústico, indicando posiblemente la saturación por gas (Canet *et al.*, 2010).

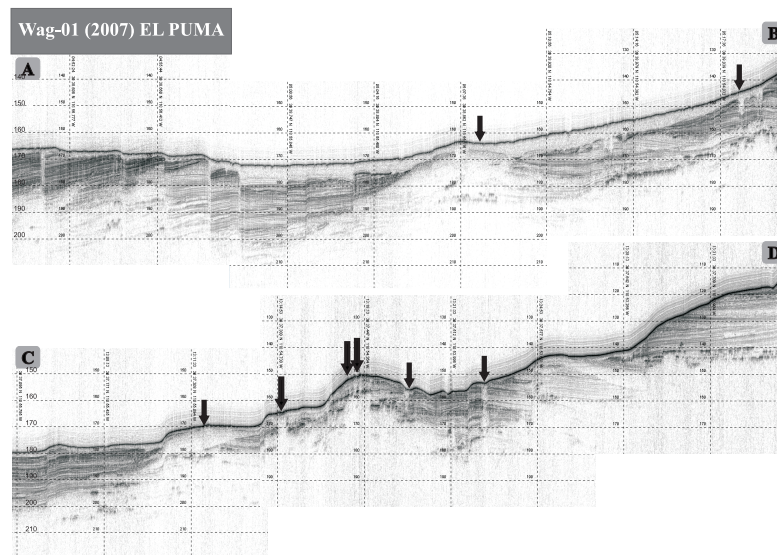


Figura 4.4. Perfiles acústicos de los sedimentos obtenidos mediante el equipo TOPAS correspondientes a los domos de lodo de “El Puma” en el borde este de la Cuenca de Consag. Longitud aproximada: A-B: 5,300 m, C-D: 3,700 m. (Canet *et al.*, 2010). Las flechas indican la presencia de columnas de burbujas.

## 4.5 Geología, fuentes de sedimentos y estratigrafía

El GC está rodeado por los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa y Nayarit, estableciendo como límites de la región las Cordilleras del Sur de California (Estados Unidos) y el Cinturón Neovolcánico, entre las latitudes  $33^{\circ}$ – $35^{\circ}$  N y  $18^{\circ}$ – $22^{\circ}$  N.

El estado de Sonora es geológicamente muy complejo pues presenta afloramientos con edades que varían del Precámbrico al Cuaternario, con una gran heterogeneidad litológica. Predominan las rocas ígneas, representadas por el vulcanismo ácido de la Sierra Madre Occidental (Mesozoico-Terciario), al oriente, y por los cuerpos intrusivos de composición ácida-intermedia que se hallan por todo el estado (Terciario inferior). En segundo lugar en abundancia hay rocas sedimentarias, tanto continentales como marinas (Cuaternario), distribuidas desde Caborca y Agua Prieta hasta Sinaloa. Por último, las rocas metamórficas afloran principalmente en la porción noroeste del estado (Precámbrico-Mesozoico). Respecto a los sedimentos recientes, predominan los depósitos aluviales, que cubren buena parte de la porción oeste del estado formando la llanura Sonorense (Cendejas-Cruz *et al.*, 1992). En la Península de Baja California afloran rocas que varían en edad del Paleozoico Tardío al Holoceno. Los afloramientos más extensos del Norte de la Península corresponden a rocas sedimentarias y volcánicas mesozoicas (Formación Alisitos), intruidas localmente por rocas graníticas y parcialmente cubiertas por rocas volcánicas continentales de composición dacíticas a andesíticas y edad Terciaria. Las unidades más recientes consisten en sedimentos clásticos continentales y marinos, depósitos lacustres, aluviales, eólicos y evaporíticos poco o nada consolidados, y rocas volcánicas básicas (Morán-Zenteno, 1984; Islas-López, 1999). Los depósitos terrígenos en el GC reflejan diversos factores, a diversas escalas de tiempo y grados de influencia: (1) litología de las cuencas hidrológicas y regiones emergidas adyacentes, (2) lluvia y flujo de ríos que descargan, (3) transporte y entradas eólicas, y (4) patrones de circulación del GC (Baba *et al.*, 1991).

El Batolito Peninsular, la Sierra Madre Occidental y el Desierto de Sonora son las principales áreas fuente de sedimentos al NGC (Allison, 1964), sumados a la descarga del Río Colorado y otros ríos menores como el Río Concepción (Andrews, 1991). Las entradas fluviales del Río Colorado se caracterizan por ser ricas en anfíboles-epidota-piroxeno, debido a la mezcla de fuentes ígneas y metamórficas (Carriquiry y Sánchez, 1999).

En el caso particular de la región del NGC, alrededor del 90 % de material sedimentario primigenio deriva de los ríos que descargan en la región. Antes de su embalse, el RC descargaba alrededor de  $160 \cdot 10^6$  t.año<sup>-1</sup>, siendo la fuente principal de sedimentos. Sin embargo, actualmente sólo el 0.5 % de la descarga original de sedimentos, alcanza el GC. Baba *et al.* (1991) y Carriquiry y Sánchez (1999) reportan como relativamente constante la tasa de sedimentación en la región central del GC, señalando que el origen de este material es el DRC. La erosión, resuspensión y retrabajado de dicha estructura alimentan al sistema sedimentario en la región. Tienen también un papel



significativo las fuentes eólicas provenientes de la región NO de México (Carriquiry y Sánchez 1999).

Los ambientes estuarinos del NGC son el camino a través del cual sedimentos finos alcanzan el mar abierto; la distribución y dispersión de los sedimentos dependerá del movimiento del agua, de modo que las mareas continuamente erosionan, transportan y depositan sedimentos (Shumilin *et al.*, 2002; Álvarez y Jones, 2002).

En lo que corresponde a la estratigrafía, Hernández Pérez (2008) señala, de acuerdo a datos sísmicos, que el paquete sedimentario en la Cuenca de Consag tiene más de 5 km de espesor. Las perforaciones realizadas por PEMEX en esta cuenca han alcanzado profundidades de 4 km de sedimentos (Mioceno Superior-Pleistoceno < 5 Ma) sin llegar al basamento (Hernández Pérez, 2008). Para el caso de la Cuenca de Wagner, se identificaron estratos que son cortados por fallas oblicuas. Según Pérez-Cruz (1982) el espesor máximo de la secuencia sedimentaria esta cuenca es de 8,000 m, de los cuales sólo se han perforado 5,590 m. Los estudios bioestratigráficos indican que su edad va del Pleistoceno al Cuaternario. La secuencia sedimentaria es de origen deltaico del RC, predominantemente areno-arcillosa, con bajo contenido faunístico, y con litificación incipiente.

#### 4.6 Oceanografía Física

El Norte del GC presenta un clima seco; su promedio anual de lluvia es < 100 mm y del 60 al 80% del total es descargada durante los meses de julio-septiembre en la porción NO de la Sierra Madre Occidental. En un ciclo anual, el GC tiene una ganancia de calor y la evaporación excede a la precipitación (Marinone, 2003). En invierno los vientos del noroeste circulan a lo largo del eje del GC (rapidez de 8 a 12 m·s<sup>-1</sup>) y del sureste en verano (velocidad promedio de 5 m·s<sup>-1</sup>) (Lavín *et al.*, 1997) provocando zonas de surgencia en las costa oeste y este respectivamente, convirtiendo al GC una de las regiones con mayores concentraciones de nutrientes superficiales en el mundo (Álvarez-Borrego *et al.*, 1978; Santamaría del Angel *et al.*, 1994). Douglas *et al.*, (2007), menciona que son cuatro los principales factores que controlan la dinámica del GC y que además contribuyen a la producción primaria transportando y liberando nutrientes (a) la mezcla por viento y las surgencias costeras, principalmente a lo largo del margen de México; (2) la mezcla por marea y turbulencia; (c) la circulación termohalina y (d) las ondas costeras atrapadas, producto de la influencia del Océano Pacífico, además los giros a mesoescala.

En particular, la región del NGC se caracteriza por ser el ambiente somero más dinámico en México debido a diversos fenómenos que ocurren en la región. En el NGC y la región de las grandes islas el amplio rango de la marea (<7 m) desarrolla rápidas corrientes (1 m·s<sup>-1</sup>) durante la primavera; estas corrientes de marea son forzamientos que producen una intensa mezcla vertical en la columna de agua del NGC (Álvarez-Borrego *et al.*, 1978; Lavín *et al.*, 1998; Alvarez y Jones 2002). Además, la alta evaporación y el enfriamiento de las aguas superficiales durante el invierno producen fenómenos de inversión estuarina y con esto corrientes de gravedad (0.1 m·s<sup>-1</sup>). En

este proceso el agua caliente pero salada y densa, bien mezclada en las regiones someras en el AGC, fluye por debajo del agua fría, menos salada y por lo mismo más ligera, de fuera de la costa, desplazándose con una pendiente hacia abajo cerca del fondo marino y moviéndose hacia el sur llenando las partes profundas de las cuencas. Debido a este fenómeno, durante la presencia de mareas muertas hay una disminución de la mezcla que produce una ligera estratificación de la columna de agua (Lavín *et al.*, 1998). Otro factor que también influye en la dinámica del NGC son los giros estacionales, durante verano la circulación es ciclónica con corrientes del orden de  $30 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , mientras que durante invierno la circulación es anticiclónica, con corrientes promedio del mismo orden (Lavín *et al.*, 1997b; Pegau *et al.*, 2002; Marinone, 2003). Los giros ciclónicos causan divergencia y actúan como una bomba de nutrientes advectando aguas intermedias ricas en nutrientes a la zona fótica y transportando las aguas empobrecidas en nutrientes del oeste a el este. Los giros anticiclónicos propician el hundimiento del agua desplazando las aguas de la región oriental a lo largo del golfo (Douglas *et al.*, 2007).

De modo similar a otros estuarios inversos, los gradientes de densidad horizontal en las zonas costeras someras del AGC son sustituidos por una intensa mezcla vertical durante las mareas de vivas. Durante las mareas muertas, la disminución de la mezcla permite tener un contraste horizontal de densidad que da inicio a las corrientes de marea.

A lo largo del GC es posible distinguir diferentes masas de agua (Torres-Orozco, 1993). Bray (1988), Lavín *et al.*, (1988) y Delgadillo-Hinojosa *et al.* (2006) mencionan que la masa de agua conocida como Agua del Golfo de California, la cual es formada *in situ* como resultado de procesos de evaporación-enfriamiento en el AGC, prevalece en la región del NGC.

Uno de los rasgos más notables del NGC es la gran variabilidad de las temperaturas superficiales, no sólo en las regiones costeras, sino también mar adentro. En cuanto a temperatura y salinidad, Álvarez-Borrego *et al.*, (1975) mencionan valores mínimos de  $8.25^{\circ}\text{C}$ , registrados en diciembre, y máximos de  $32.58^{\circ}\text{C}$ , registrados en agosto. La salinidad superficial mínima es de 35.28 para octubre y hasta 41 en julio. Específicamente para el periodo de muestreo (mayo de 2007), Vázquez-Figueroa *et al.* (2009) mencionan que la temperatura superficial para la región de las cuencas varió entre  $20^{\circ}\text{C}$  y  $22.60^{\circ}\text{C}$  y la salinidad superficial osciló entre 35.40 a 35.80, mientras que para la columna de agua la temperatura varió de  $15^{\circ}\text{C}$  a  $22.70^{\circ}\text{C}$  y la salinidad de 34.9 a 35.8.



## 5. Materiales y métodos

### 5.1 Recolección de muestras

Se recolectaron 31 muestras de sedimento superficial utilizando una draga *Smith McIntyre* en Mayo del 2007, durante la campaña oceanográfica WAG-01, a bordo del B/O “El Puma” en las cuencas de Wagner y Consag (Figura 5.1). El material recolectado se almacenó en bolsas de plástico cerradas hasta su posterior análisis en el laboratorio. En algunas estaciones junto con el material sedimentario se obtuvieron algunos fragmentos pequeños de roca.

### 5.2 Pretratamiento de las muestras

Las muestras de sedimento fueron secadas a 60° C en una estufa y almacenadas en bolsas de plástico. Posteriormente el material se fraccionó en diferentes cantidades, de acuerdo con los requerimientos especificados para las diferentes técnicas de análisis que se les aplicarían (granulométrico, carbono orgánico, carbonatos, elementos mayores y traza). Para el análisis químico de composición elemental (mayores y trazas), las muestras además fueron molidas en un mortero de ágata para trabajar con fracción menor de 200  $\mu\text{m}$  (Para más detalles del método consultar Shumilin *et al.*, 2000 y Rodríguez-Meza *et al.*, 2009).

### 5.3 Análisis Granulométrico

El análisis de tamaño de grano se realizó utilizando un analizador de partículas de difracción láser *Beckman Coulter 13320* del Laboratorio de Oceanología Geológica del Centro Interdisciplinario de Ciencias de Mar (CICIMAR) del Instituto Politécnico Nacional en la Paz, B.C.S. Para realizar el análisis se pesó entre 0.2 y 0.25 g de muestra y se colocó en un vaso de precipitados. Posteriormente se adicionaron 50 ml de hexametáfosfato de sodio 5 % y 50 ml de acetona 50 %; el hexametáfosfato actúa como dispersante separando las partículas unidas por fuerzas electrostáticas y la acetona disuelve la materia orgánica. Finalmente se agitó y preparó para su inyección (1 ml) en el equipo.

Al inyectarse en el equipo, las partículas pasan a través del orificio produciendo un cambio de impedancia (resistencia), el cual está determinado por el tamaño de la partícula. El sistema cuenta las partículas individuales y provee una distribución de tamaños de partícula. Los parámetros texturales de los sedimentos (tamaño de grano, clasificación, asimetría) se calcularon utilizando el programa GRADISAT 12.

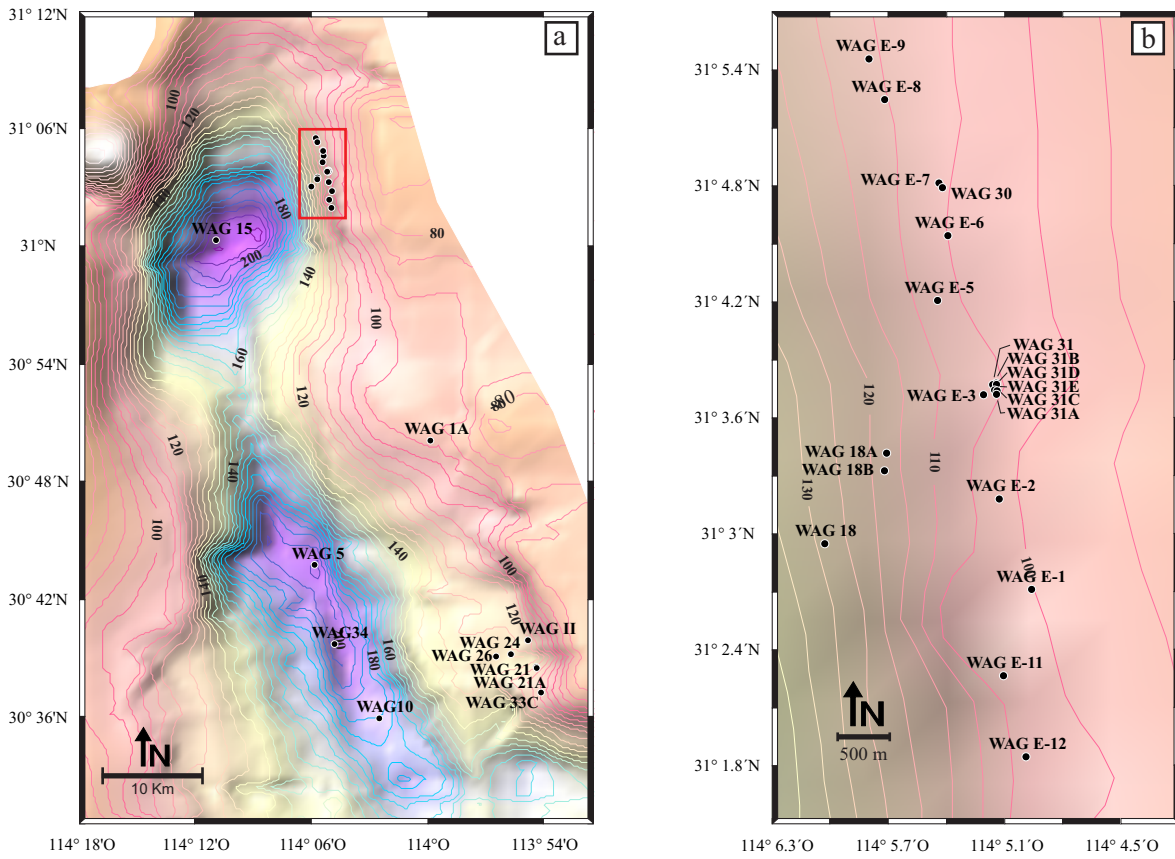
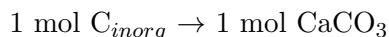


Figura 5.1. a) Ubicación de los sitios de muestreo de sedimentos en las cuencas de Wagner y Consag, NGC, b) detalle del muestreo en el borde este de la cuenca Wagner.

## 5.4 Determinación de carbono orgánico y carbono inorgánico

Los contenidos del carbono total ( $C_{tot}$ ) y carbono inorgánico ( $C_{inorg}$ ) fueron medidos utilizando un modulo SSM-5000A para muestras sólidas acoplado a un equipo TOC-VC *Shimadzu* del Instituto de Oceanología P. P. Shirshov de la Academia de Ciencias de Rusia (Moscu, Rusia). Se utilizaron las técnicas de oxidación por combustión catalítica a 900° C (*Catalytically aided combustion oxidation* en inglés) y pre-acidificación, con temperatura del horno a 200° C. En el primer caso, 1 g de muestra es colocado sobre un catalizador de platino a 900° C en una atmósfera rica en oxígeno. El CO<sub>2</sub> generado es acarreado por el oxígeno y medido con un detector de infrarrojo no dispersivo (NDIR por sus siglas en inglés). Para la determinación de  $C_{inorg}$  la muestra fue previamente acidificada utilizando ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>). Una vez inyectado el ácido a la muestra el CO<sub>2</sub> comienza a generarse, y al igual que para el caso anterior, es acarreado hacia el detector y finalmente medido.

El carbono orgánico ( $C_{org}$ ) se calculó por la diferencia de los contenidos de  $C_{tot}$  y  $C_{inorg}$ . Los contenidos de  $C_{inorg}$  se usaron para calcular la contribución del carbonato de calcio mediante la siguiente relación estequiométrica:



## 5.5 Análisis de elementos mayores y traza

El análisis de elementos mayores y traza (incluyendo tierras raras) se realizó por diferentes métodos: análisis por activación neutrónica instrumental (INAA, por sus siglas en inglés), fluorescencia de rayos X (XRF, por sus siglas en inglés) y espectrometría de masas con fuente de plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS, por sus siglas en inglés). Para todos los casos, además de las muestras, se analizaron materiales de referencia estándar (NIST 1646a y PACS-2) con el objetivo de verificar la calidad de los análisis y evaluar su exactitud.

### 5.5.1. Análisis por Activación Neutrónica Instrumental

El análisis de muestras por INAA se realizó en el Instituto de Geoquímica y Química Analítica de V.I. Vernadski de la Academia de Ciencias de Rusia (Moscu, Rusia). Las muestras y los materiales de referencia fueron empaquetados en papel aluminio e irradiados con neutrones termales (flujo:  $2.8 \cdot 10^{13} \text{ n} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ). La radiactividad inducida de cada muestra fue posteriormente medida con un espectrómetro de rayos gamma marca Nokia con 4096 canales y con detector Ge(Li) de alta resolución. Los cálculos de composición elemental se realizaron con un software estadístico especial, por comparación con materiales de referencia estándar reconocidos internacionalmente (Shumilin *et al.*, 2002; Rodríguez-Meza *et al.*, 2009).

### 5.5.2. Análisis por Fluorescencia de Rayos X

El análisis de muestras por XRF se realizó en el Instituto de Química y Biología de Ambientes Marinos en Oldenburgo, Alemania. Para su análisis, 600 mg de muestra (y material de referencia) fueron mezclados con 3,600 mg de tetraborato de litio ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), preoxidados a  $500^\circ\text{C}$  con  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  y fundidos a perlas de cristal. Estas perlas fueron analizadas utilizando un espectrómetro Philips PW 2400 calibrado con 29 geoestandars seleccionados cuidadosamente. La precisión analítica se revisó de manera similar a como se hizo con los análisis por INAA, mediante materiales de referencia internacionales (Schnetger *et al.*, 2000; Böning *et al.*, 2004).

### 5.5.3. Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo

El análisis por ICP-MS se realizó en los laboratorios comerciales de Actlabs Laboratories (Ontario, Canadá). Se seleccionó el paquete analítico E2 (ultratrace-2), para el cual 0.5 g de muestra son digeridos con agua regia (solución de ácido nítrico y ácido clorhídrico) durante 2 horas a  $95^\circ\text{C}$ ; posteriormente, esta solución es enfriada, diluida con agua desionizada y homogeneizada. Las soluciones finales fueron analizadas mediante un ICP *Perkin Elmer* y, de manera similar a los casos anteriores, se utilizó una serie de estándares geoquímicos como control. Cabe resaltar que esta digestión no es total para algunos silicatos y óxidos.

Para verificar la calidad de los análisis se usó el concepto de exactitud y precisión, la exactitud se calculó utilizando los análisis de los materiales de referencia (estándares) por los diferentes métodos y el valor certificado para los mismos (Rodríguez Castañeda, 2008; Leal Acosta, 2008). Para evaluar la exactitud del análisis para cada elemento se determinó el error entre el valor real ( $\text{Estándar}_{\text{certificado}}$ ) y el medido ( $\text{Estándar}_{\text{medido}}$ ) de los materiales de referencia; así, el error se calculó con base en la siguiente ecuación:

$$\text{Error}(\%) = \left| \frac{[\text{Estándar}_{\text{medido}}] - [\text{Estándar}_{\text{certificado}}]}{[\text{Estándar}_{\text{certificado}}]} * 100 \right| \quad (5.1)$$

La precisión por otro lado se evaluó utilizando el concepto de coeficiente de variación (CV) el cual se calculó como:

$$\text{CV}(\%) = \frac{\text{DE}}{\text{Media}} * 100 \quad (5.2)$$

Donde DE es la desviación estándar y la media el promedio. Si los resultados obtenidos del análisis son semejantes y por lo tanto el coeficiente de variación es pequeño, más precisa es la serie de medidas y el método confiable. Cabe mencionar además que el porcentaje de CV dependerá de la concentración del analito en la muestra, cuando la concentración de un analito es de 1 ppm el coeficiente de variación máximo será del 16% (Harris, 2007). Para los datos de composición de las muestras de sedimento, con excepción del Ti y Sb, el resto de elementos traza muestra

un coeficiente de variación menor al 16 %, por otro lado los elementos mayoritarios muestran un CV menor al 1 % (Tabla 5.1).

En función de los resultados de exactitud y precisión obtenidos y considerando que un error menor al 20 % es aceptable, se estableció la base de datos que describe la composición elemental de los sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag, NGC. En la Tabla 5.1 se muestran los elementos analizados, el método de análisis, el límite de detección de cada método y los valores de exactitud y precisión.

## 5.6 Análisis Mineralógico

### 5.6.1. Microscopio Electrónico de Barrido

El estudio mineralógico y textural de los sedimentos se realizó utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) del Laboratorio de Petrografía y Mineralogía del Departamento de Recursos Naturales del Instituto de Geofísica de la UNAM. Este equipo se basa en la interacción entre un haz de electrones y la superficie de la muestra y los efectos de la interacción de la materia con los electrones. El SEM utilizado permite examinar muestras en un rango de aumentos que abarca desde 100x hasta 10,000x, y cuenta con un detector de electrones retrodispersados (BSE por sus siglas en inglés). Además, este equipo cuenta con un sistema de espectroscopía por dispersión de energías de rayos X (EDS por sus siglas en inglés), el cual funciona como un analizador elemental semicuantitativo semipuntual. El equipo utilizado para el presente estudio fue un Hitachi TM-1000 y no requiere ningún tratamiento previo de las muestras.

### 5.6.2. Difracción de Rayos X

Los datos de mineralogía por DRX fueron tomados de Birosta (2008); los análisis fueron realizados en los *Serveis Científico-Tècnics de la Universitat de Barcelona* (UB), en España. El difractómetro utilizado fue un *Panalithical X'Pert PRO MPD ALFA 1*; las mediciones se llevaron a cabo con un ángulo de barrido de 4-100°, un paso de 0.017° de  $2\theta$  y con un tiempo de adquisición de 50.2 segundos. La radiación utilizada fue la  $\text{CuK}\alpha$ , con una longitud de onda de 1,5418 Å. El programa *X'Pert* y la base de datos de DRX del *International Center for Diffraction Mineral Data* (JCPDS) se utilizaron para identificar las fases minerales presentes en la muestras de sedimentos. Para la cuantificación se realizó, para cada muestra, un ajuste de perfil utilizando el método de Rietveld.



Tabla 5.1. Métodos de análisis, límite de detección y exactitud para los elementos mayores y traza analizados en sedimentos de las cuencas Wagner y Consag, NGC.

Elemento	Método	Límite de Detección	Exactitud (%)	Material de Referencia Estándar	Precision (%)
Al (%)	FRX	-	6.4	NIST 1646a	0.15
As (mg·kg <sup>-1</sup> )	ICP-MS	-	12.2	NIST 1646a	14.29
Ba (mg·kg <sup>-1</sup> )	FRX	-	9.2	NIST 1646a	4.70
Bi (mg·kg <sup>-1</sup> )	ICP-MS	0.02	2.9	GRX-1	-
Ca (%)	FRX	-	3.7	NIST 1646a	0.79
Ce (mg·kg <sup>-1</sup> )	INAA	0.2	16.6	NIST 1646a	4.59
Co (mg·kg <sup>-1</sup> )	FRX	-	0	NIST 1646a	0
Cr (mg·kg <sup>-1</sup> )	INAA	2	8	NIST 1646a	10.17
Cs (mg·kg <sup>-1</sup> )	ICP-MS	0.02	3	NIST 1646a	-
Cu (mg·kg <sup>-1</sup> )	ICP-MS	0.01	2.4	NIST 1646a	2.35
Eu (mg·kg <sup>-1</sup> )	INAA	0.03	-	-	11.92
Fe (%)	FRX	-	1.4	NIST 1646a	0.41
Hf (mg·kg <sup>-1</sup> )	INAA	-	-	-	11.66
K (%)	FRX	-	11.9	NIST 1646a	0.27
La (mg·kg <sup>-1</sup> )	INAA	0.2	7.8	NIST 1646a	4.50
Lu (mg·kg <sup>-1</sup> )	INAA	0.04	-	-	13.94
Mg (mg·kg <sup>-1</sup> )	FRX	-	2.1	NIST 1646a	0.90
Mn (%)	ICP-MS	1·10 <sup>-4</sup>	10	GRX-1	-
Mo (mg·kg <sup>-1</sup> )	ICP-MS	0.01	5	NIST 1646a	2.21
Na (%)	FRX	-	4.6	NIST 1646a	1.64
Nd (mg·kg <sup>-1</sup> )	INAA	5	-	-	2.14
Ni (mg·kg <sup>-1</sup> )	ICP-MS	0.1	0.7	GRX-6	2.12
P (%)	ICP-MS	10	1.2	NIST 1646a	4.33
Pb (mg·kg <sup>-1</sup> )	FRX	-	2.9	NIST 1646a	14.32
Rb (mg·kg <sup>-1</sup> )	FRX	-	13.9	NIST 1646a	4.45
S (%)	ICP-MS	1·10 <sup>-3</sup>	2.4	NIST 1646a	0.16
Sb (mg·kg <sup>-1</sup> )	INAA	0.05	19.9	NIST 1646a	41.25
Sc (mg·kg <sup>-1</sup> )	INAA	0.05	9.9	NIST 1646a	4.09
Si (mg·kg <sup>-1</sup> )	FRX	-	-	-	0.03
Sm (mg·kg <sup>-1</sup> )	INAA	0.05	-	-	2.15
Sn (mg·kg <sup>-1</sup> )	ICP-MS	0.05	4	PACS-2	3.45
Sr (mg·kg <sup>-1</sup> )	FRX	-	11	NIST 1646a	0.94
Ta (mg·kg <sup>-1</sup> )	INAA	-	-	-	49.49
Tb (mg·kg <sup>-1</sup> )	INAA	0.05	-	-	13.74
Te (mg·kg <sup>-1</sup> )	ICP-MS	0.02	0.8	GRX-1	-
Th (mg·kg <sup>-1</sup> )	INAA	-	19.2	NIST 1646a	10.73
Ti (%)	FRX	-	18.6	NIST 1646a	43.56
Tl (mg·kg <sup>-1</sup> )	ICP-MS	0.02	0	GRX-1	-
U (mg·kg <sup>-1</sup> )	INAA	0.2	12.9	NIST 1646a	11.79
V (mg·kg <sup>-1</sup> )	FRX	-	10.8	NIST 1646a	5.26
Y (mg·kg <sup>-1</sup> )	FRX	-	-	-	8.06
Yb (mg·kg <sup>-1</sup> )	INAA	0.02	-	-	11.93
Zn (mg·kg <sup>-1</sup> )	ICP-MS	0.1	2.4	PACS-2	2.08
Zr (mg·kg <sup>-1</sup> )	FRX	-	-	-	1.39

## 5.7 Determinación de Isótopos

### 5.7.1. Determinación de la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en barita

Los datos de isótopos de Sr fueron tomados de Antunez Argüelles (2009). El análisis de isótopos de Sr se realizó en el Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS), en el Instituto de Geofísica de la UNAM ocupando un equipo Finnigan MAT 262. Previo a su determinación, se realizó una transformación química del sulfato insoluble  $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{SO}_4$  a carbonato soluble  $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{CO}_3$  utilizando el método propuesto por Villanueva-Estrada (2011).

### 5.7.2. Análisis de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en carbonatos

Los análisis de isótopos estables de C y O fueron realizados en los *Serveis Científico-Tècnics de la UB*. La extracción del  $\text{CO}_2$  se realizó con un *Carbonate Kiel Device III*, fabricado por *Thermo Finnigan*, que reproduce de manera automatizada el método de McCrea (1950). El carbonato es atacado con ácido fosfórico al 85.5%w a una temperatura de 70° C. El tiempo de reacción es de 3 minutos por muestra. El *Carbonate Device* está acoplado a un espectrómetro de relación de masas isotópicas *MAT-252* de *Thermo Finnigan*, en el que tiene lugar el análisis del  $\text{CO}_2$  producido. Para controlar la calidad de los resultados se usa el estándar internacional NBS-19, con un valor de  $\delta^{13}\text{C}$  (PDB, *Belemnite americana* de la formación Peedee del Cretácico) = 1,95 ‰ y  $\delta^{18}\text{O}$  (PDB) = 2,20 ‰ certificado por la IAEA (*International Atomic Energy Agency*). La desviación estándar de los patrones es de  $\pm 0.02$  ‰ para  $\delta^{13}\text{C}$  y de  $\pm 0.07$  ‰ para  $\delta^{18}\text{O}$  (PDB).

### 5.7.3. Análisis de $\delta^{34}\text{S}$ en barita

Los isótopos estables de S en barita fueron determinados en los *Serveis Científico-Tècnics de la UB*. Las muestras fueron analizadas utilizando un espectrómetro de masas *Delta C Finnigan MAT* de flujo continuo con un analizador elemental *TC-EA*, de acuerdo con el método de Giese-mann *et al.* (1994). En esta técnica la preparación de la muestra requiere varias transformaciones químicas para finalmente producir  $\text{SO}_2$  con una composición isotópica proporcional a la de en la muestra. La técnica de preparación inicia con la reducción del  $\text{BaSO}_4$  a  $\text{H}_2\text{S}$  con ácido fosfórico y Sn(II) a 300° C en vapor de  $\text{N}_2$  (Kiba *et al.*, 1955). El  $\text{H}_2\text{S}$  generado es convertido a  $\text{Ag}_2\text{S}$  por adición de  $\text{AgNO}_2$ , el  $\text{Ag}_2\text{S}$  es oxidado a  $\text{SO}_2$ , éste es calentado a 1000° C durante 90 s y es separado de otros gases por cromatografía de gases, para finalmente ser analizado en un espectrómetro de masas. Los resultados se reportan en valores por mil  $\delta^{34}\text{S}$  relativos a el estándar CDT, la resolución lateral del rayo láser es de alrededor de 250  $\mu\text{m}$ , y la precisión analítica está dentro de  $\pm 0.1$   $\delta^{34}\text{S}$  a  $1\sigma$ .

El resumen de la técnicas metodológicas se muestra en la Figura 5.2.

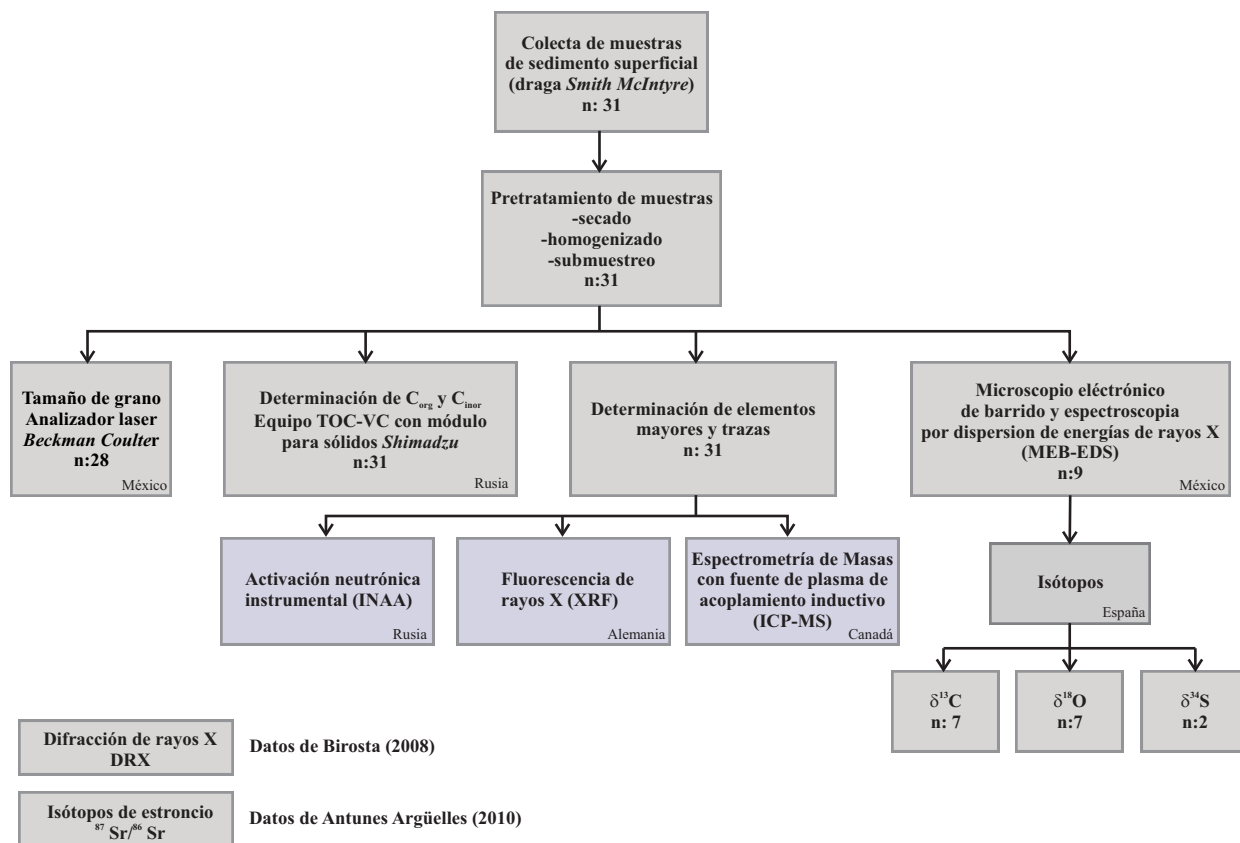


Figura 5.2. Métodos utilizados en este estudio para el análisis de sedimentos colectadas en las cuencas Wagner y Consag, NGC. La letra n indica en número de muestras analizadas en cada caso.

## 5.8 Análisis y tratamiento de los datos

### 5.8.1. Normalización de los elementos

Con el fin de estimar la posible influencia de las fuentes de aporte, así como para suavizar o eliminar efectos por tamaño de grano de los sedimentos o por dilución por materiales inertes (carbonato de calcio, sílice biogénico o cuarzo) las concentraciones de elementos mayores y traza se normalizaron con el contenido en Sc (Leal Acosta, 2008; Rodríguez Castañeda, 2008, Shumilin *et al.*, 2002). Este elemento, de manera similar al Al y Li, es un buen indicador de la contribución por materiales derivados de la corteza terrestre (Salomons y Förstner, 1984; Shumilin *et al.*, 2002). Además, aunque en este estudio se determinó Al, se optó por el Sc como elemento normalizador, tomando en cuenta que su valor de correlación con los demás elementos fue el más alto (Figura 5.3). La normalización de los elementos se realizó con base en la siguiente ecuación:

$$El_{norm} = \frac{El_{sed}}{Sc_{sed}} \quad (5.3)$$

Donde  $El_{sed}$  es el contenido del elemento químico en cuestión en los sedimentos;  $Sc_{sed}$  es el contenido de escandio en los sedimentos y  $El_{norm}$  es el elemento normalizado.

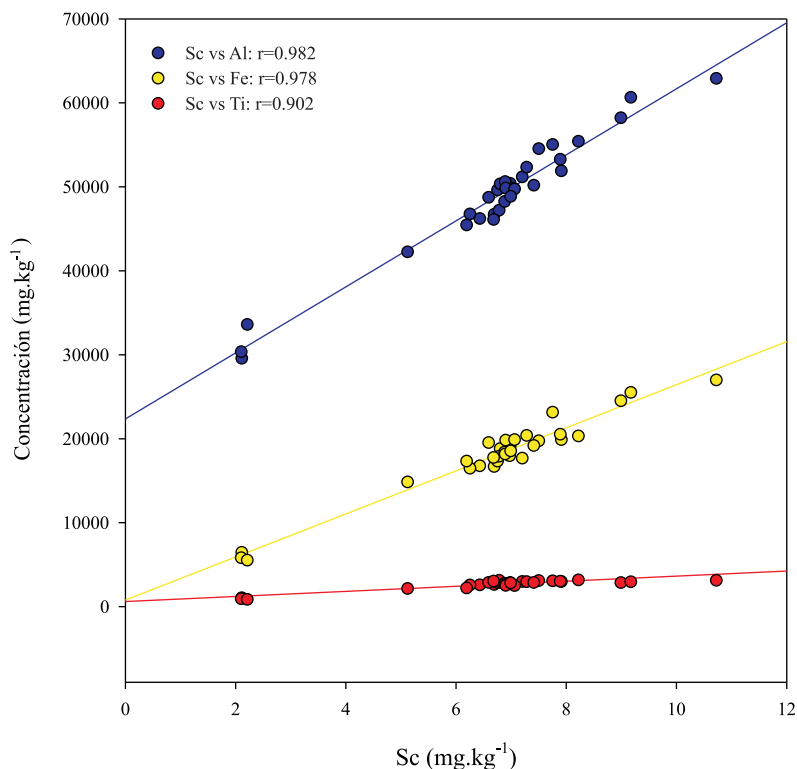


Figura 5.3. Regresión lineal y correlación de los contenidos de Sc y Al, Fe, Ti en los sedimentos superficiales de las cuencas de Wagner y Consag, NGC.

Tabla 5.2. Clasificación de los elementos de acuerdo con el FE.

Valor de FE	Intensidad del enriquecimiento
>2	Elemento altamente enriquecido
~1	Elementos conservativos
<1	Elemento ligeramente empobrecido

### 5.8.2. Factor de Enriquecimiento

El factor de enriquecimiento (FE) se obtiene mediante una doble normalización; para este caso utilizando como elemento normalizador el  $Sc$ , que permite valorar la calidad de los sedimentos para identificar enriquecimientos en los elementos analizados (Förstner y Wittman, 1979; Shumilin *et al.*, 2002). Los factores de enriquecimiento se calculan como:

$$FE = \frac{\left(\frac{El_{sed}}{Sc_{sed}}\right)}{\left(\frac{El_{cort}}{Sc_{cort}}\right)} \quad (5.4)$$

Donde  $El_{sed}$  es el contenido del elemento químico en cuestión en los sedimentos;  $Sc_{sed}$  es el contenido de escandio en los sedimentos,  $El_{cort}$  y  $Sc_{cort}$  son las concentraciones promedio en la corteza terrestre del elemento en cuestión y de escandio, respectivamente. Para este estudio se utilizaron los valores proporcionados por Wedepohl (1995) para la corteza superior.

Los elementos se clasificaron de acuerdo con los valores señalados en la Tabla 5.2 (Shumilin *et al.*, 2002):

### 5.8.3. Normalización de los elementos de las tierras raras

Los elementos de tierras raras (REE, por sus siglas en inglés) son de importancia para el estudio y entendimiento de procesos geoquímicos y biogeoquímicos (transporte, sedimentación, etc.), pues debido a sus propiedades químicas y físicas muy estables pueden considerarse buenos trazadores geoquímicos (Piper, 1974; Dubinin, 2004).

Para el caso de los REE se efectuó una normalización utilizando las concentraciones promedio determinadas para la lutita Norteamericana (NASC por sus siglas en inglés; Taylor y McLennan, 1985), esto con el fin de observar la variabilidad de estos elementos e identificar posibles anomalías positivas o negativas con respecto a la corteza (Piper, 1974; Rollinson, 1993). Para la normalización se empleó la siguiente ecuación:

$$REE_{norm} = \frac{REE_{sed}}{REE_{NASC}} \quad (5.5)$$

Donde  $REE_{norm}$  es el valor normalizado para el elemento de las REE,  $REE_{sed}$  la concentración del elemento en los sedimentos y  $REE_{NASC}$  la concentración del elemento en el estándar NASC.

El Ce y el Eu, a diferencia de las otras REE, pueden cambiar su estado de oxidación (Ce; de 3+ a 4+ por oxidación y el Eu; de 3+ a 2+ por reducción) y consecuentemente su solubilidad, por ejemplo debido a procesos de intemperismo o alteración hidrotermal. Por ello, sus contenidos son diagnóstico de algunos ambientes de formación. Consecuentemente suelen fraccionarse o separarse de las otras REE definiendo anomalías positivas o negativas (Tlig y Steinberg, 1983; Toyoda et al., 1990; Dubinin, 2004). Para el caso del Eu se utiliza comúnmente la siguiente ecuación (p.e. Shumilin *et al.*, 2005):

$$Eu_{anom} = \frac{2Eu_{norm}}{Sm_{norm} + Gd_{norm}} \quad (5.6)$$

Donde  $Eu_{anom}$  es el valor de la anomalía de Eu y  $Eu_{norm}$ ,  $Sm_{norm}$  y  $Gd_{norm}$  son los valores normalizados de estas REE. Sin embargo, la relación  $Eu_{norm} / Sm_{norm}$  se puede utilizar cuando no hay valores de Gd medidos (Dubinin, 2004), como es el caso de este estudio.

Por otro lado, las anomalías de Ce se calculan utilizando las ecuaciones de Dubinin (2004):

$$Ce_{anom} = \frac{2Ce_{norm}}{La_{norm} + Pr_{norm}} \quad (5.7)$$

Donde  $Ce_{anom}$  es el valor de la anomalía de Ce y de manera similar al caso anterior  $Ce_{norm}$ ,  $La_{norm}$  y  $Pr_{norm}$  son los valores normalizados de estas REE. Ésta no es la única manera de calcular de la anomalía de Ce cuando hay análisis de REE faltantes, el Nd se puede utilizar en lugar del Pr si los datos de concentración de este elemento están ausentes:

$$Ce_{anom} = \frac{Ce_{norm}}{\frac{2}{3}La_{norm} + \frac{1}{3}Nd_{norm}} \quad (5.8)$$

La relación que existe entre la abundancia de REE ligeras (LREE) con respecto a los elementos de tierras raras pesadas (HREE) se calculó de acuerdo la formula:

$$REE_{total} = \frac{La_{norm}}{Yb_{norm}} \quad (5.9)$$

Donde  $REE_{total}$  es el valor de la relación LREE respecto a las HREE, y  $La_{norm}$  y  $Yb_{norm}$  son los valores normalizados de estos elementos.

#### 5.8.4. Análisis estadístico

Para el tratamiento estadístico de los datos se utilizó el *software SPSS de Stat Soft*. El análisis de los datos consistió en el análisis exploratorio que incluyó la determinación de los valores máximo y mínimo, y el cálculo del promedio aritmético, de la desviación estándar, así análisis de outliers, utilizando para este último el criterio:

$$Outlier_{inferior} = Q_1 - 1.5(Q_3 - Q_1) \quad (5.3a)$$

$$Outlier_{superior} = Q_3 + 1.5(Q_3 - Q_1) \quad (5.3b)$$

Donde  $Q_1$  y  $Q_3$  son el primer y tercer cuartil respectivamente.

Posteriormente se utilizaron diferentes herramientas de estadística multivariada, como análisis de correlación, análisis de *cluster* o agrupamiento y análisis de factores, con el fin de identificar interacciones entre las variables y determinar relaciones existentes entre diferentes parámetros. El análisis de cluster es un método que permite clasificar unidades de acuerdo con la similitud de sus características, por lo tanto nos servirá para distinguir asociaciones de los elementos en las muestras de sedimento marino y evaluar las similitudes y diferencias existentes. En un *cluster*. Para este ejercicio se realizó un análisis de cluster jerárquico, agrupado mediante el método del vecino más lejano (*complete linkage*) y la medición por distancias euclidianas (Carriquiry y Sánchez, 1999; Carriquiry *et al.*, 2001; Choumilin *et al.*, 2009), además se realizó una estandarización de los datos a fin de evitar el sesgo producido por las diferencias en la medición de las variables (homogenizándolas a una misma escala), esta estandarización se realizó restando a cada dato la media y posteriormente dividiendo entre la desviación estándar de la variable.

El análisis factorial es ampliamente utilizado en estudios sedimentológicos, mineralógicos y geoquímicos (p.e., Carriquiry y Sánchez, 1999; Carriquiry *et al.*, 2001; Shumilin *et al.*, 2002; Daesslé *et al.*, 2004; Choumilin *et al.*, 2009). El análisis de factores es un método estadístico que permite resumir la información obtenida de un grupo de variables originales en una serie más pequeña llamados factores. La ventaja principal de esta técnica es su capacidad para agrupar las variables con el fin de identificar relaciones complejas que no son posibles con los métodos univariantes y bivariantes. Cuando existe un número de variables demasiado grande, como lo es el caso de este estudio, el análisis de factores es una herramienta que ayuda a la selección de un subgrupo con variables representativas, puesto que en el análisis de factores es una técnica de interdependencia en la que se consideran todas las variables simultáneamente.

Para éste estudio geoquímico se aplicó el análisis de factores en su modo R, la extracción de factores se desarrolló utilizando el método de componentes principales sobre la matriz de correlaciones; además se realizó una rotación del tipo ortogonal “varimax” con el fin de redistribuir e identificar las cargas factoriales (*factor loadings*), maximizando y minimizando los valores de éstas para así obtener una separación más clara de factores. Se utilizaron los criterios de la raíz latente (*latent root*) y varianza explicada (Hair *et al.*, 1999) para seleccionar los factores más representativos; por lo tanto aquellos factores con autovalor (*eigenvalue*) mayor o igual a 1 y mayor porcentaje de varianza explicada se consideraron como significativos. Para fines de este estudio se consideraron como significativas las cargas factoriales con valores  $\geq 0.65$  para la interpretación de los factores. Hair *et al.* (1999) menciona que este valor estará en función del tamaño de la muestra y disminuirá con el incremento en el número de casos y variables, mencionan como ejemplo que para tamaños muestrales de 50 casos un valor de  $\geq 0.75$  debe considerar

como significativo, sin embargo éste valor puede variar de acuerdo con los conocimientos que el investigador tenga previamente sobre las relaciones entre las variables (Daesslé *et al.*, 2004).

Finalmente y debido a la distribución no homogénea del muestreo, sólo se realizaron mapas en los que se presentan los valores puntuales para cada estación de las diferentes variables, esto con el fin de evitar especulaciones si se realizaban mapas de contornos. Los mapas se realizaron utilizando el software *Surfer 9*.

El resumen de la técnicas para el análisis de la información obtenida se muestra en la Figura 5.4.

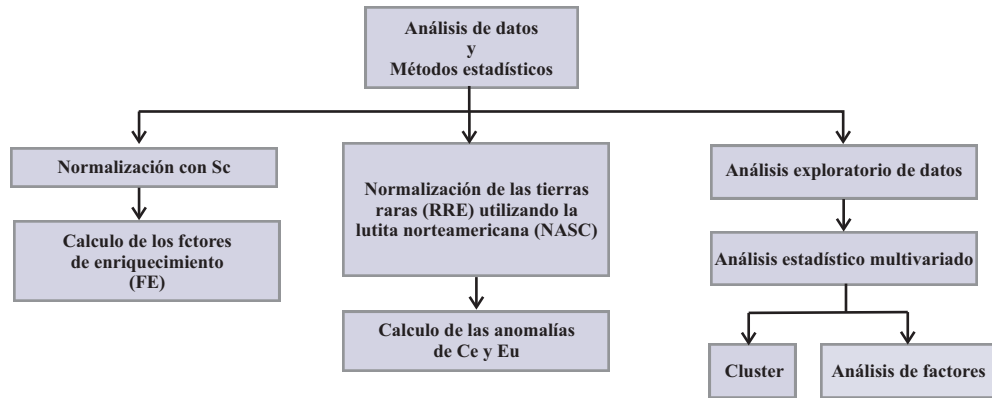


Figura 5.4. Procedimientos utilizados para el análisis de la información obtenida.





## 6. Resultados

### 6.1 Tamaño de grano y tipo de sedimento

Se realizó el análisis granulométrico a 28 de las 31 muestras de sedimentos superficiales de las cuencas de Wagner y Consag; no se realizó el análisis para las estaciones WAG E-12, WAG 21, y WAG 10 debido a la falta material. El tamaño de grano medio fue de  $8.6 \pm 1.4$  ( $\phi$ ) para todas las muestras. Los tamaños arcilla ( $<4 \mu\text{m}$ ) y limo ( $4-62 \mu\text{m}$ ) fueron los más abundantes en los sedimentos, contribuyendo al 100 % en la mayoría de muestras (Anexo A, Tabla A1). Los sedimentos se caracterizaron texturalmente como fangos (Figura 6.1a), y se reconocieron cuatro tipos de tamaño de sedimento: arcilla, fango, limo y arena limosa (Figura 6.1b). Como se observa en la Figura 6.1 el tamaño de grano en el área de estudio es bastante homogéneo, resaltando sólo la estación WAG 33C ( $3.71 \phi$ , Cuenca Consag), cuyas características texturales difieren ampliamente del resto de las muestras (con un 73.2 % de arenas).

Para los depocentros se observaron tamaños de grano tipo arcilla y limo fino (Cuenca Wagner WAG 15:  $10.71 \phi$ , Cuenca Consag WAG 5:  $8.33 \phi$ ). Para el borde este de ambas cuencas, a lo largo de la inferida Falla Wagner, los valores oscilaron entre  $6.41 \phi$ , (WAG 31E en la Cuenca Wagner) y  $10.24 \phi$  (WAG 21A de la Cuenca Consag). A lo largo de las dos cuencas no se observan gradientes como el esperado de la disminución de tamaño de acuerdo con la latitud descritos previamente por otros autores (Figura 6.2).

### 6.2 Distribución de $C_{org}$ y carbonatos

Los contenidos de  $C_{org}$  oscilaron entre 0.14 % y 2.59 %, mostrando un promedio de  $1.1 \pm 0.60$  % (Figura 6.3). Los valores más altos de  $C_{org}$  se observaron en la región este de la Cuenca de Consag, en las estaciones WAG II: 2.59 %, WAG 24: 2.39 % y WAG 26: 1.39 %. A estos valores le siguieron ambos depocentros de las cuencas, con 1.82 % para WAG 15 y 1.71 % para WAG 5, respectivamente. Para la región de la Cuenca Wagner los valores observados fueron muy homogéneos y sólo se destacan las estaciones WAG 18B y WAG 31, WAG 31B, WAG 31D, WAG 31E, WAG 31C, WAG 31A con valores por encima del 1 %, el valor mínimo se registro en la estación WAG 33C (0.14 %) al sur de la Cuenca Consag (Figura 6.3).

En el caso del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) los valores oscilaron entre 0.4 y 13.25 % y la media fue de  $7.9 \pm 2.8$  % (Figura 6.4). De manera global el  $\text{CaCO}_3$  aumentó con la profundidad, contrario a lo esperado; los valores más altos se registraron en las estaciones WAG 15: 10.56 %, WAG 5: 13.25 % y WAG 10: 10.33 % en los depocentros de ambas cuencas y WAG 24: 11.42 % en la región este de la Cuenca Consag, mientras que los mínimos se presentaron en el borde este de la Cuenca Wagner (WAG 31A: 0.04 %, WAG E3: 2.31 %). Para el borde este de la Cuenca Consag los valores variaron de 3.34 % a 9.92 %.

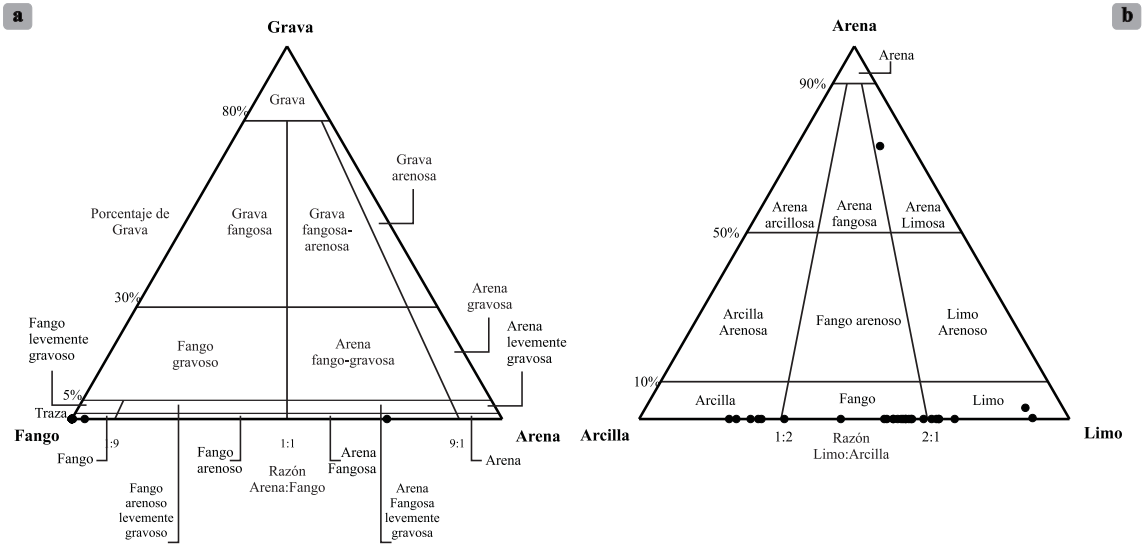


Figura 6.1. Diagramas ternarios (Folk 1954 y 1974) para las muestras de sedimento de las cuencas de Wagner y Consag, a) Diagrama ternario de Grava-Fango-Arcilla; y b) Diagrama ternario de Arena-Arcilla-Limo.

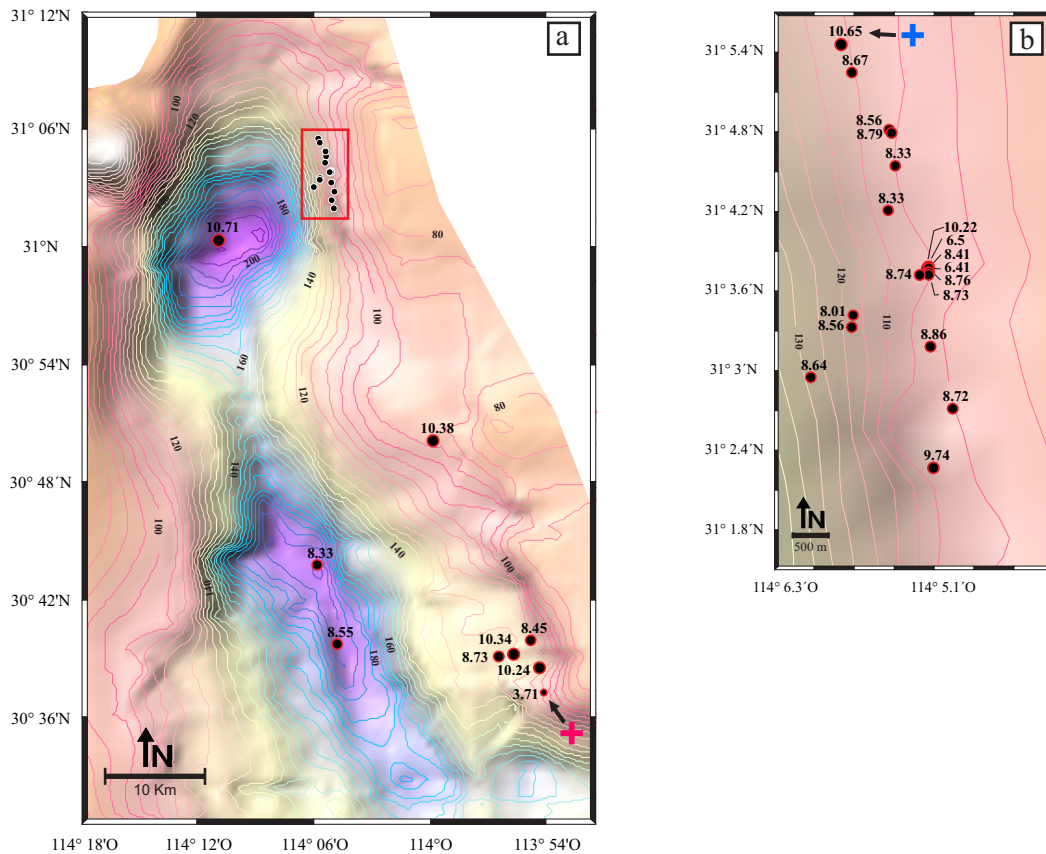


Figura 6.2. Distribución puntual del tamaño de grano ( $\phi$ ) para los sedimentos de: a) el depocentro de la Cuenca Wagner y muestras ubicadas en la Cuenca Consag y b) muestras localizadas en el borde este de la Cuenca Wagner. La cruz roja señala al valor mayor, por el contrario la cruz azul indica el valor menor registrados.

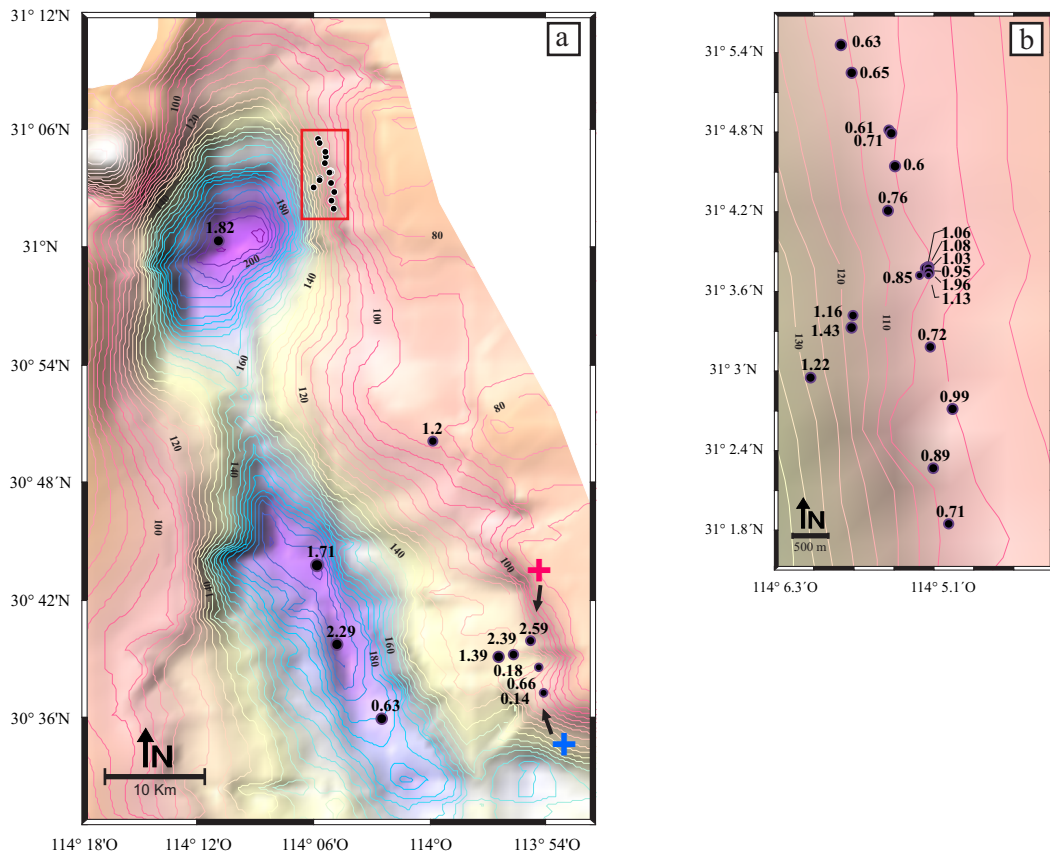


Figura 6.3. Distribución de la concentración de  $C_{org}$  (%) en las muestras de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. a) muestras localizadas en el depocentro de la Cuenca Wagner y borde este de la Cuenca Consag y b) detalle de las muestras localizadas en el borde este de la Cuenca Wagner. La cruz roja señala al valor mayor, por el contrario la cruz azul indica el valor menor registrados.

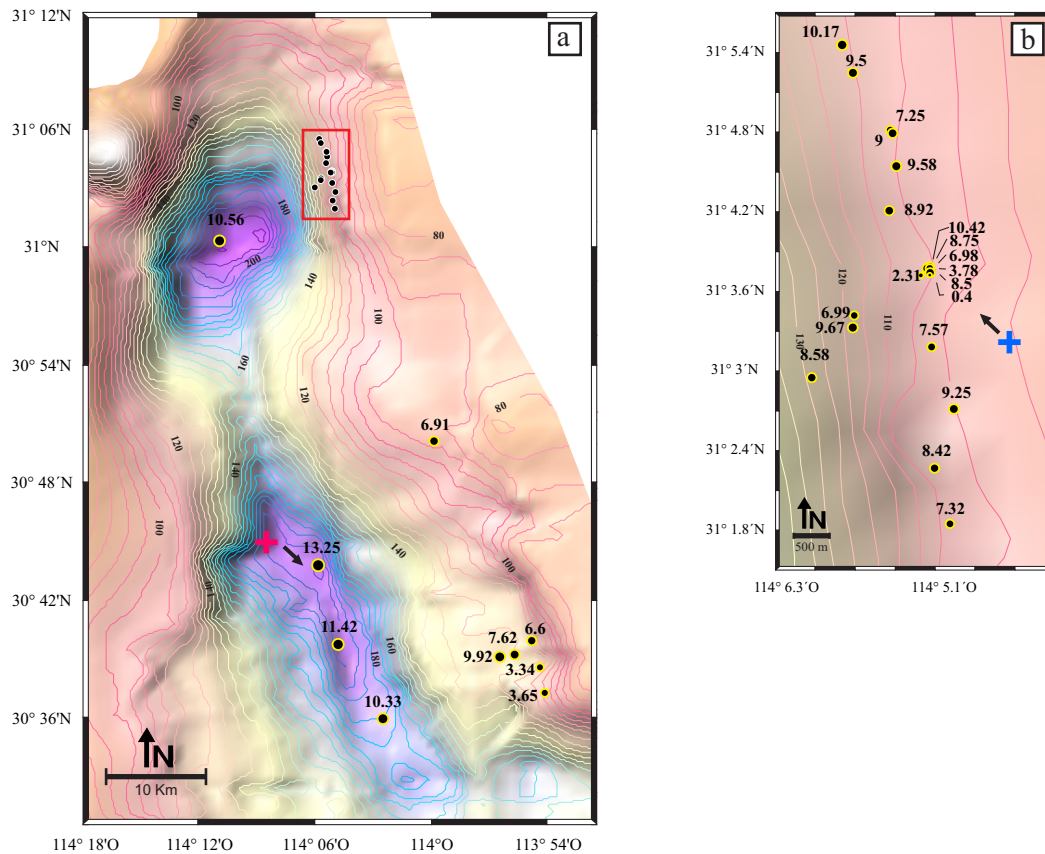


Figura 6.4. Distribución de la concentración de  $\text{CaCO}_3$  (%) en las muestra de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. a) muestras localizadas en el depocentro de la Cuenca Wagner y borde este de la Cuenca Consag y b) detalle de las muestras localizadas en el borde este de la Cuenca Wagner. La cruz roja señala al valor mayor, por el contrario la cruz azul indica el valor menor registrados.

### 6.3 Concentración de elementos mayores y traza en los sedimentos

Los tres elementos más abundantes que integran los sedimentos del Golfo de California son Si, Al y Ca. Estos elementos reflejan los tipos más comunes de sedimentos marinos: el ópalo, los silicatos terrígenos y los carbonatos (Brumsack, 1989). Las concentraciones de elementos mayores y traza (exceptuando las tierras raras) en los sedimentos superficiales de las cuencas de Wagner y Consag se muestran en la Tabla A2 (anexo A). En esta misma tabla también se muestran los valores de referencia reportados para la corteza superior por Wedepohl (1995), a manera de comparación.

Con el fin de identificar mejor las anomalías de los elementos presentes en los sedimentos marinos con respecto a los valores de la corteza superior, en la Figura 6.5 se muestra el promedio total (incluyendo todas las muestras) para cada elemento, además de los promedios para las muestras correspondientes a las cuencas Wagner y Consag, respectivamente. También se muestran los valores reportados para la corteza superior promedio por Wedepohl (1995). Los elementos se ordenaron de acuerdo con su abundancia en la corteza superior.

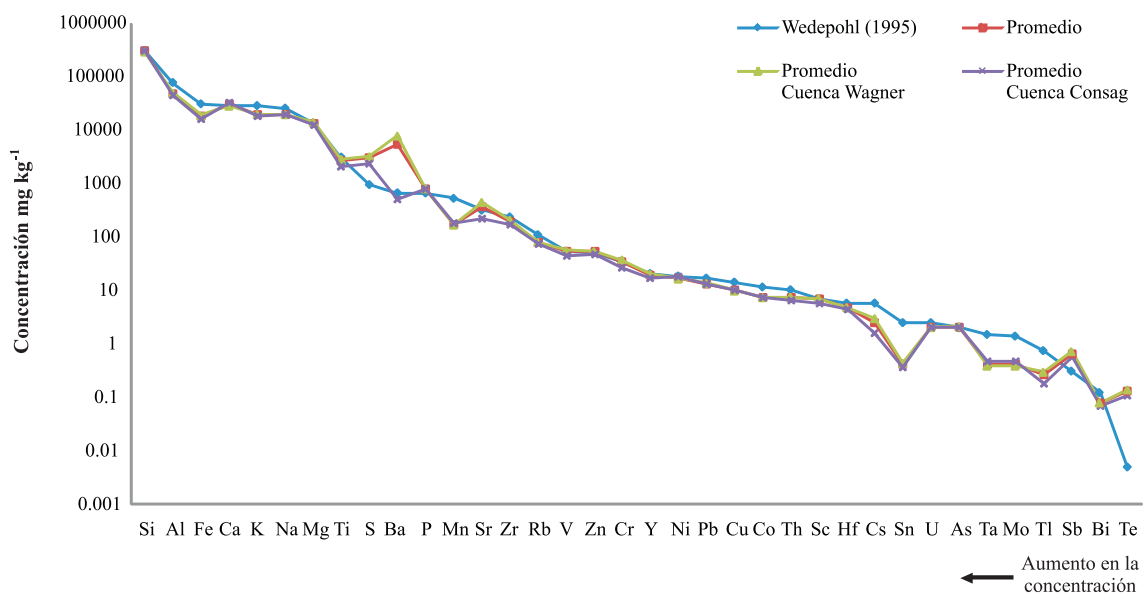


Figura 6.5. Valores de concentración elemental para la corteza superior (Wedepohl, 1995), proyectados junto con el promedio total de las muestras analizadas y los promedios para las muestras de las cuencas de Wagner y Consag, respectivamente.

Como se observa en la Figura 6.5, en ambas cuencas hay anomalías positivas de Te, S, Sb. Una anomalía importante que sólo se presenta en la Cuenca de Wagner es la de Ba, la cual, debido a su magnitud, influye en el promedio global de las muestras de sedimentos. En el caso de las anomalías negativas, las de Sn, Ta, Mo, Mn y Te, son las más evidentes. Es importante recalcar que estas secuencias de elementos sólo proporcionan una idea general de la composición elemental

de las muestras de sedimento. Los índices que describen más detalladamente los enriquecimientos se abordarán con mayor detalle a través del FE.

## **6.4 Distribución espacial de elementos de las cuencas de Wagner y Consag**

### **6.4.1. Distribución espacial de elementos mayores (Al, Ca, Fe, K, Na y Si)**

Analizando los resultados obtenidos de la composición elemental es importante recalcar que la diferencia entre las muestras de los depocentros, el borde este de la Cuenca Wagner y el borde este de la Cuenca Consag es evidente. Con el objetivo de simplificar los resultados y hacer más claras las estaciones que presentaban anomalías se utilizó el concepto de *outliers*, para de esta manera recalcar aquellos valores que son significativamente diferentes dentro del grupo de datos, debido a la cantidad de elementos analizados en este estudio no se presentan todos los mapas de distribución espacial, sólo se presentan algunos a manera de ejemplo, sin embargo en la Tabla A3 (Anexo A) se muestran los detalles de cada elemento.

Las muestras correspondientes al este de la Cuenca Wagner se caracterizaron por presentar una similitud en las concentraciones observadas; a diferencia de las estaciones WAG 21, WAG 21A y WAG 33C localizadas al SE de la Cuenca de Consag que se caracterizaron por presentar las menores concentraciones para la mayoría de elementos, así mismo las muestras de los depocentros (WAG 15, WAG 5 Y WAG 34) se caracterizaron por mostrar las concentraciones más elevadas para el área de estudio. A fin de hacer más fácil la descripción de la distribución elemental para el área de estudio, los elementos se agruparon de acuerdo a este comportamiento en la distribución espacial de la concentración de los diferentes elementos (Anexo A, TablaA3).

#### **Silicio**

Las concentraciones de Si oscilaron entre 23.23 % (WAG 15) y 39.44 % (WAG 21), con un promedio y desviación estándar de  $30.2 \pm 0.4$  %. Las concentraciones más bajas corresponden las estaciones WAG 15 (23.23 %), WAG 5 (24.16 %) y WAG 24 (23.86 %), las dos primeras ubicadas en los depocentros de ambas cuencas y la última en el borde este de la Cuenca Consag (Figura 6.6). Para el borde este de la Cuenca Wagner los valores de sílice fueron bastante homogéneos, con una diferencia no mayor al 4 %. Para el caso de la Cuenca Consag la diferencia fue de alrededor del 10 %, siendo las estaciones WAG 21, WAG 21A y WAG 33C las que presentaron los valores más altos de toda el área de estudio. Es importante recalcar que el valor promedio del total de muestras es similar al reportado para la corteza terrestre (30.35 %; Wedepohl, 1995).

#### **Aluminio, hierro, potasio y magnesio**

El Al, Fe, K y Mg tuvieron un comportamiento similar entre sí y contrario al del Si; los valores menores se observaron en el borde este de la Cuenca Consag (estaciones WAG 21, WAG 21A y

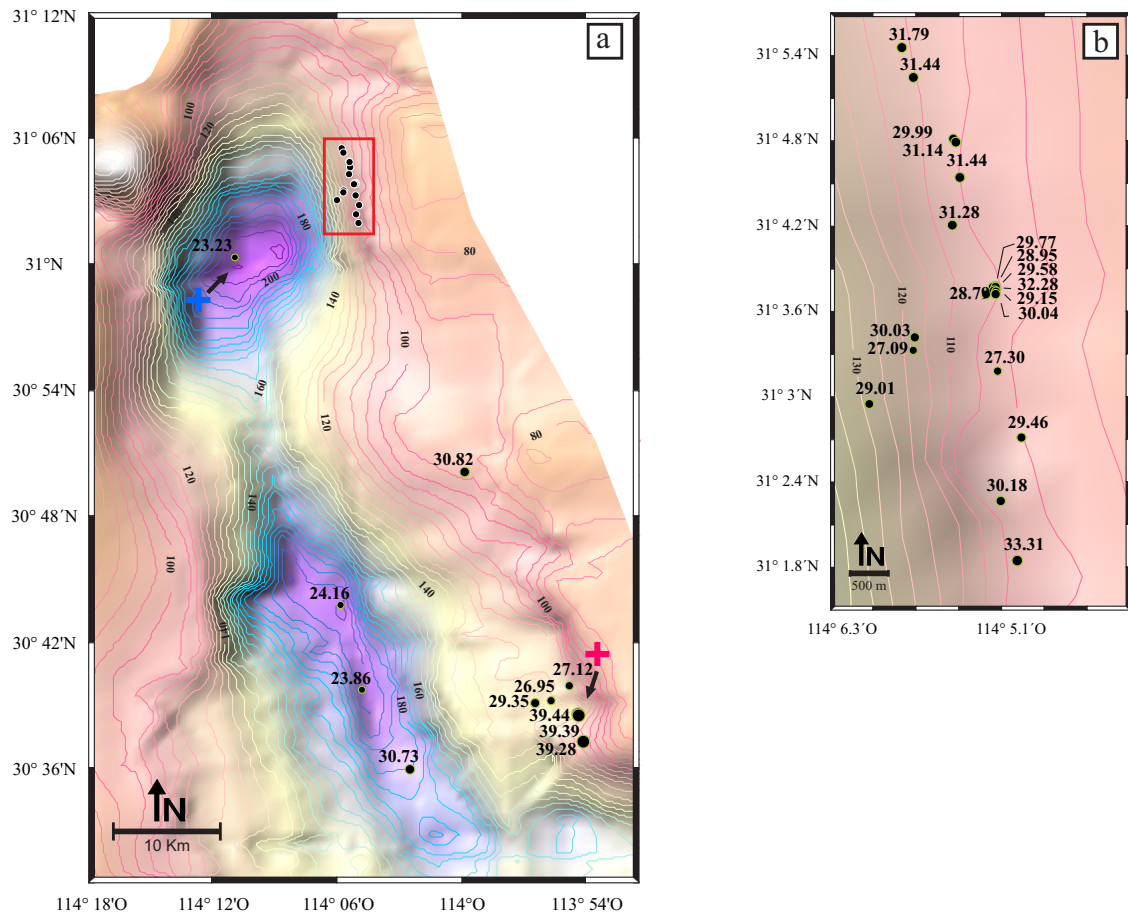


Figura 6.6. Distribución del contenido Si (%) en muestras de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. a) muestras localizadas en el depocentro de la Cuenca Wagner y borde este de la Cuenca Consag y b) detalle de las muestras localizadas en el borde este de la Cuenca Wagner. La cruz roja señala al valor mayor, por el contrario la cruz azul indica el valor menor registrados.



WAG 33C). En el borde este de la Cuenca Wagner todas las muestras son muy similares tomando en cuenta el contenido en dichos elementos, y no se observó ninguna anomalía. Los depocentros presentaron las concentraciones más elevadas para estos elementos con excepción del K.

Para el caso del Al los valores variaron entre 2.96 y 6.29 % y el valor promedio fue de  $4.9 \pm 0.7$  %, los valores menores se registraron en las estaciones WAG 21 (2.96 %), WAG 21A (3.04 %) y WAG 33C (3.36 %) localizadas en la región este de la Cuenca Consag. El valor más elevado corresponde al depocentro de la Cuenca Wagner (6.29 %; estación WAG 15), seguida por las estaciones WAG 34 (6.07 %) y WAG 5 (5.82 %) ubicadas en el depocentro de la Cuenca Consag. El resto de estaciones tuvieron valores similares entre 5.32 y 4.22 % (diferencias del poco más del 1 %)(Figura 6.7). El valor promedio total de Al es menor al reportado para la corteza terrestre (7.74 %; Wedepohl, 1995).

El promedio para el Fe fue de  $1.8 \pm 0.5$  %, menor al valor promedio para la corteza superior (3.09 %; Wedepohl, 1995). El valor mínimo registrado fue de 0.55 % (estación WAG 33C), seguido de por las estaciones WAG 21 (0.65 %) y WAG 21A (0.58 %); todas estas estaciones ubicadas en el borde este de la Cuenca Consag, el máximo fue 2.7 % en la estación WAG 15 %; depocentro de la Cuenca Wagner, para el resto de las muestras la concentración de Fe fue bastante similar y no se observaron anomalías significativas (Figura 6.8).

Los valores de K oscilaron entre 1.5 y 2.15 % con un promedio  $2 \pm 0.2$  %, nuevamente los valores mínimos se registraron en las estaciones WAG 21, WAG 21A y WAG 33C localizadas en la región este de la Cuenca Consag con valores de 1.51 %, 1.55 % y 1.50 % respectivamente, a diferencia del Al, Fe y Mg para el K el máximo se registro en la estación WAG 31D (2.14 %) ubicada en el borde este de la Cuenca Wagner. Es importante recalcar que la diferencia entre este valor y el observado en los depocentros (2.1 % para WAG 15 y 1.98 % para WAG 5), no es mayor al 0.2 %, por lo tanto, incluyendo a estas últimas tres estaciones podemos considerar que la distribución de K es homogénea. El promedio global de K en las muestras de sedimentos resulto por debajo del reportado para la corteza superior (2.87 %; Wedepohl 1995).

Finalmente para el Mg los valores oscilaron entre 0.39 y 2.07 % para las estaciones WAG 21 y WAG 15, respectivamente, el promedio obtenido fue de  $1.4 \pm 0.4$  %,. De manera similar al Al y Fe, los valores máximos se registraron en ambos depocentro de las cuencas y los mínimos en las estaciones WAG 21, WAG 21A y WAG 33C ubicadas en la Cuenca Consag. La diferencia entre las concentraciones. Finalmente para la Cuenca Wagner y el resto de muestras de la Cuenca Consag la diferencia entre los valores no fue mayor al 0.13 %.

### **Calcio y sodio**

Las concentraciones de Ca y Na son muy constantes en el área de estudio. Para el Ca los valores oscilaron entre 1.2 y 4.8 % con un promedio  $3.0 \pm 1.0$  %. Los máximos se ubicaron en los depocentros de ambas cuencas y los mínimos en las estaciones WAG E3: 1.18 % y WAG

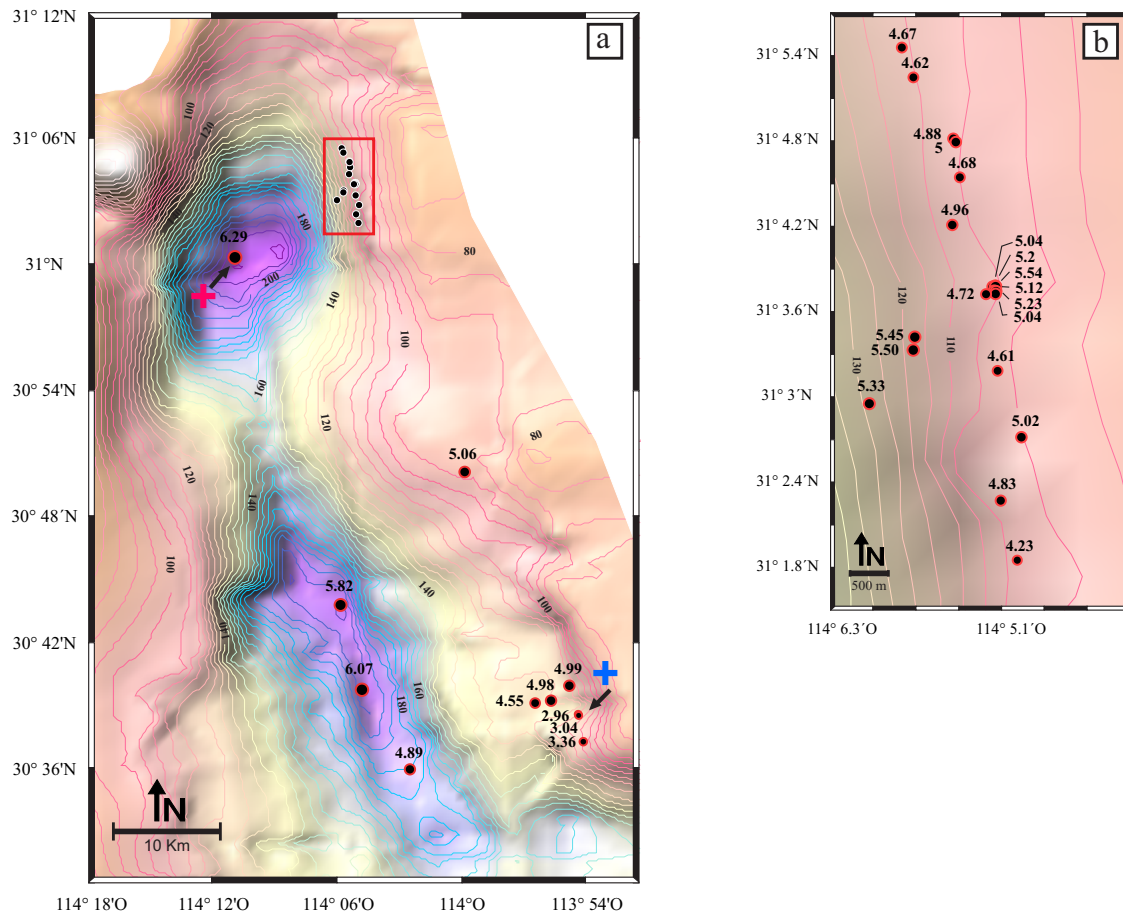


Figura 6.7. Distribución del contenido Al (%) en muestras de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. a) muestras localizadas en el depocentro de la Cuenca Wagner y borde este de la Cuenca Consag y b) detalle de las muestras localizadas en el borde este de la Cuenca Wagner. La cruz roja señala al valor mayor, por el contrario la cruz azul indica el valor menor registrados.

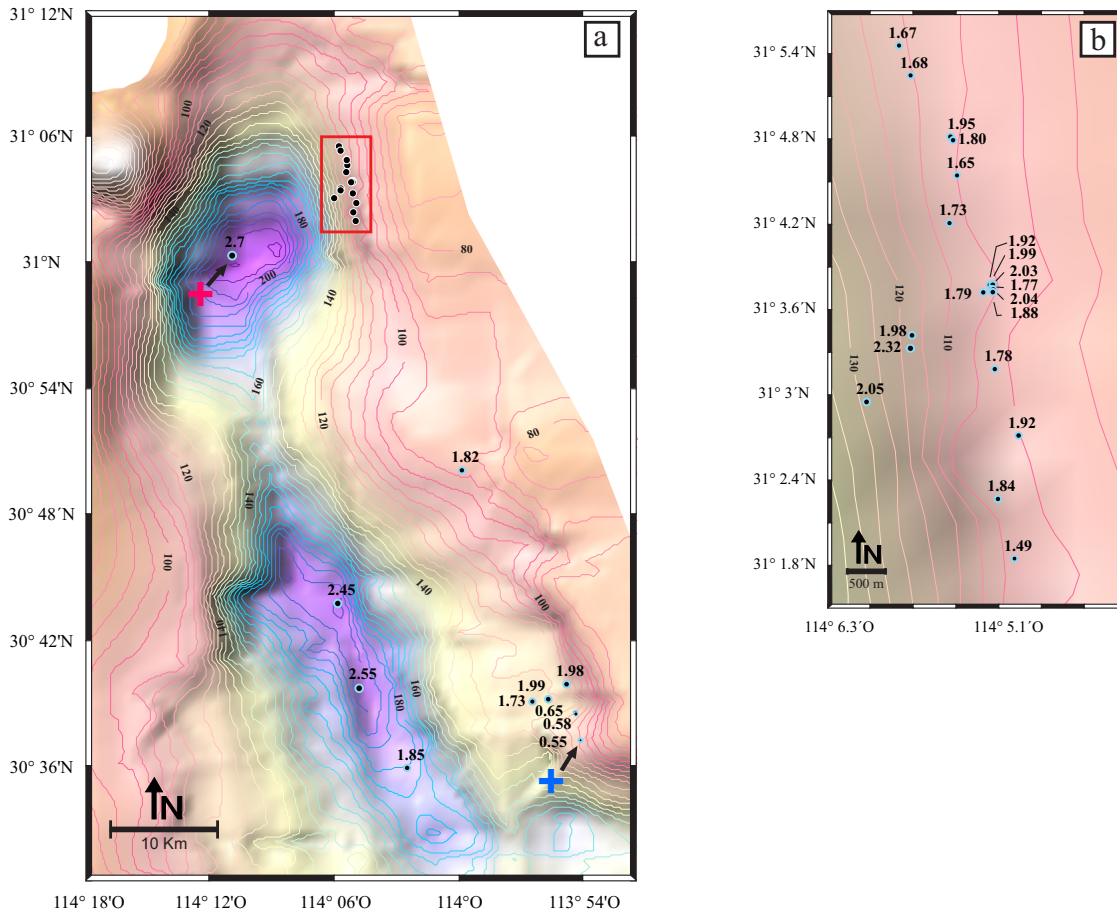


Figura 6.8. Distribución del contenido Fe (%) en muestras de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. a) muestras localizadas en el depocentro de la Cuenca Wagner y borde este de la Cuenca Consag y b) detalle de las muestras localizadas en el borde este de la Cuenca Wagner. La cruz roja señala al valor mayor, por el contrario la cruz azul indica el valor menor registrados.

21A: 1.34% y WAG 33C: 1.32% (ubicadas en ambas cuencas), para el resto de estaciones la concentración fue muy homogénea (Figura 6.9).

Para el caso del Na los valores variaron de 1.12% (estación WAG 21A) a 2.73% (estación WAG 15) con promedio  $2.0 \pm 0.4\%$ , las estaciones WAG 5, WAG 34, WAG 24 Y WAG 31B presentaron valores por encima de 2.53%. Para el resto de las estaciones las concentraciones de Na fueron muy constantes, mostrando sólo variaciones  $<1\%$  (Anexo A, Tabla A3).

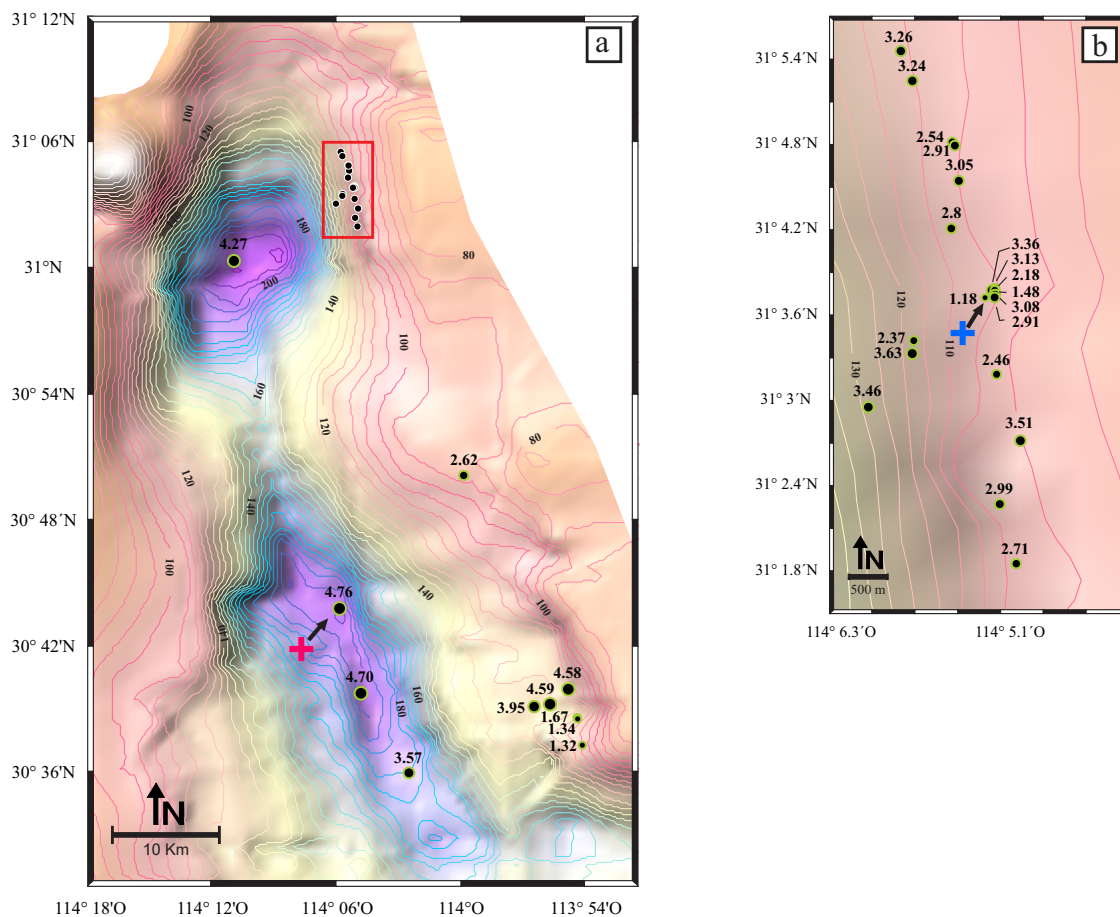


Figura 6.9. Distribución del contenido de Ca (%) en muestras de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. a) muestras localizadas en el depocentro de la Cuenca Wagner y borde este de la Cuenca Consag y b) detalle de las muestras localizadas en el borde este de la Cuenca Wagner. La cruz roja señala al valor mayor, por el contrario la cruz azul indica el valor menor registrados.

#### 6.4.2. Distribución espacial de los elementos traza (As, Ba, Bi, Co, Cr, Cs, Cu, Hf, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Rb, S, Sb, Sc, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, Y, Zn y Zr )

Al igual que para los elementos mayores, se realizó un análisis de *outliers* de los datos de concentración de los elementos traza con el objetivo de simplificar los resultados y de esta manera

hacer más evidentes las anomalías. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla A4 (Anexo A).

Los patrones de distribución espacial de los elementos traza en los sedimentos marinos pueden ser descritos de acuerdo a cuatro criterios según el análisis de outliers: (1) aquellos elementos que muestran solamente *outliers* negativos (valores bajos) en las estaciones WAG 21, WAG 21A Y WAG 33C, localizadas al SE de la Cuenca Consag: As, Rb, Y y Ti, (2) los elementos que muestran un patrón similar al observado en los elementos mayores descritos por anomalías negativas en las estaciones WAG 21, WAG 21A y WAG 33C y anomalías positivas en las estaciones ubicadas en los depocentros (WAG 15, WAG 5 y WAG 34). La mayoría de los elementos traza analizados caen en este grupo y son: Bi, Co, Cr, Cs, Cu P, Hf, Mn, Ni, S, Sc, Sn, Th, V y Zn, (3) elementos que muestran solamente *outliers* positivos (valores altos) preferentemente en las estaciones ubicadas al este de la cuenca Wagner: Ba, Mo, Pb, Sr, Ta, Te, Tl y U y finalmente (4) aquellos elementos en cuyos rangos de concentración no se observan datos anómalos (Sb y Zr).

Como ejemplo del primer caso se muestra el mapa de distribución de Ti, cuya concentración es homogénea con excepción de las estaciones WAG 21, WAG 21A y WAG 33C localizadas en el borde este de la Cuenca Consag, las cuales presentan las concentraciones más bajas del área de estudio. Los valores del Ti variaron de  $870.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (WAG 33C) a  $3192.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (WAG 31D); sin embargo, sólo son los valores inferiores los que difieren drásticamente del resto de datos (Figura 6.10). Además del Ti, el As, Rb e Y muestran un comportamiento espacial similar (Tabla A4, Anexo A).

El Mn y S son ejemplos del segundo grupo, para ambos elementos los valores mínimos se observaron en las estaciones WAG 21, WAG 21A y WAG 33C. El Mn varió de  $65 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (WAG 33 C) a  $291 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (WAG 5), eliminando los valores anómalos el Mn tiene una distribución homogénea en el área, con un promedio  $190.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  y una desviación estándar de  $40.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (Figura 6.11). El S al igual que la mayoría de elementos de este grupo mostró las concentraciones más bajas en las estaciones ubicadas en la región SE de la Cuenca Consag, sin embargo para el caso del S, las concentraciones más elevadas se ubicaron en la región este de la Cuenca Wagner y no en los depocentros. Los valores de S oscilaron entre  $1110 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (WAG 21) y  $7050 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (WAG E-7) con un promedio de  $2989.4 \pm 1153.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Además del S, el P también muestra sus valores mayores en esta zona (Tabla A4, Anexo A). Para el área de estudio todas las estaciones muestran valores altos del S respecto a la corteza superior ( $953 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; Wedepohl, 1995), y las anomalías más grandes coinciden con las anomalías de Ba observadas.

El Ba de manera similar al S se caracterizó por presentar valores anormalmente altos. Especialmente para las estaciones localizadas en la región este de la Cuenca Wagner (estaciones WAG E-7, WAG E-3 y WAG E-2) se registraron valores de Ba de hasta  $62051.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , mucho mayores a lo reportados para la corteza superior (Ba:  $668 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; Wedepohl, 1995). Sin embargo además de estas elevadas concentraciones, para el Ba se registraron valores mínimos de 300

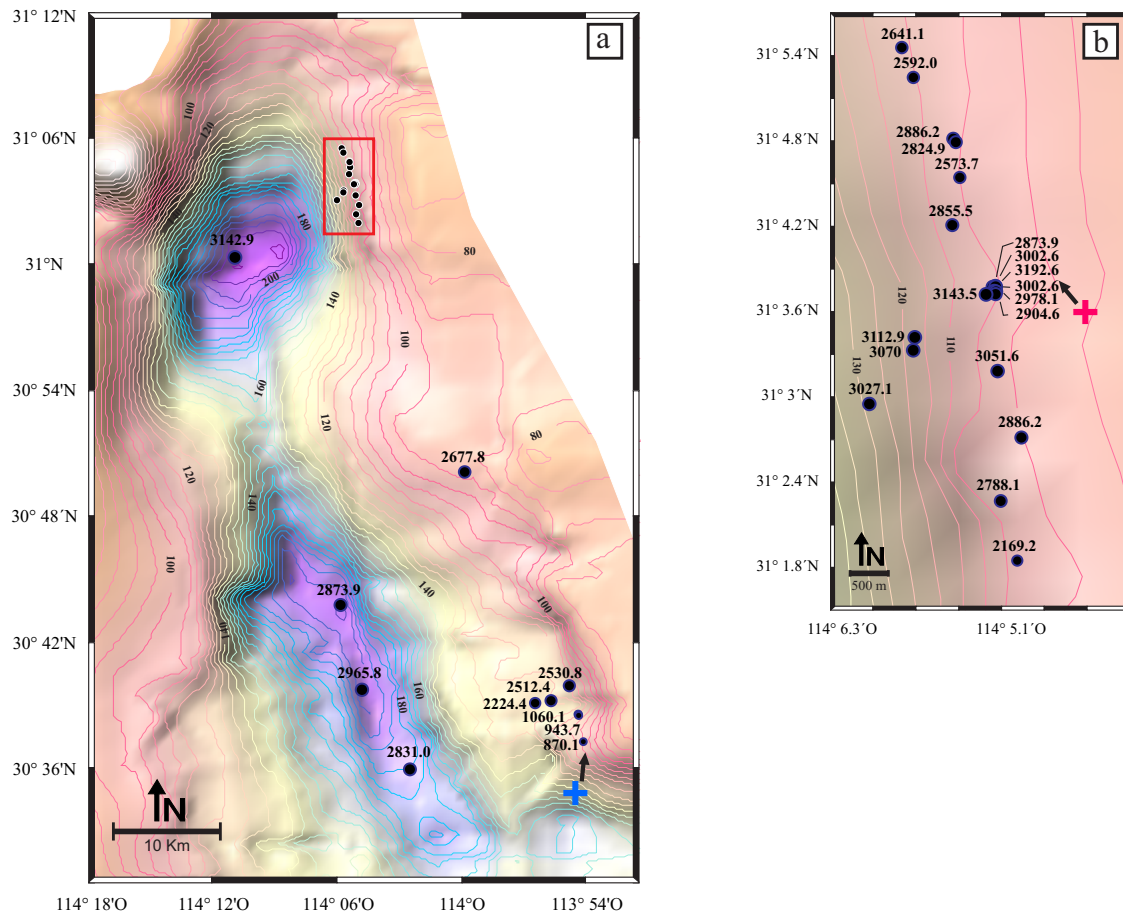


Figura 6.10. Distribución del contenido Ti ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) en muestras de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. a) muestras localizadas en el depocentro de la Cuenca Wagner y borde este de la Cuenca Consag y b) detalle de las muestras localizadas en el borde este de la Cuenca Wagner. La cruz roja señala al valor mayor, por el contrario la cruz azul indica el valor menor registrados.

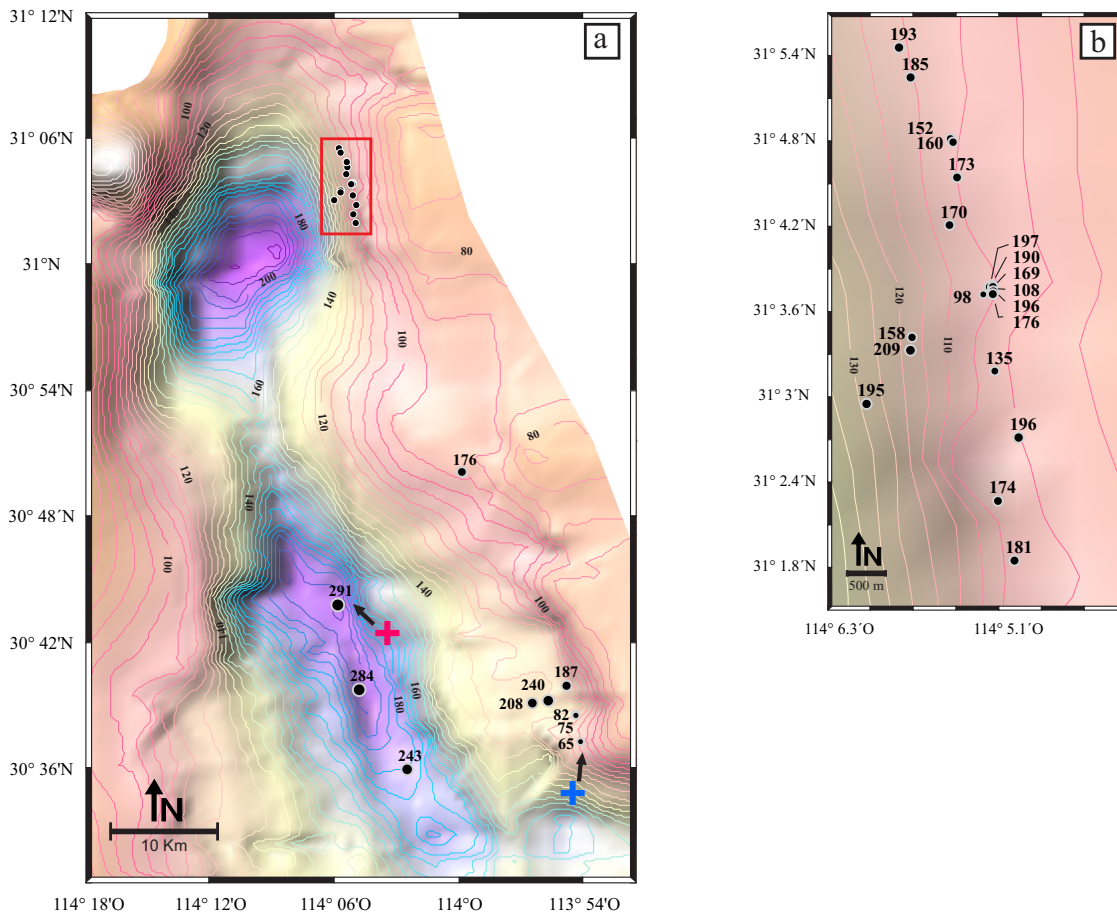


Figura 6.11. Distribución del contenido Mn ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) en muestras de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. a) muestras localizadas en el depocentro de la Cuenca Wagner y borde este de la Cuenca Consag y b) detalle de las muestras localizadas en el borde este de la Cuenca Wagner. La cruz roja señala al valor mayor, por el contrario la cruz azul indica el valor menor registrados.

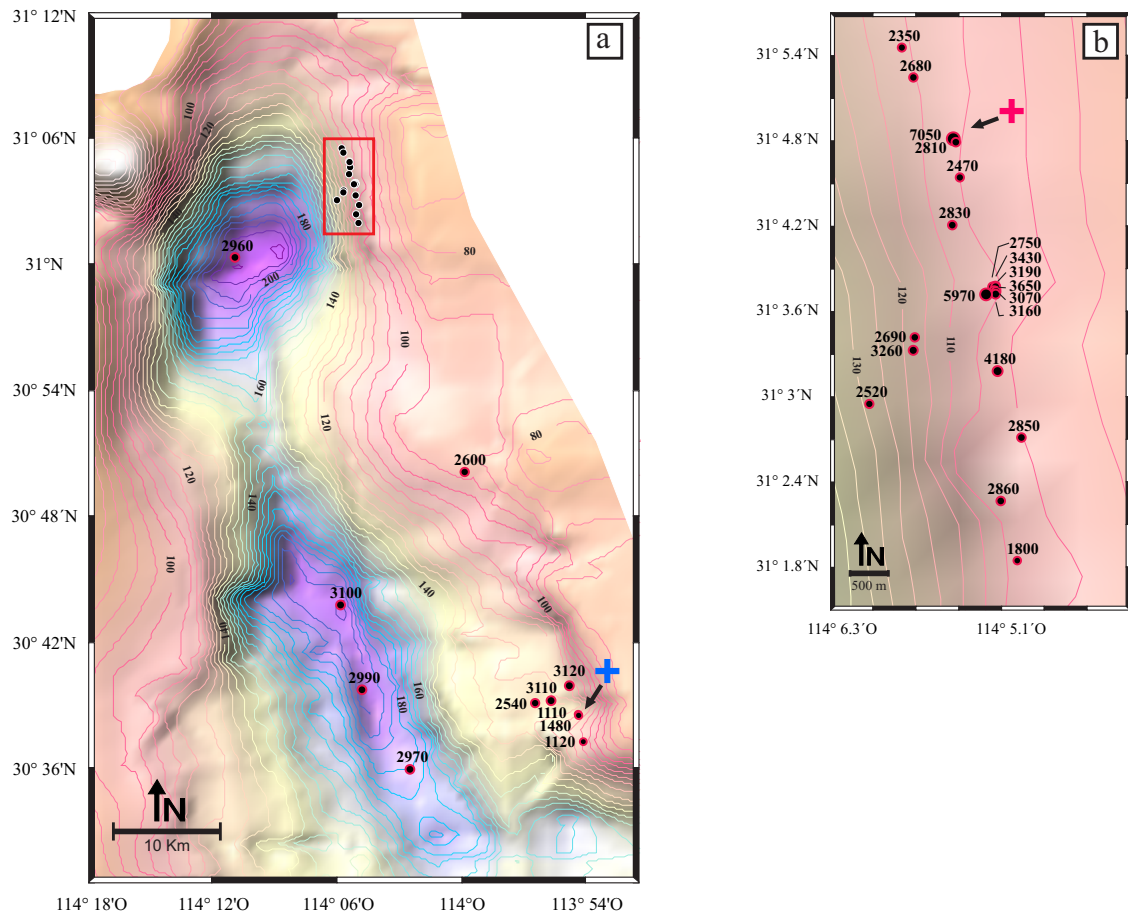


Figura 6.12. Distribución del contenido de S ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) en muestras de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. a) muestras localizadas en el depocentro de la Cuenca Wagner y borde este de la Cuenca Consag y b) detalle de las muestras localizadas en el borde este de la Cuenca Wagner. La cruz roja señala al valor mayor, por el contrario la cruz azul indica el valor menor registrados.



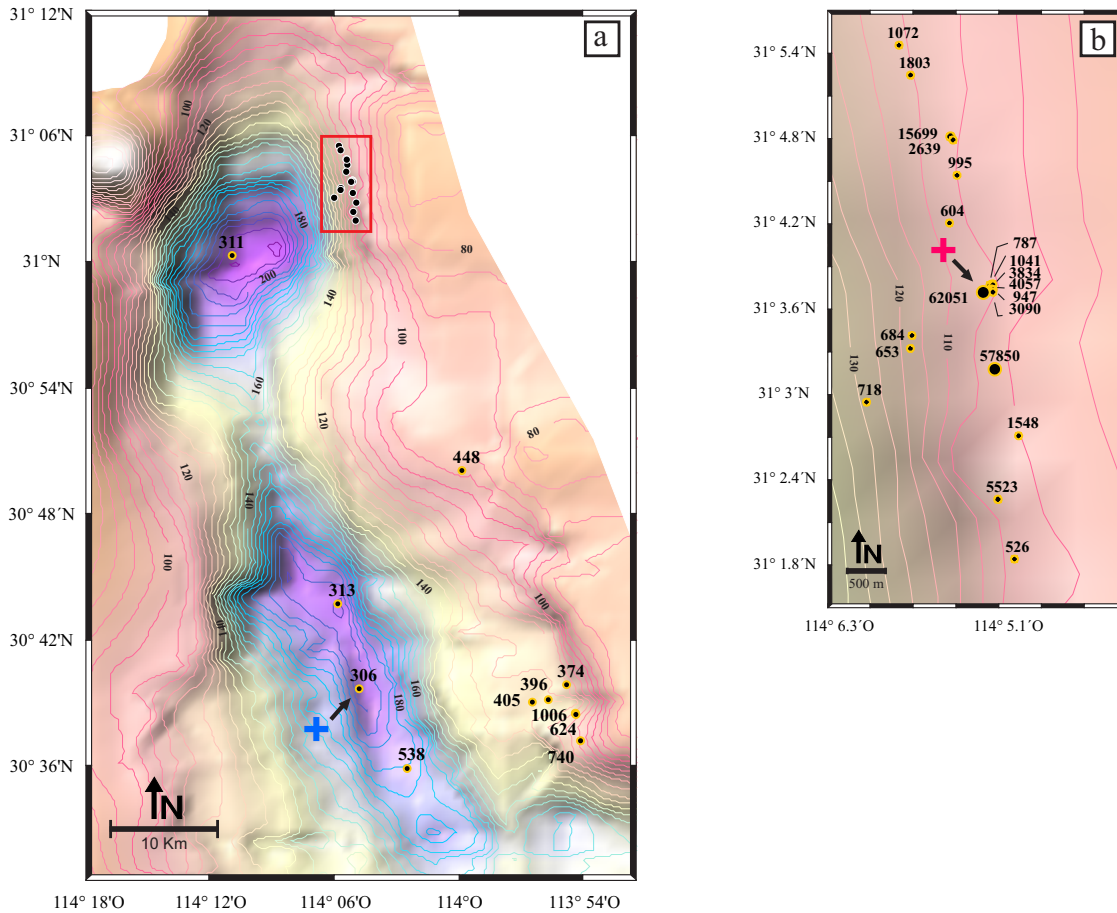


Figura 6.13. Distribución del contenido de Ba ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) en muestras de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. a) muestras localizadas en el depocentro de la Cuenca Wagner y borde este de la Cuenca Consag y b) detalle de las muestras localizadas en el borde este de la Cuenca Wagner. La cruz roja señala al valor mayor, por el contrario la cruz azul indica el valor menor registrados.

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , mostrando un amplio rango de concentraciones para el área de estudio (Figuras 6.12 y 6.13), con excepción del Pb, las estaciones de los elementos que mostraron anomalías positivas se ubicaron en el borde este de la Cuenca Wagner.

Otro ejemplo de este grupo es el U, (Figura 6.14) cuyos valores variaron de  $0.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (WAG 21) a  $5.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (WAG II) y aunque se observa una amplia diferencia entre el máximo y el mínimo, el análisis de outlier arrojó como anómala la concentración mayor observada (WAG II) con excepción de esta las concentraciones son similares y varían sólo en razones de  $1.9 \pm 0.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Es importante mencionar que a pesar de la homogeneidad general en las concentraciones a lo largo del área de estudio, para algunos elementos como el Te las concentraciones observadas son mucho mayores a los valores de la corteza superior (Te:  $0.005 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; Wedepohl, 1995).

Finalmente los elementos que pertenecen al cuarto grupo (Sb y Zr) se caracterizaron por presentar concentraciones muy homogéneas a lo largo del área de estudio, de manera que al realizárseles el análisis de outlier no se identificaron datos anómalos.

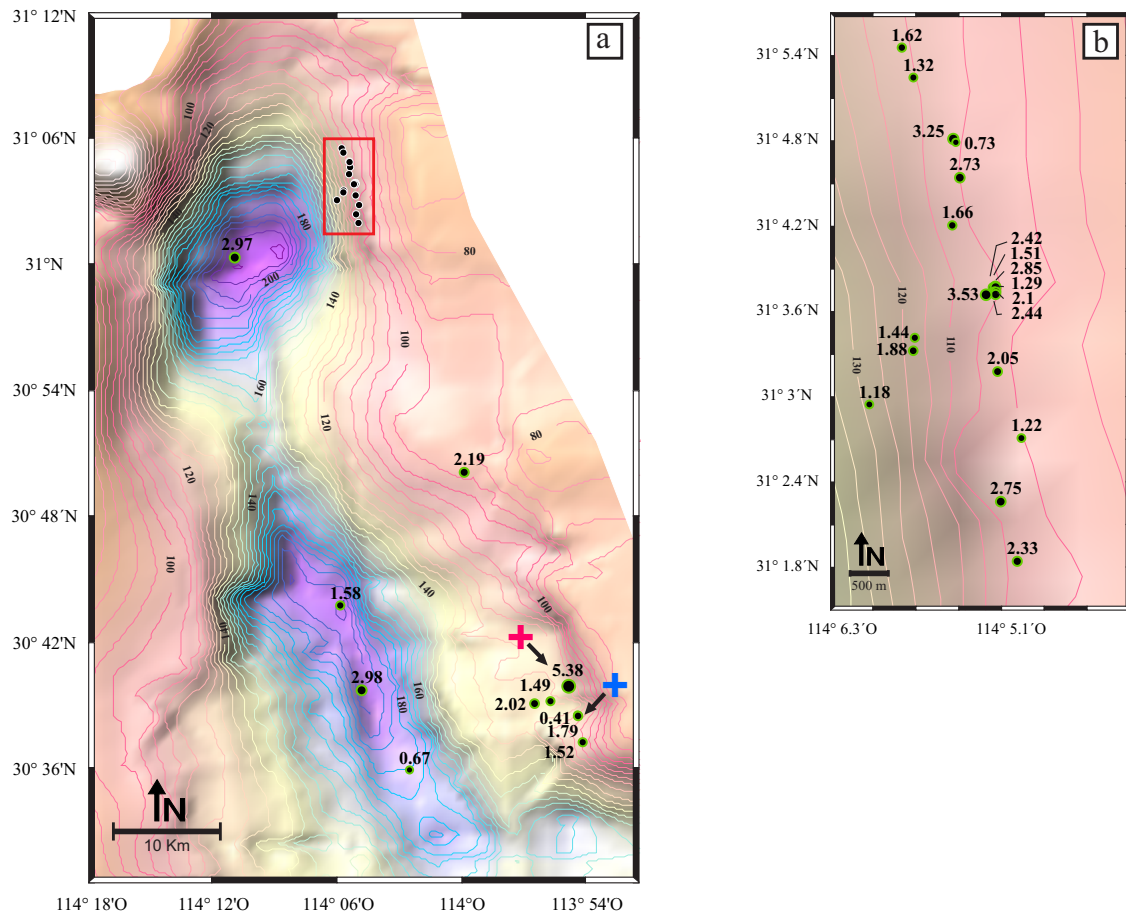


Figura 6.14. Distribución del contenido de U ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) en muestras de sedimentos superficiales para las cuencas de Wagner y Consag. a) muestras localizadas en el depocentro de la Cuenca Wagner y borde este de la Cuenca Consag y b) detalle de las muestras localizadas en el borde este de la Cuenca Wagner. La cruz roja señala al valor mayor, por el contrario la cruz azul indica el valor menor registrados.

## 6.5 Normalización y factor de enriquecimiento (FE)

Utilizando el Sc como elemento normalizador, la gráfica de los valores normalizados para los sedimentos del área de estudio muestran un comportamiento similar a los valores normalizados de la corteza superior (Wedepohl, 1995). Sin embargo, resaltan algunas anomalías para ciertos elementos las cuales se abordarán a detalle después de describirse el FE (Figura 6.15).

A partir de los valores de cada elemento normalizados para las muestras y para el promedio cortical fueron calculados los valores de FE. En la Tabla A5 (Anexo A) se muestran el promedio del FE para los diferentes elementos y la clasificación de los elementos en función de este valor. De acuerdo con Shumilin *et al.*, (2002) los elementos de las cuencas de Wagner y Consag pueden clasificarse en tres grupos: altamente enriquecidos, conservativos y ligeramente empobrecidos (Figura 6.16).

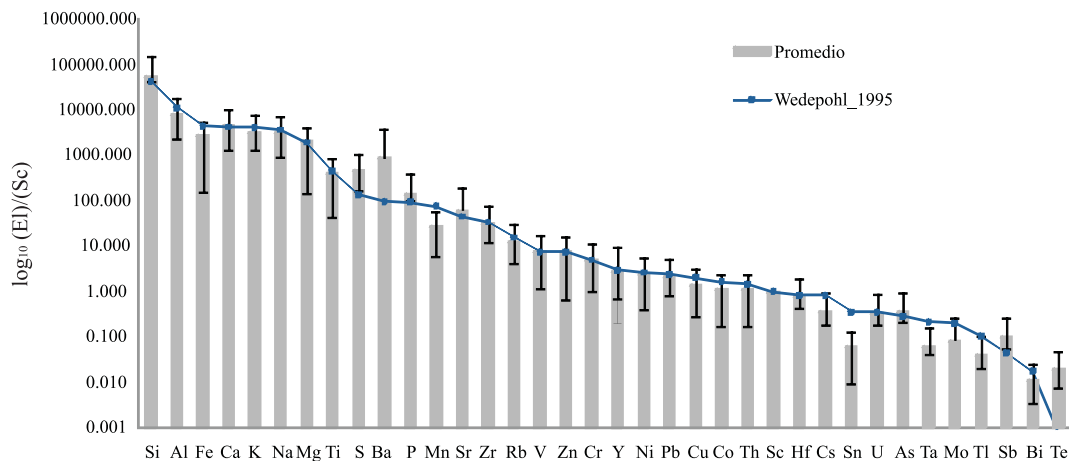


Figura 6.15. Valores normalizados respecto al Sc para los sedimentos de las cuencas Wagner y Consag y valores de la corteza superior (Wedepohl, 1995).

### 6.5.1. Elementos altamente enriquecidos: Ba, S, Sb y Te (FE>2)

La Figura 6.17 a y b muestra los valores de FE para los elementos clasificados como enriquecidos (Te> Ba> S> Sb). El Te, Ba y S mostraron un comportamiento similar entre sí en la distribución de los valores de FE para el área de estudio, coincidiendo en los máximos (Figura 6.17a; p.e., estaciones WAG E7, WAG E-2 y WAG E-3). Para el caso del Te y S, con excepción de los máximos registrados, que corresponden a zonas de emisión de fluidos (Canet *et al.*, 2010)), las concentraciones en el resto de estaciones son muy similares entre sí. De manera general los valores de FE para estos dos elementos se encontraron por encima de la unidad a lo largo de toda el área de estudio, indicando un enriquecimiento (Figura 6.17a).

Las concentraciones de Ba se distribuyeron de manera menos homogénea, se observaron algunos máximos de FE en las estaciones WAG 2 y WAG 3, (Figura 6.17a), lo que definió que el elemento

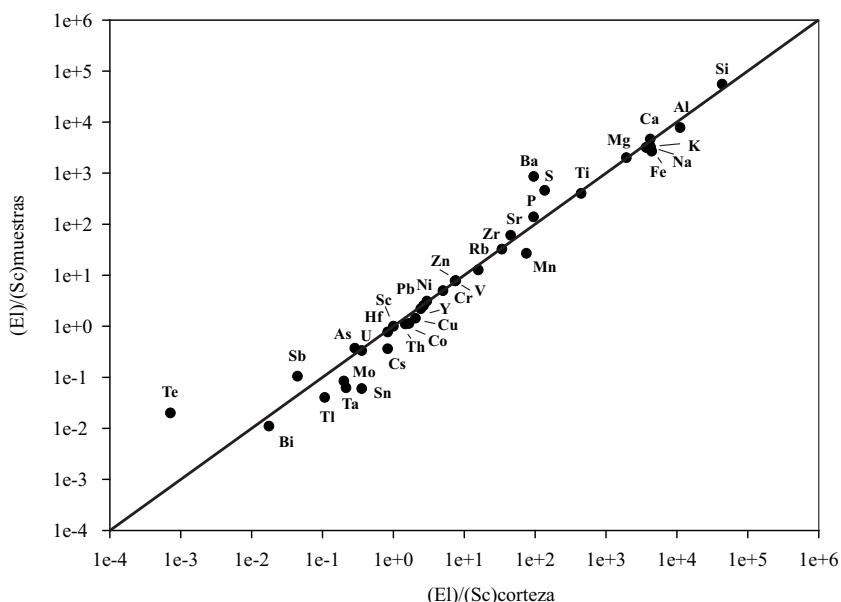


Figura 6.16. Comparación entre las razones:  $(El)/(Sc)_{corteza}$  (Wedepohl, 1995) y  $(El)/(Sc)_{muestra}$ . Mientras menor sea la separación a la línea (relación 1:1) más conservativo el elemento en referencia al valor de la corteza superior.

se clasificará como enriquecido cuando se calculó el promedio global, sin embargo se observan estaciones con valores de FE por debajo de la unidad. Los valores más altos se observaron en el borde este de la Cuenca Wagner, variando desde 1 (conservativo: WAG E5, WAG 18A, WAG 18B y WAG 18) hasta 95 (enriquecidos: WAG E-2 y WAG E-3), a esta región se suman tres estaciones de la Cuenca Consag (WAG 21, WAG 21A y WAG 33C, con valores de 3.11, 3.51 y 4.99, respectivamente). Los mínimos se observaron en el borde este de la Cuenca Consag (estaciones WAG 1A, WAG II, WAG 24 y WAG 26) y en las estaciones más profundas ubicadas en los depocentros de ambas cuencas (WAG 15, WAG 5 y WAG 34); para estos casos los valores observados son menores a la unidad.

Para el Sb se observó un comportamiento totalmente diferente al resto de los elementos enriquecidos, con poca homogeneidad en los valores de FE a lo largo del área de estudio (Figura 6.17b). Es importante mencionar que este elemento fue el que mostró el mayor valor de error cuando se determinó, lo que posiblemente se ve reflejado en este caso.

### 6.5.2. Elementos conservativos: As, Ca, Cr, Mg, P, Si, Sr, V, Y y Zn ( $FE \sim 1$ )

Los elementos conservativos normalmente se relacionan con un origen terrígeno, pues las concentraciones en las que se encuentran son muy similares a las reportadas para la corteza superior. Los diez elementos clasificados como conservativos mostraron un orden descrito por la secuencia  $P > Sr > As > Si > Ca > Y > Mg > Zn > V > Cr$  con promedio de FE para el P de 1.4 y para el Cr de 1 (Tabla A5, Anexo A). El Mn, Zn y Cr se caracterizaron por mostrar un comportamiento

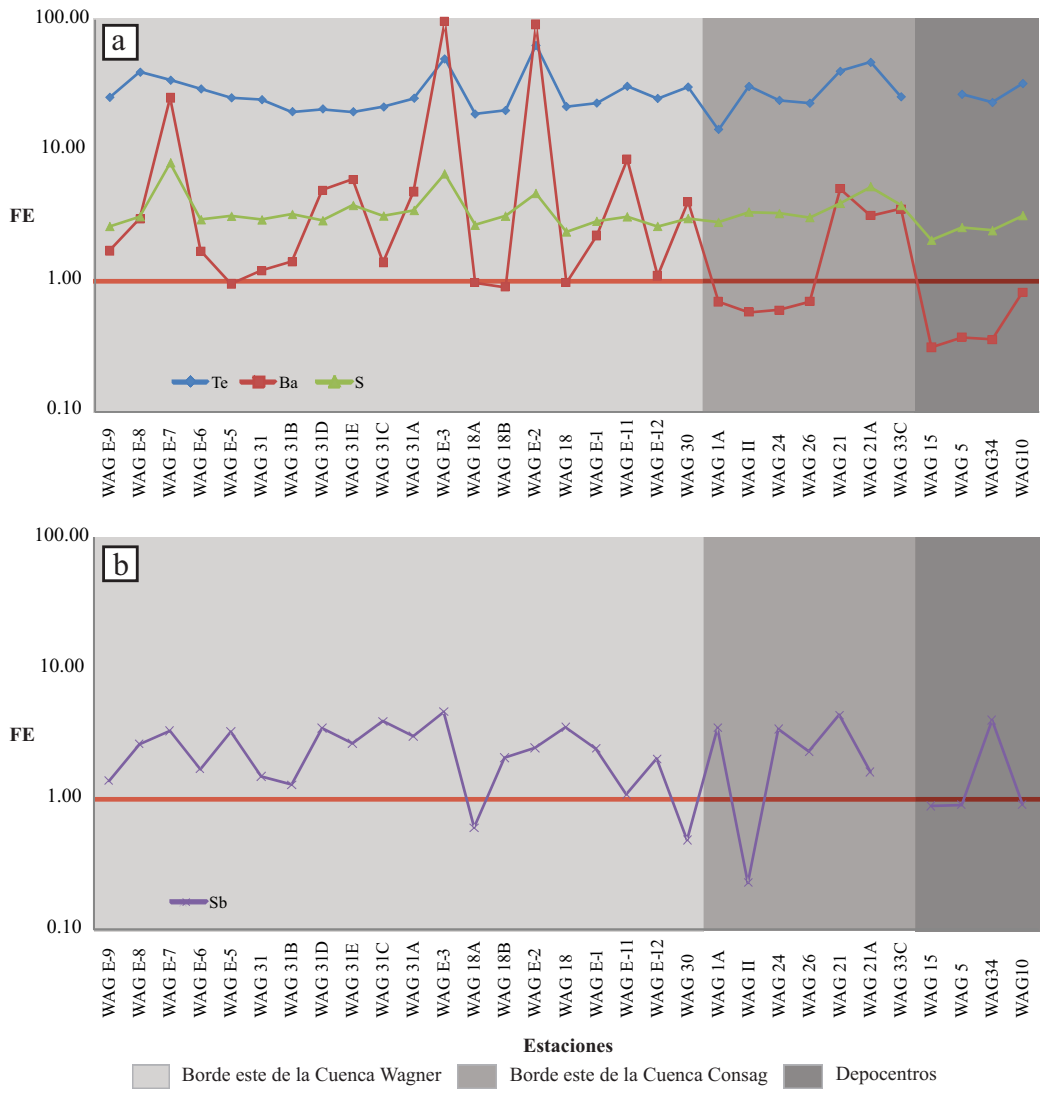


Figura 6.17. Distribución de los valores promedio de FE para los elementos enriquecidos de las cuencas de Wagner y Consag, NGC. a) Te, Ba, S y b) Sb.

descrito por valores de FE muy similares entre cada una de las estaciones, en su mayoría muy cercanos a la unidad, con excepción de la estación WAG 21A, donde el Cr presentó un valor ligeramente menor (Figura 6.18a).

El Sr y V presentaron una distribución de los valores de FE muy similar a la mostrada por el Ba; para el caso del Sr es importante destacar que, con excepción de las estaciones anómalas, los valores de FE son ligeramente menores a la unidad, de manera similar a como ocurre con el Ba. Para el V este comportamiento no se observa y aunque se distinguen las mismas anomalías, el resto de valores son muy cercanos a la unidad (Figura 6.18b).

A diferencia de los casos anteriores, el P, Si, As, Ca e Y mostraron valores de FE altos para algunas de las estaciones ubicadas en el este de la Cuenca Consag. Por ejemplo para el P se registraron valores de FE de 7.0 en la estación WAG 21A, y para el caso del Si las estaciones WAG 21, WAG 21A y WAG 33C registraron valores de FE entre 4.3 y 4.1 (patrón observado también para el As, Ca e Y, aunque con valores de FE ligeramente altos  $\sim 1.8$ ). Sin embargo estas anomalías son particulares y para el resto de estaciones las concentraciones son muy homogéneas además de cercanas a la unidad, por lo que al calcularse el promedio se categorizan como conservativos (Figura 6.18c).

### **6.5.3. Elementos ligeramente empobrecidos: Al, Bi, Co, Cs, Cu, Fe, Hf, K, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Rb, Sn, Ta, Th, Ti, Tl, U, Zr (FE<1)**

Para el caso de las cuencas de Wagner y Consag la mayoría de los elementos fueron clasificados como empobrecidos (Zr > Ni > Hf > U > Pb > Ti > Na > Rb > K > Th > Cu > Al > Co > Bi > Fe > Cs > Mo > Tl > Mn > Ta > Sn); sin embargo, la mayoría de los elementos presentan valores muy cercanos a la unidad ((Tabla A5, Anexo A y Figura 6.19 a,b y c).

El Ni, Cu, Fe, Bi, Mn, Sn, Cs, Hf y Tl mostraron una distribución más o menos homogénea a lo largo del área de estudio (Figura 6.19a). Para estos elementos sólo se observaron algunas anomalías sin patrón común entre ellas o similitud con lo observado con el Ba, el S y Sr en el este de la Cuenca Wagner. El Hf mostró valores de FE de 3.5 para la estación WAG 21 indicando un ligero enriquecimiento. El Cs y Tl mostraron anomalías en las estaciones WAG 31B, WAG 21D, WAG 31E Y WAG 31C, aunque en este caso no se puede considerar un empobrecimiento, pues los valores de FE oscilaron entre 1 y 0.65 para estos casos, lo que indicaría que en estas estaciones los elementos muestran un comportamiento conservativo.

Los valores de FE para el Zr, Pb, Ti, Na, Rb, K, Th, Al y Co fueron muy similares entre las diferentes estaciones, identificándose sólo anomalías menores en las estaciones WAG 21, WAG 21A y WAG 33C. Los máximos se encuentran por debajo de 2, lo que no existe un enriquecimiento (Figura 6.19b). Estas anomalías coinciden con las observadas en el P, Si y Ca, descritas anteriormente.

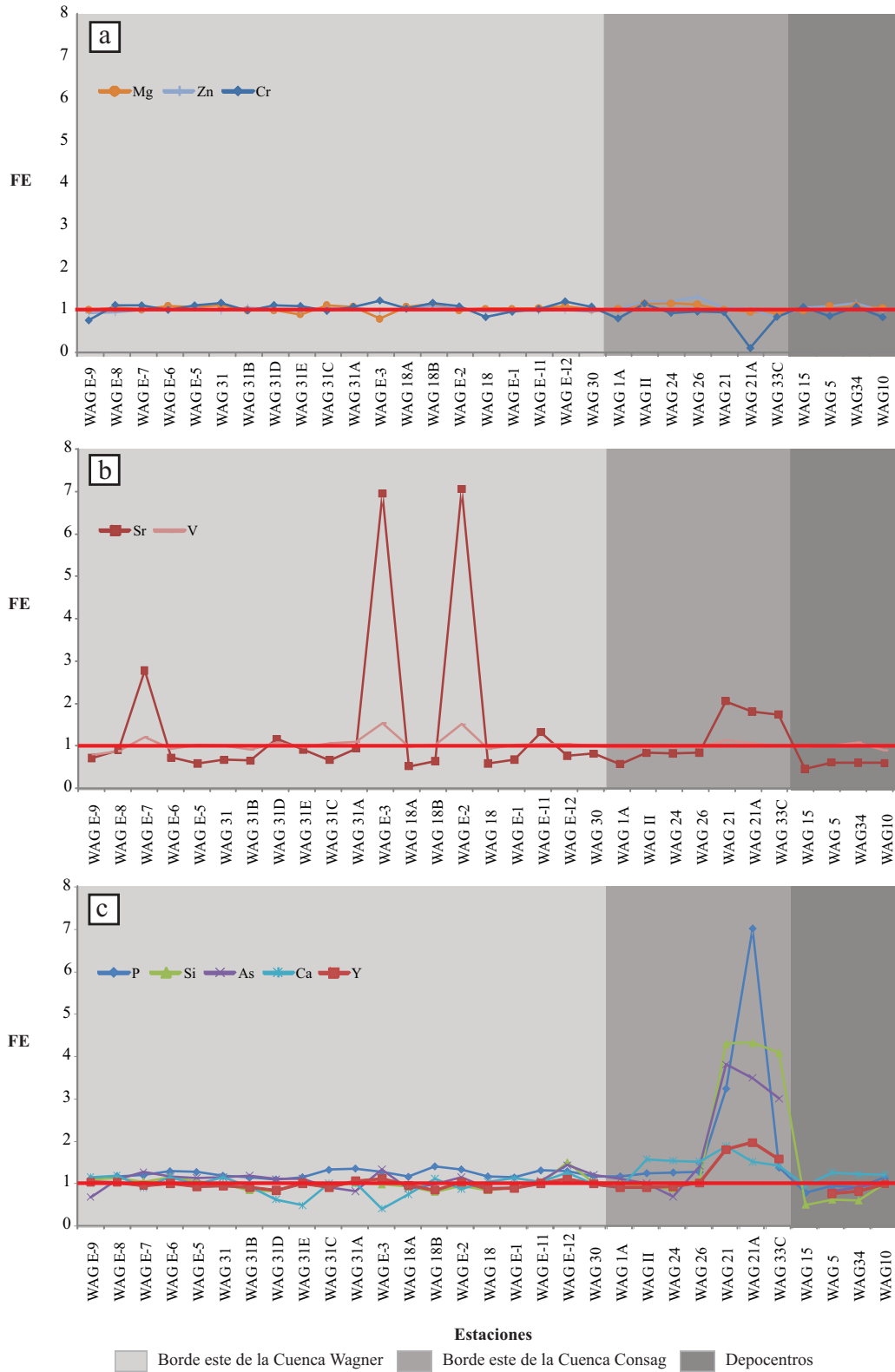


Figura 6.18. Distribución de los valores promedio de FE para los elementos conservativos de las cuencas de Wagner y Consag, NGC. a) Mg, Zn y Cs, b) Sr y V y c) P, Si, As, Ca e Y.

Finalmente, algunos elementos como el U, Mo y Ta mostraron una amplia variación de FE, lo que diferencia su comportamiento respecto a los elementos claramente empobrecidos (Figura 6.19c).

## 6.6 Concentración y distribución de Elementos de las Tierras Raras (REE)

Las concentraciones de REE (La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb y Lu) en los sedimentos superficiales de las cuencas de Wagner y Consag se presentan en la Tabla A6 (Anexo A), además se muestran los valores de referencia reportados para la corteza superficial por Wedepohl, (1995) y para la Lutita Norteamericana (NASC; Taylor y McLennan, 1985) a manera de comparación.

Como se observa, el promedio de las concentraciones de los REE analizadas en este estudio son menores a las reportadas para la lutita norteamericana NASC (Taylor y McLennan, 1985) y para la corteza superior (Wedepohl 1995). La distribución de las concentraciones de la REE en el área de estudio es muy homogénea y con excepción de las estaciones WAG 21, WAG 21A y WAG 33C las cuales mostraron los valores más bajos (identificados como *outliers*, Tabla A7 (Anexo A)), las concentraciones entre una y otra estación son muy similares para todos los REE analizados en este estudio.

### 6.6.1. Normalización de las tierras raras

En la Tabla A8 (Anexo A), se muestran los valores de las ocho tierras raras que fueron analizadas en este estudio, además se muestran los valores dados para la corteza (Wedepohl, 1995), ambos normalizados utilizando la lutita NASC.

El promedio de los valores normalizados para las muestras de sedimento de las cuencas Wagner y Consag se encuentran por debajo de la unidad, lo que nos indica, que teniendo como referencia la lutita Norteamérica, las muestras de sedimento de las cuencas Wagner y Consag se encuentran empobrecidas en REE. De manera global las muestras definen tres patrones de REE: (a) 12 muestras que presentan un patrón que puede describirse como una disminución del La al Nd y un incremento del Sm al Tb (este primer patrón es también el que describe el comportamiento del promedio global), (b) 10 muestras donde es notable la presencia de una anomalía positiva de Eu, y (c) 9 muestras con una anomalía de negativa Eu (Figura 6.20).

Además, como parte del análisis de los REE, se estimaron las anomalías de Ce, Eu y la relación La/Yb de los sedimentos marinos (Tabla A8, Anexo A).

La anomalía de Ce mostró valores muy similares a lo largo del área de estudio. Las estaciones WAG 21 y WAG 21A fueron las que presentaron los valores mayores con 0.91 y 0.93 respectivamente, ambas ubicadas en el borde de la Cuenca Consag. El promedio global fue de  $0.87 \pm 0.02$  (Tabla A9, Anexo A). Todos los valores de la anomalía de Ce de este estudio son menores a los esperados para la corteza superior (Figura 6.21). Como se mencionó en el Capítulo 6, la anomalía de Ce nos permite cuantificar el fraccionamiento del Ce respecto a las demás REE



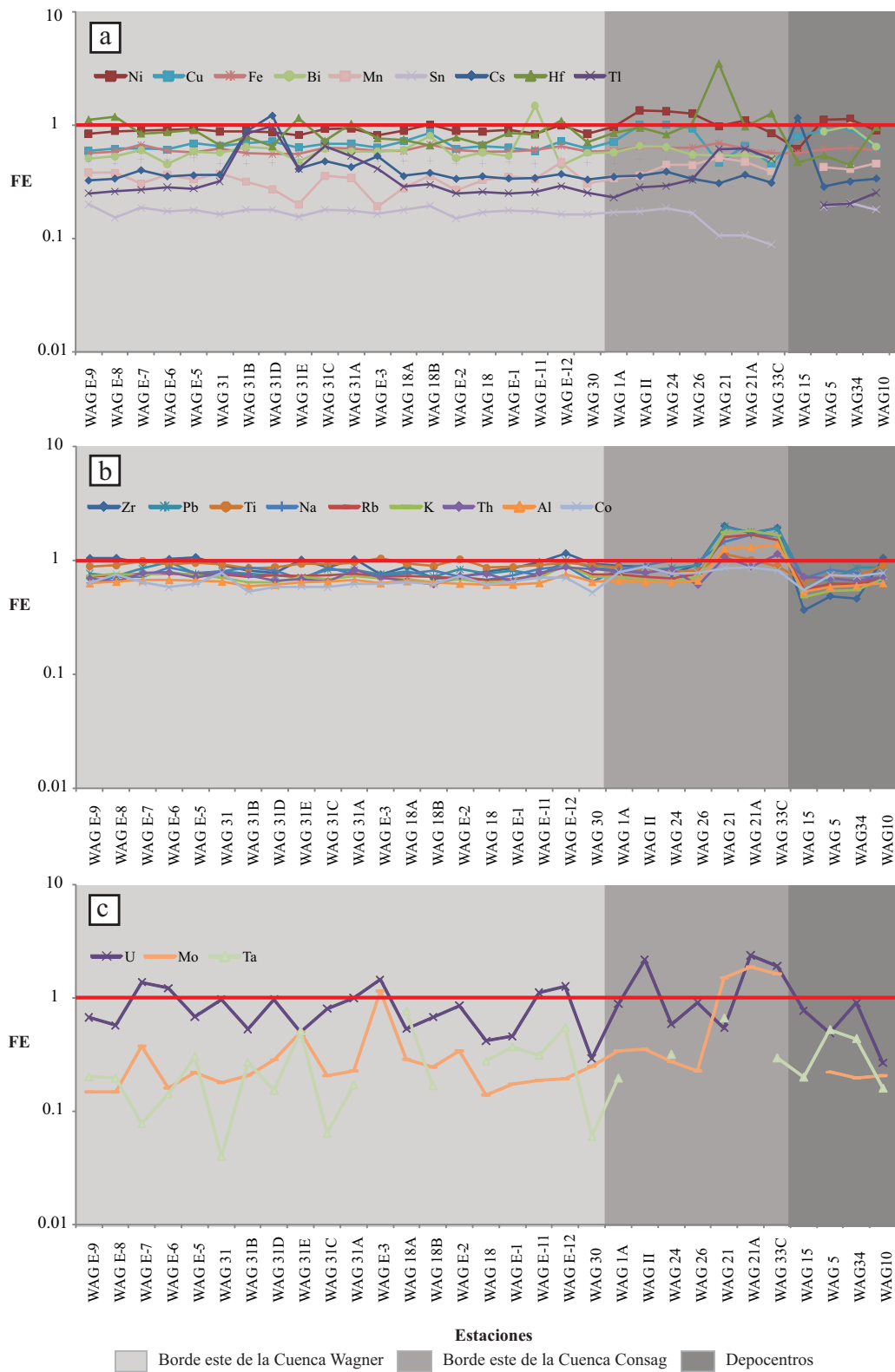


Figura 6.19. Distribución de los valores promedio de FE para los elementos empobrecidos de las cuencas de Wagner y Consag, NGC. a) Ni, Cu, Fe, Bi, Mn, Sn, Cs, Hf, Ti, b) Zr, Pb, Ti, Na, Rb, K, Th, Al, Co, y c) U, Mo y Ta.

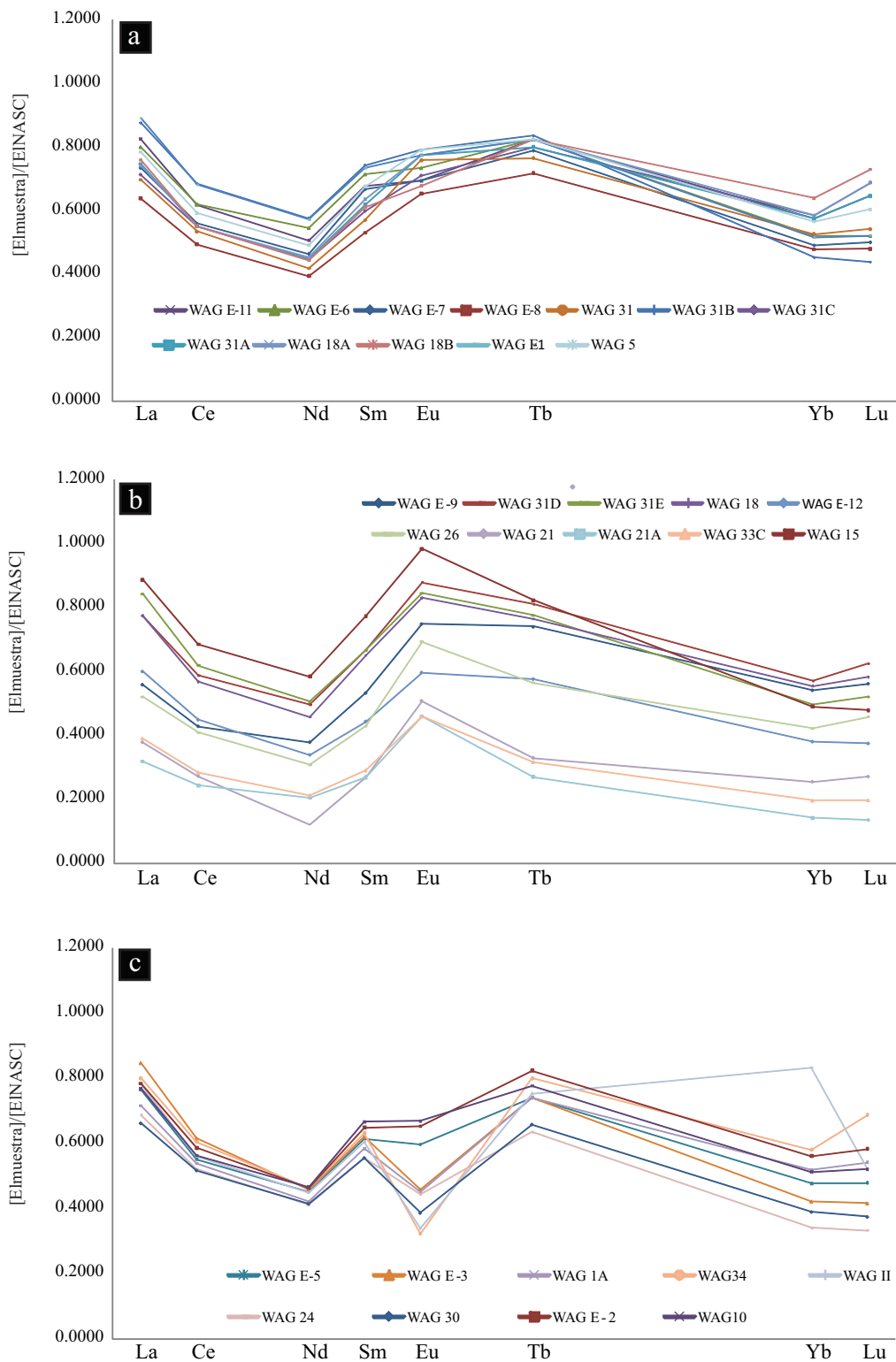


Figura 6.20. Patrón de REE presentados por las muestras de sedimento de las cuencas de Wagner y Consag NGC: (a) Estaciones que presentan el comportamiento promedio; (b) estaciones que presentan anomalía de Eu positiva, y (c) estaciones que presentan una anomalía de Eu negativa.

trivalentes dependiendo de las condiciones redox del ambiente. Para nuestro caso, no existe un fraccionamiento importante por la cercanía de los valores a 1 (Tabla A8, Anexo A) y por lo tanto condiciones ambientales que afectarán su distribución.

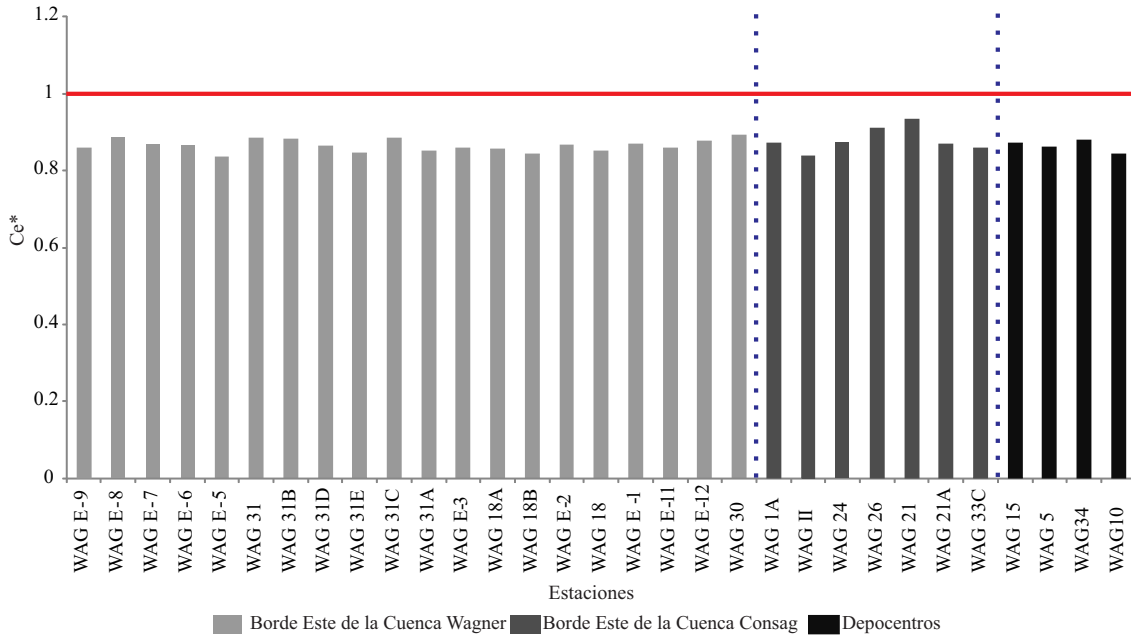


Figura 6.21. Distribución de la anomalía de Ce en sedimentos de las cuencas de Wagner y Consag, NGC.

A diferencia de la anomalía de Ce, los valores obtenidos del cálculo de la anomalía de Eu son muy diferentes entre una y otra estación, el promedio global fue de 1.14 sin embargo es la desviación estándar de 0.32 la que nos da una idea de la dispersión de los datos respecto al promedio, los valores menores se obtuvieron en las estaciones WAG 34 (0.51) y WAG 11 (0.69) la primera ubicada en el depocentro de la Cuenca Consag y la segunda en el borde este de la Cuenca Wagner. Los máximos se registraron en las estaciones WAG 21 (1.9), WAG 21A (1.71), WAG 26 (1.61) y WAG 33C (1.6) todas estas localizadas en el borde este de la Cuenca Consag. Para la mayoría de casos, los valores de la anomalía de Eu calculados son mayores a los esperados para la corteza superior, con la excepción de 6 estaciones (Figura 6.22). De manera similar a la utilidad de la anomalía de Ce, la anomalía de europio nos indica el fraccionamiento del mismo respecto a el resto de los REE, altos valores positivos de esta indican un mayor fraccionamiento de Eu.

Finalmente la razón  $La_{norm}/Yb_{norm}$  tuvo un comportamiento similar al observado en la anomalía de europio con una amplia dispersión a partir del promedio ( $1.5 \pm 0.3$ ). Los valores oscilaron desde 0.94 en la estación WAG II a 2.25 en la estación WAG 21A, sin embargo el promedio global de las muestras de 1.51 es muy similar al valor calculado para la corteza superior 1.56 (Tabla A9, Anexo A). Como es posible observar, no existe ningún patrón respecto a la ubicación de las muestras y la distribución de los valores es heterogénea, sin embargo es importante mencionar que de acuerdo a los valores obtenidos y la interpretación de la razón  $La_{norm}/Yb_{norm}$  los sedimentos

para el área de interés presenten en la mayoría de casos un ligero enriquecimiento de tierras raras ligeras, respecto a las pesadas (Figura 6.23).

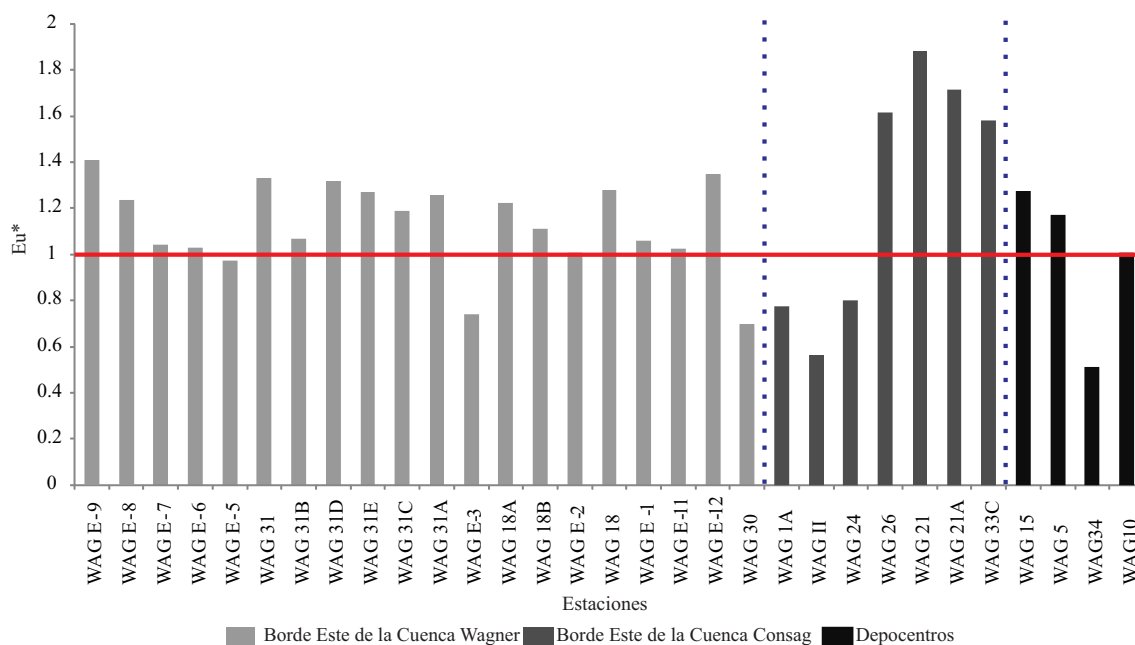


Figura 6.22. Distribución de la anomalía de Eu en sedimentos de las cuencas de Wagner y Consag, NGC.

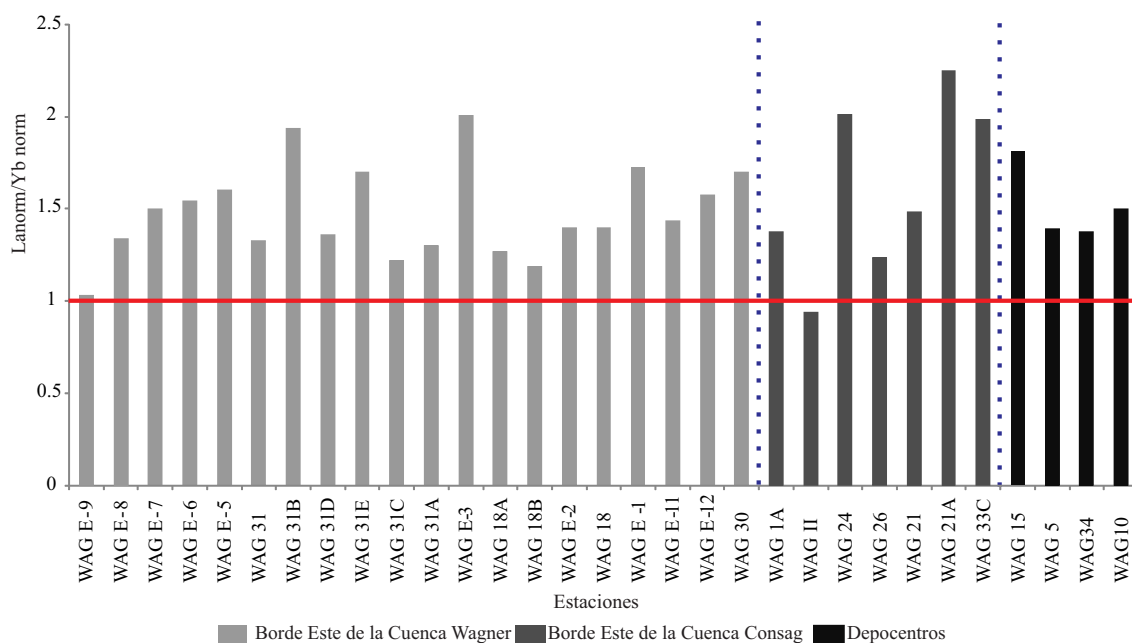


Figura 6.23. Distribución de la razón  $La_{norm}/Yb_{norm}$  en sedimentos de las cuencas de Wagner y Consag, Norte del Golfo de California.

## 6.7 Análisis de factores y cluster para los sedimentos

Como se mencionó previamente en el capítulo de materiales y métodos, para este estudio se realizó un análisis de factores (modo “R”) con el interés de distinguir las principales asociaciones de elementos que caracterizan la composición de los sedimentos de las cuencas Wagner y Consag. El análisis de factores se realizó utilizando los datos de concentración de 28 elementos (variables) en 31 muestras (casos). Se decidió no utilizar la concentración de los 44 elementos analizados puesto la literatura recomienda que el número de casos sea mayor al número de variables (Hair *et al.*, 1999). Las variables empleadas para el análisis se seleccionaron de acuerdo a las características geoquímicas y mineralógicas, tratando de conservar aquellas que son más representativas de los rasgos observados previamente por otras herramientas.

La prueba de KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) y esfericidad de Bartlett se utilizaron como herramientas para evaluar la matriz de correlaciones y determinar de esta manera si es apropiado y válido realizar el análisis de factores. La prueba de KMO contrasta si las correlaciones parciales entre las variables son suficientemente pequeñas. El estadístico varía entre 0 y 1, los valores  $< 0.50$  indican que el análisis factorial no es aplicable, dado que las correlaciones entre los pares de variables no pueden ser explicadas por otras variables. Por su parte la prueba de esfericidad de Bartlett contrasta la hipótesis nula de que la matriz de correlaciones es una matriz identidad, en cuyo caso no existirían correlaciones significativas entre las variables y por lo tanto el análisis factorial no sería pertinente, una significación  $< 0.05$  indica que se puede rechazar la hipótesis nula y que por lo tanto tiene sentido aplicar el análisis factorial (Hair *et al.*, 1999). Los resultados de ambas pruebas indican que nuestra matriz de datos es adecuada para realizar un análisis de factores Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Resultados de las pruebas de KMO y Bartlett obtenidas para la matriz de datos utilizada en el análisis de factores.

Prueba	Resultado
Medida de adecuación muestral de KMO	0.553
Prueba de esfericidad de Bartlett	Significancia: 0.000

Para el caso de los sedimentos de las cuencas Wagner y Consag se definieron cuatro factores, los cuales tienen autovalores mayores de 1.4 y explican el 80.2% de la variabilidad de los datos (Tabla 6.2 y Figura 6.24).

Tabla 6.2. Autovalores y varianza explicada través del análisis de factores modo “R”.

Factor	Autovalores	% de la varianza	Autovalores (acumulado)	% de la varianza (acumulado)
1	14.1	47.8	14.1	47.8
2	4.4	13.4	18.5	61.2
3	3.1	13.0	21.6	74.2
3	1.5	6.0	23.1	80.2

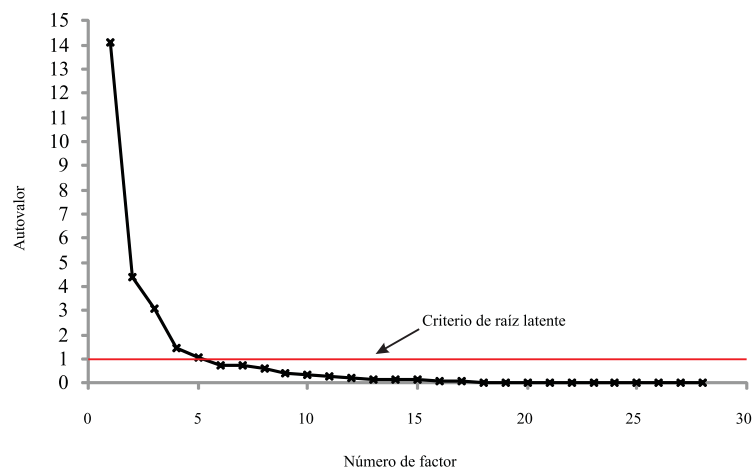


Figura 6.24. Gráfico de sedimentación de los factores obtenidos por el análisis de factores y criterio de raíz latente.

Como se observa en la Tabla 6.2, para el caso de los sedimentos de las cuencas Wagner y Consag, los porcentajes de las varianzas son controlados principalmente por cuatro factores. La Tabla 6.3 muestra los valores de las cargas factoriales para cada factor. El Factor 1 se caracterizó por asociaciones de los elementos: Al, Fe, Ca, Na, Mg, Ti, P, Mn, Zn, Cr, Ni, Pb, Cu, Coi, además del Corg. El Factor 2 es descrito por asociaciones entre K, Zr y Eu. Para el factor 3 los elementos de relevancia son: S, Ba y Sr. y finalmente en el factor 4 el carbonato es el más relevante. De acuerdo a las asociaciones descritas se infiere que la procedencia de los materiales que componen los sedimentos está asociada principalmente a aportes terrígenos (factor 1 y 2), y biogénico (factor 4) así como una importante componente autigénica (factor 3 y 4).

Con ayuda del cluster en modo “Q” fue posible identificar las principales regiones geoquímicas del área de estudio de acuerdo con la similitud existente entre las características de las muestras recolectadas en cada estación.

Con el análisis de cluster fue posible identificar 6 grupos de muestras (Figura 6.25), de las cuales cinco comparten similitudes. El grupo restante (muestras WAG 21, WAG 21A y WAG 33C) ubicadas en el sureste de la Cuenca Consag, se diferencia claramente del resto. Los grupos creados por el análisis de cluster presentan una buena correlación geográfica (ver mapa de sitios de muestreo Figura 5.1); es decir, las estaciones que integran cada grupo se caracterizan por ubicarse relativamente cercas entre sí, con la única excepción de la estación WAG 10.

En base con lo anterior podemos definir dos grupos claramente diferenciados, uno integrado por las muestras del sureste de la Cuenca Consag (WAG 21, WAG 21A, WAG 33C) y otro que incluye todas las demás muestras, pero que a su vez diferencia los depocentros (Grupo 5: WAG 15, WAG 5 y WAG 34) y los sedimentos ricos en Ba y S (Grupo 4: WAG E-3 y WAG E-2).

Tabla 6.3. Resultados del análisis de factores por el modo “R” para la geoquímica de sedimentos de las cuencas de Wagner y Consag.

Elemento	Factor			
	1	2	3	4
$C_{org}$	<b>0.820</b>	-0.174	-0.130	0.421
$CaCO_3$	0.566	-0.028	-0.237	<b>-0.675</b>
Si	<b>-0.959</b>	-0.061	-0.265	0.030
Al	<b>0.873</b>	0.367	0.009	0.001
Fe	<b>0.933</b>	0.295	0.115	-0.038
Ca	<b>0.811</b>	-0.208	-0.315	-0.212
K	0.581	<b>0.753</b>	-0.007	-0.021
Na	<b>0.882</b>	0.013	-0.113	0.111
Mg	<b>0.945</b>	0.286	-0.070	-0.106
Ti	<b>0.658</b>	0.633	0.350	-0.029
S	0.268	0.258	<b>0.734</b>	0.206
Ba	-0.099	-0.090	<b>0.971</b>	0.054
P	<b>0.651</b>	0.495	0.223	0.046
Mn	<b>0.852</b>	-0.033	-0.275	-0.327
Sr	-0.055	-0.095	<b>0.975</b>	0.054
Zr	-0.038	<b>0.868</b>	-0.227	0.039
Ce	0.617	0.535	0.296	0.045
Zn	<b>0.958</b>	0.205	0.051	0.023
Cr	<b>0.760</b>	0.397	0.238	0.166
Ni	<b>0.981</b>	-0.019	-0.044	0.075
Pb	<b>0.816</b>	0.047	-0.068	-0.108
Cu	<b>0.972</b>	-0.014	-0.044	0.098
Co	<b>0.911</b>	0.053	0.066	-0.036
Hf	-0.157	0.534	-0.059	0.132
U	0.348	-0.129	0.233	0.628
As	-0.002	0.056	0.226	0.093
Eu	-0.014	<b>0.693</b>	-0.030	-0.342
Mo	-0.261	-0.217	0.615	0.492

Dendograma utilizando *Complete Linkage*

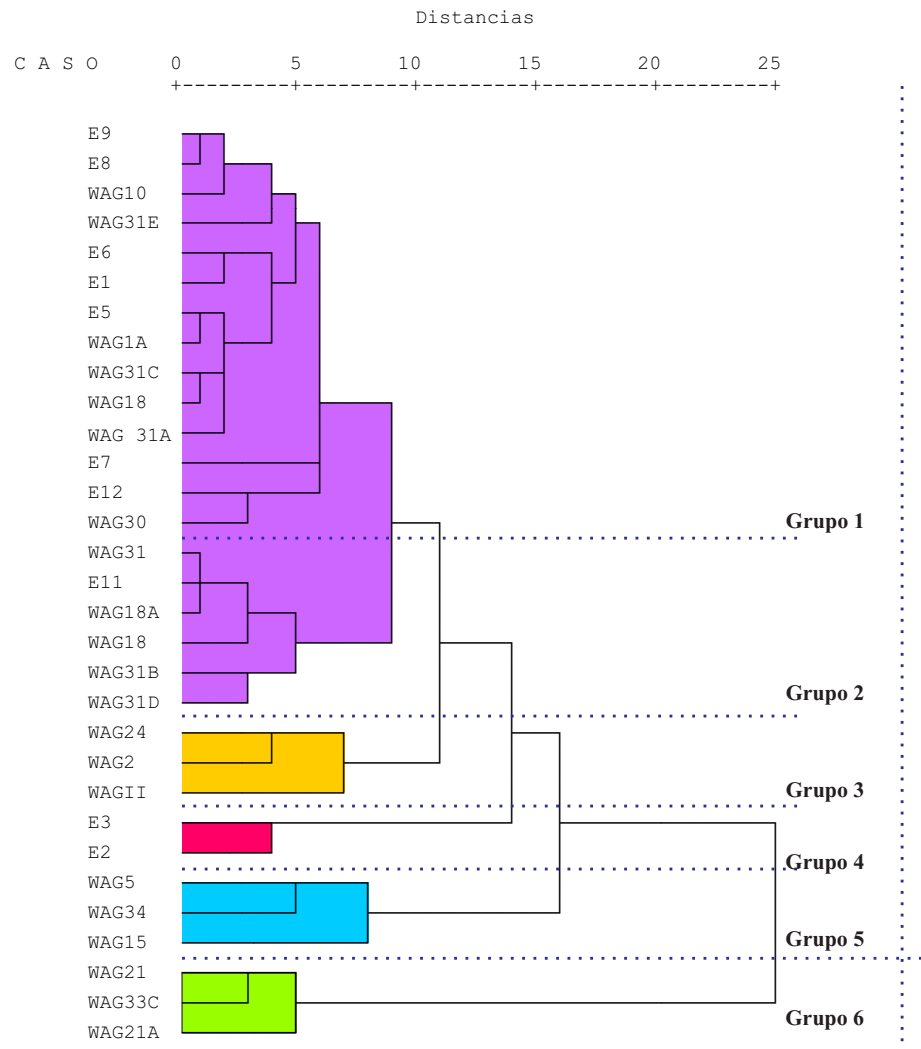


Figura 6.25. Dendograma del análisis de cluster (modo “Q”) realizado para sedimentos de las cuencas Wagner y Consag.



## 6.8 Mineralogía y geoquímica isotópica

La información de la composición mineralógica de las muestras de sedimento de las cuencas Wagner y Consag ha sido tomada del trabajo realizado por Birosta (2008); en este trabajo se analizaron 30 muestras de sedimento de las cuencas Wagner y Consag, de las cuales 19 coinciden con muestras analizadas en este estudio. Birosta (2008), de acuerdo con la ubicación del muestreo, estableció cinco regiones diferenciables en base en la mineralogía (Tabla 6.4).

Como se muestra en la Tabla 6.5, con excepción de las estaciones WAG E-2 y WAG E-3, las muestras son mineralógicamente muy similares entre sí, siendo el cuarzo y la plagioclasa los minerales más comunes, seguidos en abundancia por la calcita y la dolomita. Las estaciones WAG-2 y WAG-3 muestran además del cuarzo, concentraciones importantes de barita y pirita, indicando de esta manera que posiblemente están ocurriendo procesos *in situ* que llevan a la formación de estos minerales.

Tabla 6.4. Regiones de muestreo y muestras de interés para este trabajo y cuya mineralogía ha sido descrita previamente por Birosta (2008).

Región	Muestras representativas
1) Depocentro de la Cuenca Wagner	WAG-15
2) Zona de Columnas de gas de la Cuenca Wagner	WAG E-1, WAG E-2, WAG E-3, WAG E-7, WAG E-9, WAG E-11, WAG 18A
3) Zona con temperatura de sedimentos más elevada	WAG 31A, WAG 31B, WAG 31C, WAG 31 D
4) Depocentro de la Cuenca Consag	WAG 05, WAG 34
5) Volcanes de lodo “El Puma”	WAG 21, WAG 21A, WAG 24, WAG 26, WAG 33C

Las observaciones por microscopio electrónico se realizaron en muestras cuyas características de composición y mineralogía recalcan rasgos de importancia; estas muestras fueron: WAG E-2 y WAG E-3 de la Cuenca Wagner, y WAG 21, WAG 33C y WAG 34 de la Cuenca de Consag. Las muestras correspondientes a la Cuenca de Wagner se caracterizaron mineralógicamente por estar compuestas de barita, cuarzo, pirita y halita de acuerdo con el análisis de DRX, integrando nódulos. La barita forma cristales tabulares que actúan como cementante agrupando granos de feldespatos de diversos tamaños, en asociación con pirita (Figura 6.26).

La pirita que se observó forma agregados framboidales de  $\sim 20 \mu\text{m}$  de diámetro, los cuales se componen de cristales euhedrales agrupados. Se asocia a barita cementando granos detríticos (Figura 6.27). La composición isotópica de S y Sr realizado a las muestras WAG E-2 y WAG E-3 se muestran en la Tabla 6.6.

Las muestras de la Cuenca Consag no mostraron composiciones tan singulares como los observados en el caso de la Cuenca Wagner. Las muestras de la Cuenca Consag se caracterizaron por presentar morfologías de los granos muy similares entre sí, siendo los feldespato y el cuarzo los minerales más abundantes (Figura 6.28).

Tabla 6.5. Composición mineralógica a partir del análisis por DRX. El análisis semicuantitativo se obtuvo utilizando el programa X'Pert. Todos los resultados se presentan en % en peso y las concentraciones <3% están señalizadas con el símbolo "i" (Modificado de Birosta, 2008).

Región	Muestras	Feldespatos	Ankerita	Barita	Calcita	Caolinita	Dolomita	Esneclita	Yeso	Halita	Illita	Magnetita	Óxidos de Mn	Pirita	Cuarzo	Rutilo
		1	WAG 15	14	-	-	22	8	5	-	-	3	i	-	-	-
2	WAG E-1	15	-	-	7	-	-	-	-	i	i	-	-	-	75	-
	WAG E-2	-	-	38	-	-	-	-	-	5	-	-	-	15	39	3
	WAG E-3	-	-	33	-	-	-	-	5	3	i	-	-	7	50	i
	WAG E-7	14	-	-	11	-	7	-	-	i	i	-	-	-	66	-
	WAG E-9	11	-	-	15	-	6	-	-	i	i	3	-	-	58	-
	WAG E-11	13	-	-	10	-	4	-	-	i	i	-	-	-	71	-
	WAG 18A	17	-	-	9	-	7	-	-	i	i	-	-	-	65	-
3	WAG 31A	12	-	-	7	-	5	-	-	-	i	-	-	-	75	-
	WAG 31B	13	-	-	10	3	6	i	i	4	-	-	i	-	61	-
	WAG 31C	17	4	-	9	-	6	-	-	i	i	-	-	-	61	-
	WAG 31D	15	-	-	-	-	3	-	-	9	i	-	-	-	72	-
4	WAG 05	16	-	-	29	-	5	-	-	5	i	-	-	-	44	-
	WAG 34	20	-	-	28	-	7	i	-	4	i	-	-	-	40	-
5	WAG 21	13	-	-	i	-	-	-	-	i	i	-	-	-	84	-
	WAG 21A	12	-	-	6	6	i	-	-	i	-	-	-	-	73	-
	WAG 24	12	-	-	20	-	3	-	-	4	i	-	i	-	59	i
	WAG 26	13	-	-	16	-	-	-	-	5	i	-	-	-	67	-
	WAG 33C	7	-	-	4	-	-	-	-	i	i	-	-	-	82	-

Tabla 6.6. Composición isotópica de Sr y S de la barita.

Muestra	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\delta^{34}\text{S}_{CDT}$ (‰)
WAG E-2	0.709538	44.8
WAG E-3	0.709566	38.6

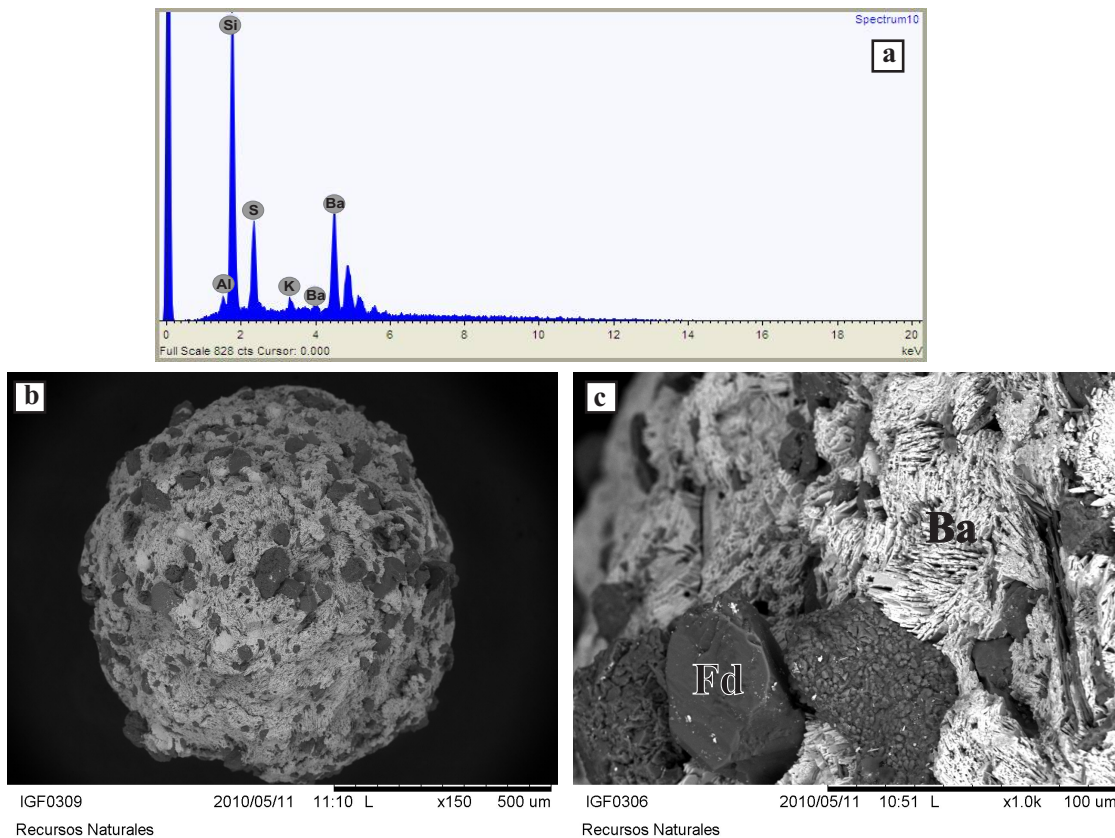


Figura 6.26. Imágenes de microscopía electrónica de los nódulos de barita observados en las estaciones WAG E-2 y WAG E-3: (a) espectro de EDS de los nódulos mostrando su contenido de bario y silicio; (b) visión general de los agregados de barita; (c) Detalle de los nódulos de barita, se observan los fragmentos de feldspatos y cuarzo (gris oscuro) cementados por la barita (blanco).

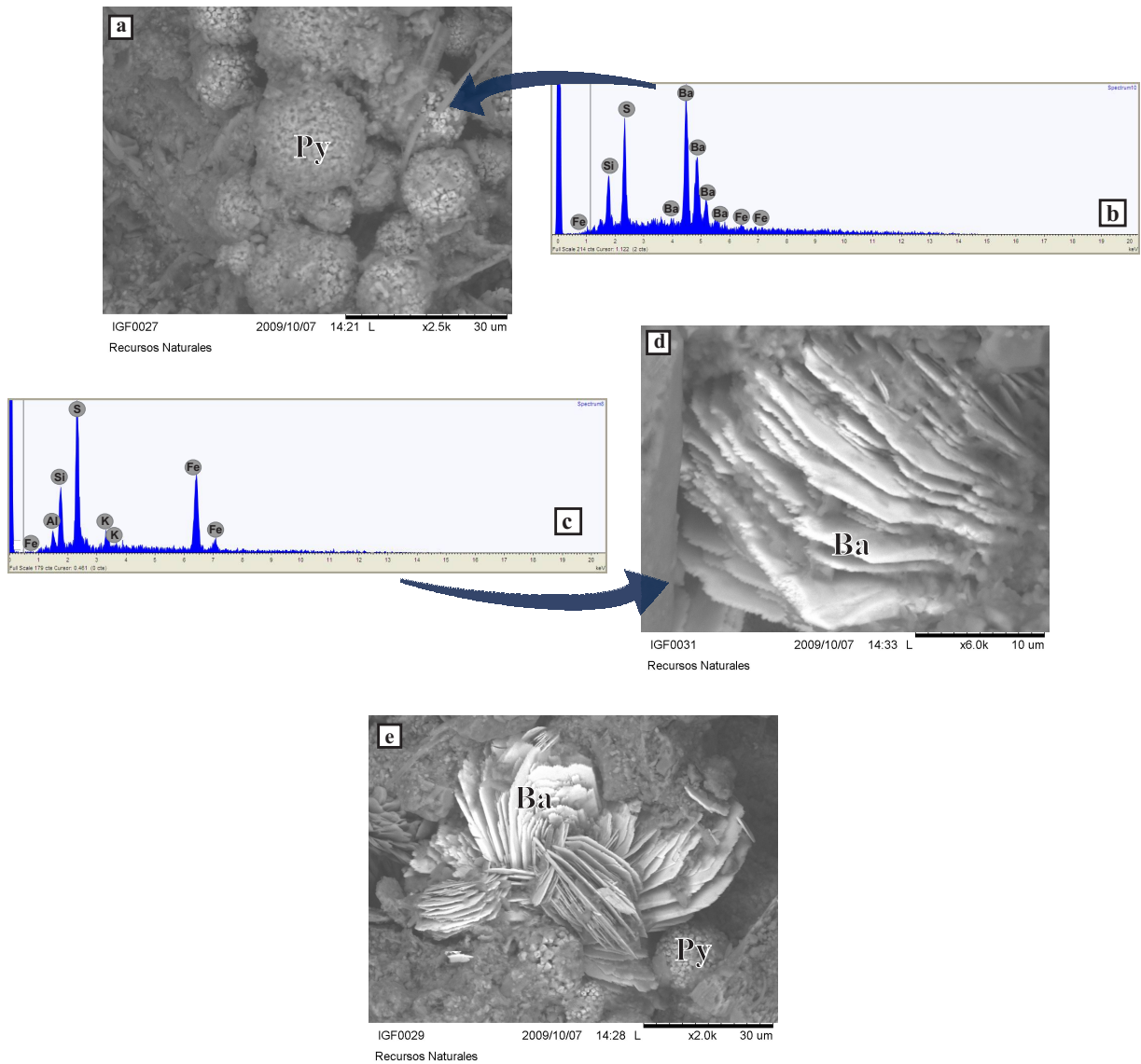


Figura 6.27. Imágenes de SEM de las piritas y baritas: (a) pirita framboidal; (d) y (e) de agregados fasciculares de barita; (b) y (c) espectros EDS para la pirita y barita, respectivamente.

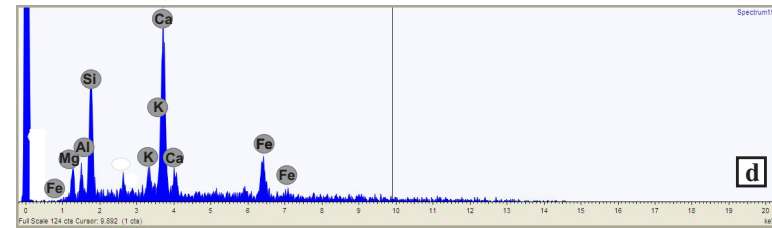
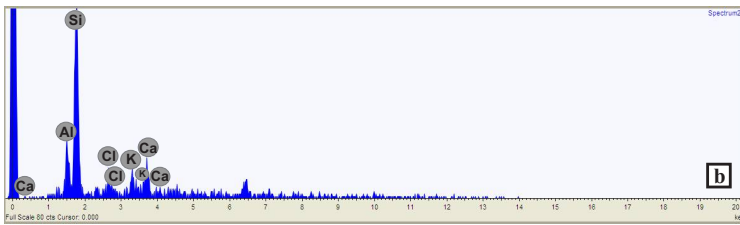
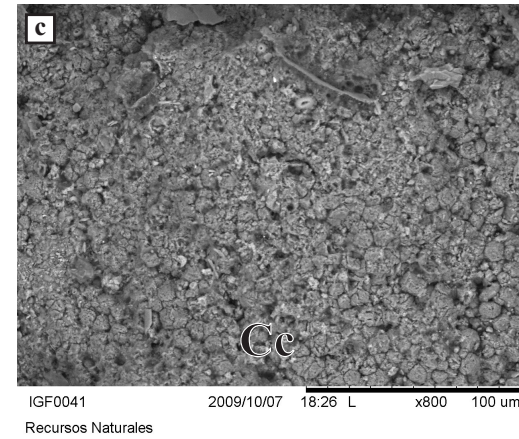
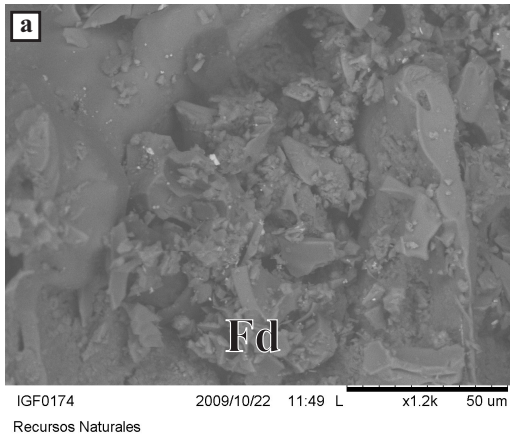


Figura 6.28. small (a) Imagen SEM-BSE de un grano de feldspatos (muestra WAG 34, depocentro de la Cuenca Consag); (b) espectro EDS correspondiente al grano de feldspato. (c) agregado de calcita, con granos de feldspatos y fragmentos esqueléticos (muestra WAG 21, borde oriental de la Cuenca Consag), (d) espectro EDS correspondiente a la calcita.

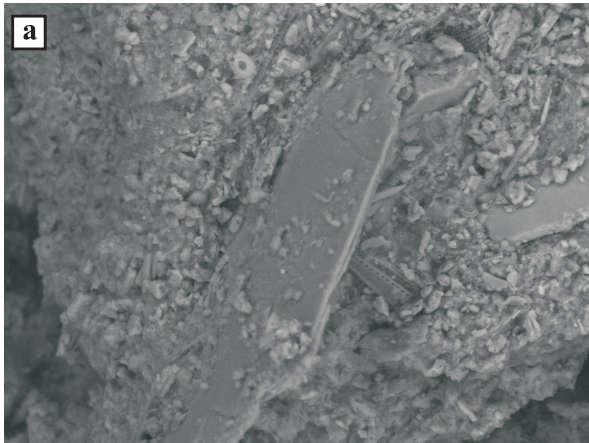
Entre las muestras de la Cuenca Consag la estación WAG 21A fue la más singular, pues el análisis de DFX reveló la abundancia de calcita y dolomita. Ambos carbonatos son masivos y criptocristalinos (Figura 6.28).

La composición isotópica de C y O de esta y otras muestras con presencia de carbonatos se muestran en la Tabla 6.7. La composición isotópica es muy variable mostrándose valores para  $\delta^{13}\text{C}$  de -1.99 a -39.27 ‰, y de  $\delta^{18}\text{O}$  de -5.81 a 3.89 ‰.

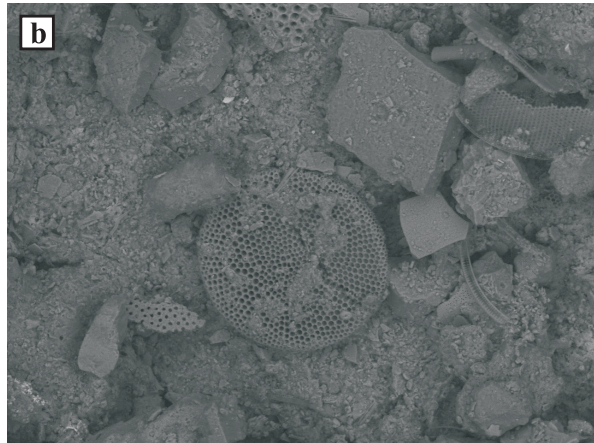
Tabla 6.7. Composición isotópica de C y O en calcita.

Muestra	$\delta^{13}\text{C}_{PDB}$ [‰]	$\delta^{18}\text{O}_{PDB}$ [‰]
WAG 21A	-39.27	3.89
WAG 33C	-38.23	3.66
WAG 21A	-39.12	3.97
WAG 15	-1.26	-4.43
WAG E9	-2.23	-6.70
WAG E11	-1.99	-5.91
WAG 18A	-1.97	-5.55
WAG 31C	-1.99	-5.81

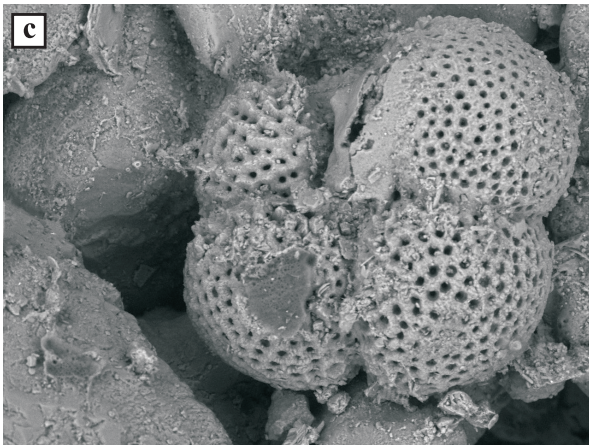
Además de los fragmentos de feldespatos y los carbonatos, para las muestras de la Cuenca Consag se observó una gran cantidad de restos de esqueletos de organismos como foraminíferos y diatomeas. La presencia de estos materiales fue común en la mayoría de las muestras y en algunos casos se encontraban bien conservados (Figura 6.29).



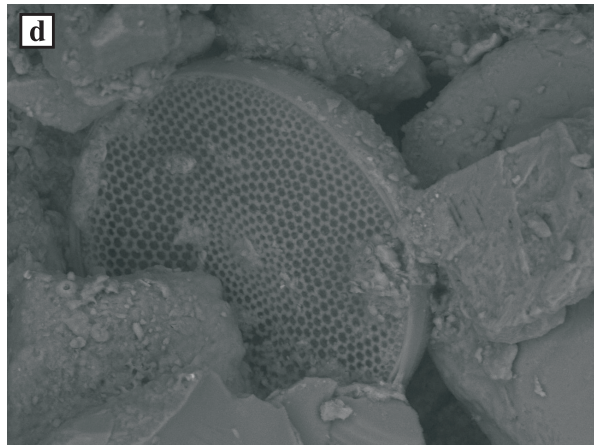
IGF0020 2009/10/06 11:40 L x1.8k 50 um  
Recursos Naturales



IGF0021 2009/10/06 12:03 L x600 100 um  
Recursos Naturales



IGF0039 2009/10/07 18:15 L x600 100 um  
Recursos Naturales



IGF0022 2009/10/06 12:09 L x1.5k 50 um  
Recursos Naturales

Figura 6.29. Imágenes SEM de: (a) granos de feldspatos (WAG 34); (b) y (d) Diatomeas (WAG-33); y (c) Foraminíferos (WAG-33).

## 7. Discusión

### 7.1 Características sedimentológicas

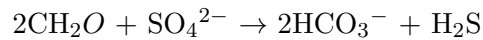
Los tamaños de grano de los sedimentos muestran que las arcillas y limos son los tamaños dominantes en las cuencas de Wagner y Consag, siendo el resultado del intenso transporte desde sus fuentes de origen y además de un continuo retrabajo. Los promedios de tamaño de grano ( $8.7 \phi$ ) indican que los sedimentos son maduros, además los valores de desviación estándar ( $1.4 \phi$ ) señalan un buen grado de clasificación del material, coincidiendo de esta manera con los resultados previamente descritos por Carriquiry *et al.* (2001) quienes observaron valores para tamaño de grano de 6 a  $8 \phi$  para el área de estudio. Debido a su pequeño tamaño los limos y arcillas son fácilmente transportados largas distancias en los ambientes marinos hasta su depósito, estableciendo gradientes de tamaño y patrones de transporte (McLaren y Bowles, 1985; Baba *et al.*, 1991 a, b; Carriquiry *et al.*, 2001). En el caso de las muestras de las Cuencas Wagner y Consag no se observa claramente un gradiente distribucional dada la homogeneidad en los parámetros texturales.

Los estudios existentes sobre la distribución de  $C_{org}$  en sedimentos marinos muestran concentraciones que van de 5 % en sedimentos hemipelágicos, depositados cerca de los márgenes continentales a  $<1$  % en sedimentos pelágicos (Chester, 2003). García-Villalobos y Escobar-Briones (2007) registraron concentraciones de  $C_{org}$  de 0.26 a 1.28 % para sedimentos pélagicos del Golfo de México, mientras que para Bahía Concepción, en la costa oriental de la Península de Baja California, Rodríguez-Meza *et al.* (2009) encontraron valores entre 0.5 y 2.5 %; para la región del AGC Shumilin *et al.*, (2002) observaron concentraciones de 0.3 a 2.2 %, ambas concentraciones muy similares a los valores reportados por esta investigación (0.14 - 2.59 %); aunque ligeramente menores a los valores esperados para márgenes costeros, debido probablemente a la resuspensión y depositación del material sedimentario derivado del Delta del Río Colorado sumado con una intensa diagénesis del  $C_{org}$  durante la depositación de las partículas (oxidación durante el inicio de la secuencia diagenética) (Camacho-Ibar *et al.*, 2003). La materia orgánica que encontramos en los sedimentos marinos se genera principalmente por la fijación fotosintética del carbono inorgánico por el fitoplancton y básicamente refleja los patrones de producción primaria, sólo alrededor del 17 % se deposita en el sedimento superficial; es de esperar, por lo tanto, que los flujos de  $C_{org}$  disminuyan conforme aumenta la profundidad en la columna debido a efectos de remineralización (Chester, 2003). Sin embargo, en algunas regiones se ha observado que esto puede no cumplirse debido a: (1) las características del tamaño de grano; (2) las condiciones ambientales en la columna de agua incluyendo la productividad primaria, profundidad del agua, temperatura y contenido de oxígeno entre otros, y (3) la tasa de sedimentación (Zabel *et al.*, 1998; Seiter *et al.*, 2004). De modo similar, una distribución anómala del  $C_{org}$  se observa en



las cuencas de Wagner y Consag, donde los valores mayores se registran en ambos depocentros. Camacho-Ibar *et al.* (2003) describieron este fenómeno para la región NGC y la Cuenca Delfín, argumentando que el carbono orgánico se vuelve ligeramente refractario debido a la pérdida de los componentes lábiles durante su hundimiento, lo que permite que la materia orgánica se preserve y alcance los sedimentos. También García-Villalobos y Escobar-Briones (2007) observaron un comportamiento parecido del de  $C_{org}$  en los sedimentos del Golfo de México.

Las concentraciones de carbonatos de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) registradas en sedimentos en este trabajo son menores ( $7.9 \pm 8.3\%$ ) a las observadas por diversos autores para sedimentos costeros en el GC. Rodríguez-Figueroa (2004) reporta concentraciones entre el 10 y 20% de carbonatos para sedimentos marinos frente a Santa Rosalía, mientras que Rodríguez-Meza *et al.* (2009) describen un promedio del 41% de carbonatos para sedimentos de Bahía Concepción, ambas localidades en la costa oriental de la Península de Baja California. Los carbonatos localizados en ambientes someros, como ocurre en el caso de las cuencas Wagner y Consag, son principalmente producidos por la desintegración de los esqueletos de organismos planctónicos y bentónicos como foraminíferos, cocolitofóridos, moluscos y algas coralinas. Además puede ocurrir la precipitación inorgánica si existen las condiciones fisicoquímicas adecuadas para la precipitación de carbonatos autigénicos directamente del agua marina u otros fluidos (Morse, 2003; Álvarez-Borrego, 2007). Los depocentros de ambas cuencas se caracterizaron por mostrar las mayores concentraciones de  $\text{CaCO}_3$ , respecto al resto. En sedimentos siliciclásticos característicos de regiones costeras es frecuente el establecimiento de zonas de subsaturación de carbonatos en la interfaz sedimento-agua donde ocurre la oxidación de materia orgánica (diagénesis temprana), dando lugar a la disolución de sedimentos carbonatados por la producción de ácidos orgánicos (desintegración bacteriana) y  $\text{CO}_2$ . Sin embargo, cuando la cantidad de materia orgánica es mayor, los carbonatos pueden ser bien conservados, puesto que la oxidación de la materia orgánica se realizará por reducción de  $\text{SO}_4^{2-}$  (el oxígeno se encuentra agotado), la cual puede ser lo suficientemente fuerte, provocando un aumento en la alcalinidad y así mismo en el pH, lo que resultaría en la precipitación y preservación del  $\text{CaCO}_3$  (Morse, 2003; Kastner *et al.*, 2008).



Bajo estas circunstancias sólo el efecto inhibitor del ión Mg o la presencia de películas orgánicas que cubren las partículas que podrían actuar como núcleos de precipitación, factores que determinarían la precipitación inorgánica de  $\text{CaCO}_3$  (Keith y Suess, 1962). Posiblemente las anomalías de  $C_{org}$  y  $\text{CaCO}_3$  observadas en los depocentros de ambas cuencas estén relacionadas con este fenómeno.

## 7.2 Componentes geoquímicos de los sedimentos y mineralogía

Al comparar la composición de los sedimentos de Wagner y Consag con la composición promedio de la corteza superior se observa que la mayoría de los elementos se encuentran en concentraciones similares, sugiriendo así que estos permanecen sin efecto de las actividades antropogénicas y que no se observan anomalías geoquímicas, con excepción de la del Ba y S. Por lo tanto, las concentraciones observadas de la mayoría de los elementos en los sedimentos del área de estudio reflejan el aporte natural producto de la erosión de las estructuras geológicas que se encuentran en la cuenca del Río Colorado y, en menor proporción, de otros ríos, y del Desierto de Sonora, concordando con las observaciones previamente descritas para la región del AGC por Shumilin *et al.* (2002).

Suponiendo que los sedimentos marinos son producto de una mezcla entre tres componentes principales: (a) los aluminosilicatos, representados por el contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{SiO}_2$  (parcialmente); (b) el sílice biogénico, representado parcialmente por contenido de  $\text{SiO}_2$ , y (c) los carbonatos biogénicos y autigénicos, representado por el CaO (Brumsack, 1989). En la Figura 7.1 se observa que la composición de elementos mayores de los sedimentos de Wagner y Consag se encuentra dentro del rango general de los sedimentos para el GC descritos por Baba *et al.* (1991), destacando la similitud entre la composición de los depocentros y los valores reportados por este autor para el NGC. El componente terrígeno deducido del análisis de factores (capítulo 6) es el más importante para los sedimentos de las cuencas Wagner y Consag, tal y como se observa en la Figura 7.1. Con respecto a las fuentes originales del material sedimentario terrígeno, se infiere que, para la mayoría de las muestras los contenidos de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  son muy parecidos a los valores de la corteza superior promedio, de modo similar a lo que ocurre con los sedimentos del Paleolago San Felipe, localizado al oeste del NGC (Roy *et al.*, 2011).

Con excepción de los depocentros y algunas muestras de la Cuenca Consag, la concentración promedio de CaO en las muestras no sobrepasa por mucho al porcentaje de la corteza superior, indicando así que con excepción de estos casos, la contribución relativa de carbonato (biogénico y autigénico) no es relevante (Figura 7.1). Finalmente sólo para las estaciones de la Cuenca Consag (WAG 21, WAG 21A y WAG 33C) se observó una concentración significativamente elevada de  $\text{SiO}_2$  (FE: 3.92 -3.94%), motivo por el cual se diferencia claramente del resto de muestras. Es posible que para estos casos la presencia de restos orgánicos opalinos, principalmente diatomeas y/o radiolarios, sea la causa del este enriquecimiento (Figura 7.1).

Las concentraciones de algunos elementos traza registradas en los sedimentos superficiales de las cuencas de Wagner y Consag muestran una similitud con los resultados previamente descritos por Shumilin *et al.* (2002) y Daesslé *et al.* (2004) para la región del AGC y el NGC, respectivamente, destacándose sólo un importante enriquecimiento en Ba y un ligero empobrecimiento en Mn (Tabla 7.1). Como se discutirá más adelante, es probable que el enriquecimiento en Ba se deba a

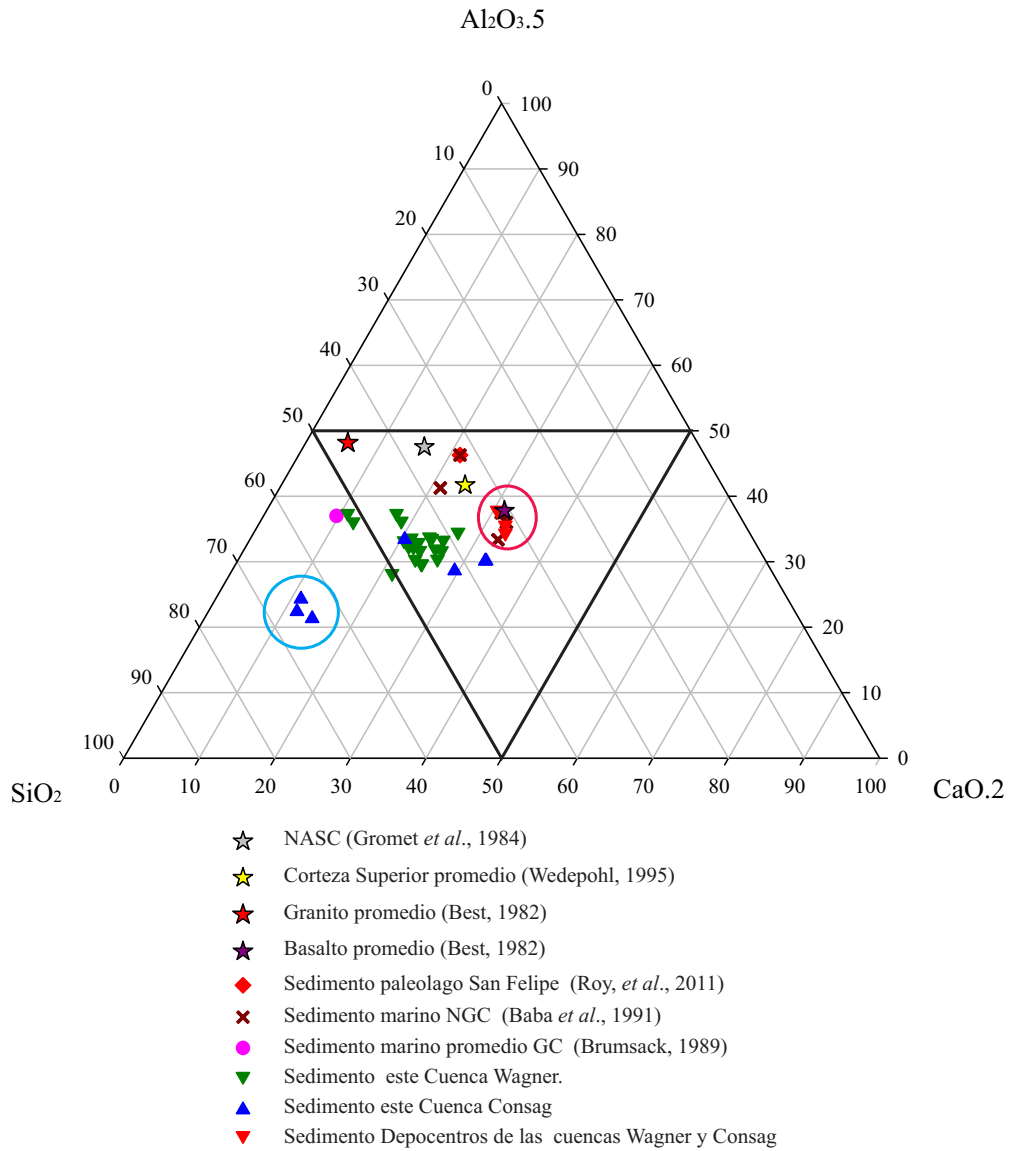


Figura 7.1. Componentes mayores de los sedimentos marinos recolectados en las cuencas de Wagner y Consag, proyectadas en el sistema  $SiO_2$ - $Al_2O_3.5$ - $CaO.2$  (Brumsack, 1989).

Tabla 7.1. Concentraciones de metales para los estándares de Lutita Norteamericana (NASC) y de corteza superior, así como para sedimentos del paleolago de San Felipe, del AGC, del, NGC y de las cuencas de Wagner y Consag.

Elemento	NASC <sup>1</sup>	Promedio Corteza Superior <sup>2</sup>	Paleolago San Felipe <sup>3</sup>	NGC <sup>4</sup>	AGC <sup>5</sup>	cuencas de Wagner y Consag
Al (%)	8.95	7.74	7.93	4.55	-	4.89
Ca (%)	2.43	2.95	3.09	3.90	3.48	3.02
Mg (%)	-	1.35	1.92	1.27	-	1.37
Na (%)	0.75	2.57	3.75	2.28	-	2.00
Fe (%)	3.96	3.09	4.58	1.84	1.73	1.81
Sr (mg·kg <sup>-1</sup> )	142	316	411	689.70	175.24	377.19
Ba (mg·kg <sup>-1</sup> )	636	668	852	424.52	300.75	5534.92
Mn (mg·kg <sup>-1</sup> )	4646	527	774	303.16	-	175.53
Zn (mg·kg <sup>-1</sup> )	-	52	158	54.54	39.23	52.50
Co (mg·kg <sup>-1</sup> )	25.70	14.30	14	9.63	5.48	7.51
Cr (mg·kg <sup>-1</sup> )	124.50	35	111	45.12	28.08	34
Cu (mg·kg <sup>-1</sup> )	-	14.30	44	13.48	-	9.99
V (mg·kg <sup>-1</sup> )	-	53	158	33.87	-	52.75
Ni (mg·kg <sup>-1</sup> )	58	18.60	28	15	45.20	17

<sup>1</sup> Lutita Norteamericana (Gromet *et al.*, 1984)

<sup>2</sup> Promedio para la corteza superior (Wedepohl, 1995)

<sup>3</sup> Sedimento superficial paleolago San Felipe (Roy *et al.*, 2011)

<sup>4</sup> Promedio para sedimentos del NGC (Daesslé *et al.*, 2004)

<sup>5</sup> Promedio para sedimentos del AGC (Shumilin *et al.*, 2002)

procesos de expulsión de fluidos que ocurren *in situ* a lo largo de la Falla de Wagner (Canet *et al.*, 2010). Para el caso del Mn, Daesslé *et al.*, (2002) describen un enriquecimiento hacia el sur-oeste del Delta del Río Colorado y a lo largo de la costa este de la Península de Baja California. Es probable que el delta, tomando en cuenta la dinámica y los patrones de circulación (Carriquiry y Sánchez, 1999 y Carriquiry *et al.*, 2001), sea la fuente de Mn para las cuencas Wagner y Consag, pues de acuerdo con estos autores las concentraciones de Mn disminuyen conforme se acercan a la región de las cuencas, observándose concentraciones como las presentadas en este trabajo.

A manera de comparación es importante destacar que el sedimento superficial del paleolago San Felipe (Roy *et al.*, 2011) muestran una mayor similitud con los valores de la corteza superior y el estándar de lutita norteamericana (NASC; Gromet *et al.*, 1984), indicando que estos materiales tienen una menor influencia por factores, autigénicos y biogénicos, conservando mejor los rasgos de los materiales donde provienen (Tabla 7.1).

La descripción mineralógica de los sedimentos de las cuencas Wagner y Consag concuerda con las composiciones elementales observadas y con el análisis de factores.

### 7.2.1. Factores terrígenos: plagioclasas, arcillas y minerales pesados

Estos factores representan la asociación de la mayoría de elementos (análisis de factores, capítulo 6). Como se observa en las gráficas de correlación, el Al se correlaciona positivamente con el Ca y Na, con  $r > 0.6$  (Figura 7.2). Estos tres elementos son mayoritarios en las plagioclasas, las cuales son, después del cuarzo, el mineral más abundante de los sedimentos de las cuencas de

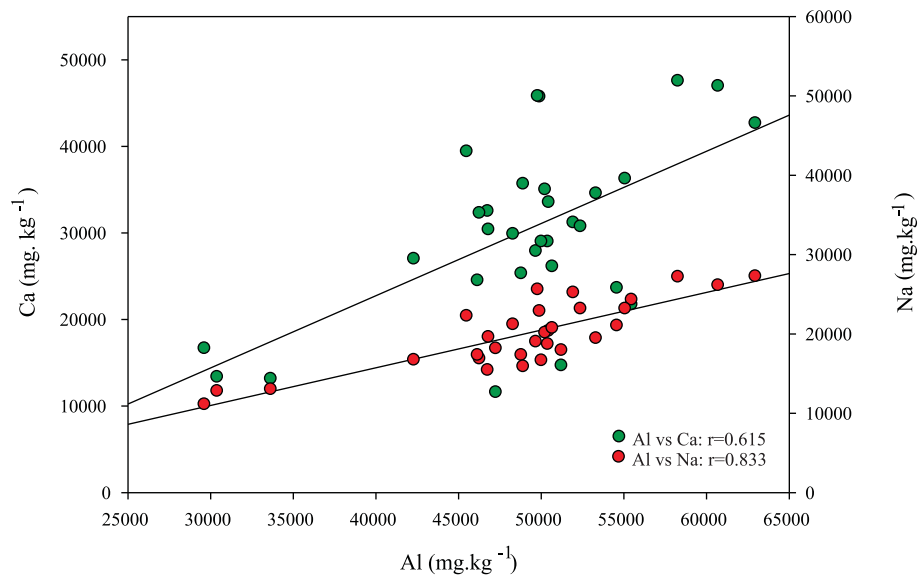


Figura 7.2. Gráfica de correlación del Al vs el Ca y Na para las muestras de sedimento del NGC.

Wagner y Consag (Birosta, 2008). Por ello se puede corroborar la asociación de Al, Ca y Na en esta fase mineral, y su procedencia terrígena. Es importante recalcar que el valor de correlación del Al con el Ca es menor que con el Na ( $r = 0.6$  y  $0.8$ , respectivamente), pues el Ca, además de encontrarse en las plagioclasas, también se asocia con los carbonatos.

Otros elementos como el K no existen en cantidades apreciables en la plagioclasa, ni en las arcillas de los grupos de la caolinita y de la esmectita, aunque si es común en illitas. Para las muestras de sedimento de ambas cuencas se detectó la presencia de illita en pequeñas cantidades ( $<3\%$ ). La buena correlación positiva ( $r = 0.87$ ) entre K y Al indica la asociación de estos elementos posiblemente integrando illita. Además el K mostró valores de correlación altos con la mayoría de las REE (Figura 7.3 y 7.4). La illita es un mineral secundario producto de la alteración de algunos feldespatos alcalinos y de algunas micas como la moscovita. Si el intemperismo es lo suficientemente intenso, las arcillas pueden contener en su estructura algunas tierras raras (Nesbitt *et al.*, 1990).

El Zr, elemento representativo de los minerales pesados, mostró correlaciones positivas con el Hf y el Ti (Figura 7.5), pues estos elementos tienden a concentrarse en la fracción mineral de mayor densidad de los sedimentos, integrando minerales como el zircón, la ilmenita, la titanomagnetita y la titanita.

Previamente en diversos trabajos geoquímicos (Shumilin *et al.*, 2002 y Carriquiry y Sánchez, 1999) señalaron que las dos provincias que aportan sedimentos a la región son el Delta del río Colorado y el Desierto de Sonora, siendo el Delta del Colorado y el retrabajo de sus materiales la principal fuente de los sedimentos superficiales. Por medio de procesos de erosión y flujos de alta densidad estos materiales se dispersan por todo el NGC (Daesslé *et al.*, 2002). Carriquiry

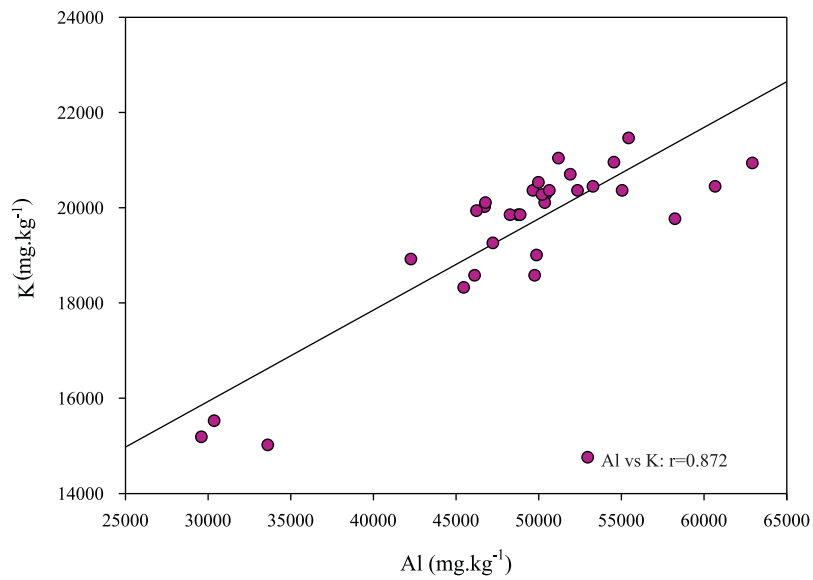


Figura 7.3. Gráfica de correlación del Al vs K para las muestras de sedimento del NGC.

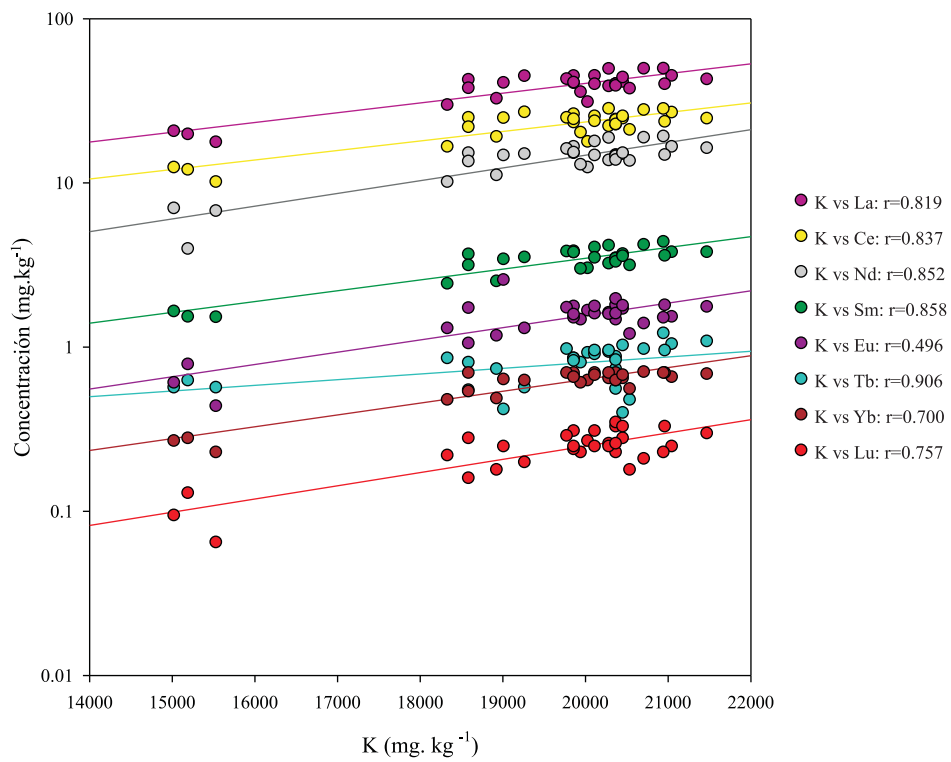


Figura 7.4. Gráfica de correlación del K vs REE para las muestras de sedimento del NGC.

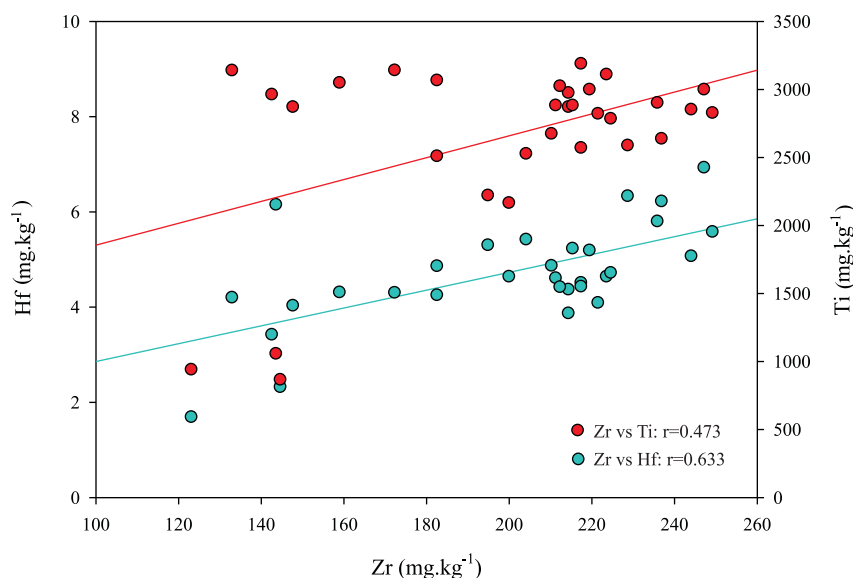


Figura 7.5. Gráfica de correlación del Zr vs Hf y Ti para las muestras de sedimento del NGC.

*et al.* (2009) menciona además que debido a los efectos de la asimetría en la onda de marea, los materiales del AGC siguen procesos de erosión, dispersión y depositación, de modo que el delta se está deteriorando, pues el río ya no aporta cantidades significativas de sedimento.

### 7.2.2. Factor autigénico: barita

El tercer factor más importante para describir la composición de los sedimentos marinos de Wagner y Consag es la barita ( $\text{BaSO}_4$ ). Ba y S mostraron una correlación positiva ( $r > 0.5$ ; (Figura 7.6), indicando su asociación, incluyendo además al Sr, lo que podría estar indicándonos la sustitución de Ba, por este elemento, lo cual ocurre comúnmente (soluciones sólidas) (Hurlbut y Klein, 1974).

La precipitación de barita en los sedimentos es un resultado en la transición óxica-anóxica de los mismos, y requiere la presencia de un fluido reducido y rico en Ba (que puede tener diversos orígenes) que reacciona con el  $\text{SO}_4^{2-}$  del agua de mar, del agua de poro.

La barita ("sedimentaria") se forma en las cuencas oceánicas por varios procesos: (1) hidrogenético, por precipitación en la columna de agua, usualmente con presencia de materia orgánica; este tipo de barita ha sido llamada barita pelágica o barita marina; (2) barita autigénica, que precipita en los sedimentos, a partir del agua de poro, durante la diagénesis usualmente; (3) barita autigénica, precipitada cerca de del fondo marino a partir de fluidos de *cold seeps*; (4) barita hidrotermal precipitada de fluidos hidrotermales de temperatura intermedia ( $150\text{-}250^\circ\text{C}$ ) en zonas de fractura, centros de dispersión etc., asociada a mineralizaciones ricas en metales, y (5) barita hidrotermal precipitada de fluidos hidrotermales de baja temperatura ( $< 120^\circ\text{C}$ ) en márgenes

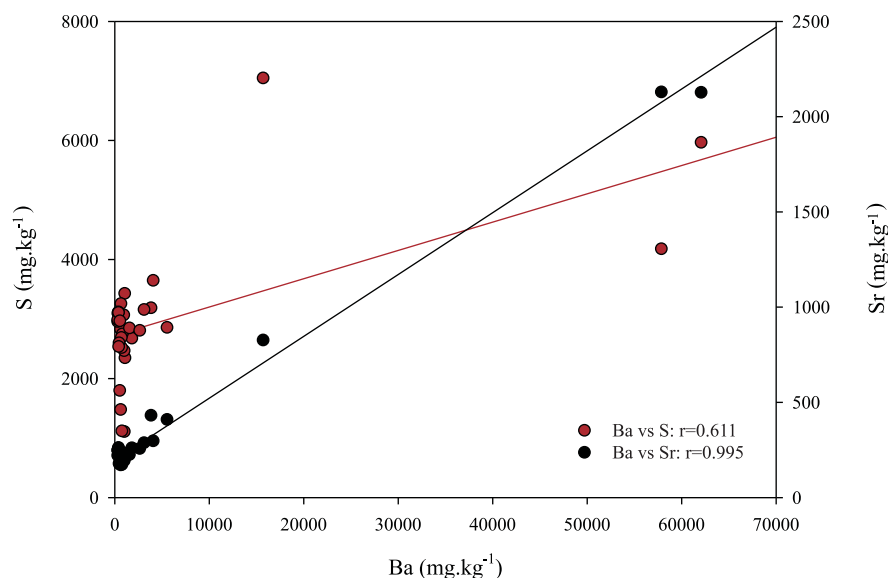


Figura 7.6. Gráfica de correlación del Ba vs S y Sr para las muestras de sedimento del NGC.

continentales, resultado de un gradiente de temperatura, tectónica y una corteza delgada (Paytan *et al.*, 2002; Torres *et al.*, 2003; Canet *et al.*, 2006 y 2007; Hein *et al.*, 2007).

Daesslé *et al.* (2004), a partir de la descripción geoquímica de sedimentos marinos del NGC, identificaron este mismo factor, y lo reconocieron en tres regiones distintas: (a) a NE del AGC, cerca del DRC; (b) en el Delta del Río Concepción, y (c) en los sedimentos profundos de la región de las Grandes Islas; para las primeras dos regiones señalan que el Ba puede deberse a fuentes detríticas. En el caso de la región de las Grandes Islas, estos altos contenidos pueden atribuirse a (a) una producción orgánica de  $\text{BaSO}_4$ , relacionada con la presencia de restos orgánicos, o (b) a una posible actividad hidrotermal. Sin embargo, dichos autores no presentan ninguna evidencia adicional para las fuentes que sugieren.

Los sedimentos ricos en barita de las cuencas Wagner y Consag se ubicaron en regiones donde se observó la emanación de fluidos, a lo largo de la inferida Falla de Wagner en el borde oriental de la Cuenca Wagner (Canet *et al.*, 2010).

La relación isotópica  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  analizada en estas barita mostró razones 0.709538 y 0.709566 ‰ (estaciones WAG E-2 y WAG E-3, respectivamente), mayores al agua mar ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ : 0.709175 ‰; Hein *et al.*, 2007) y a las reportadas para fluidos hidrotermales (Cuenca de Guaymas: 0.70519 y 0.70589, EPR: 0.70285 a 0.70465; Palmer y Edmond, 1989), donde el Sr que se observa es lixiviado principalmente de los basaltos. Los valores observados podrían deberse a una contaminación por arcillas durante la determinación isotópica, estos minerales tienen valores de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  de 0.708 a 0.739 ‰ (Ramma Murthy y Beiser, 1968) y la presencia de pequeñas concentraciones de arcillas en la muestra bastaría para alterar la firma isotópica original.



Por otro lado la composición de los isótopos de azufre en barita ( $\delta^{34}\text{S}$ ) para la Cuenca de Wagner arrojó valores de +44.8 y +38.6 ‰, significativamente mayores a los del agua de mar ( $\sim +21$  ‰; Hein *et al.*, 2007). Los valores de  $\delta^{34}\text{S}$  dependen del fraccionamiento entre las especies con azufre ( $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{H}_2\text{S}$ ), así como de la fuente original de dicho elemento (magmática o marina). La presencia de piritita framboidal suele tomarse como evidencia de un origen microbiano (aunque también puede formarse abióticamente; Prol-Ledesma *et al.*, 2010), de modo que ambos minerales, barita y piritita, pudieran estar asociados, habiéndose formado la piritita mediante un proceso de reducción bacteriana del sulfato marino, el cual implica fraccionamientos de hasta un 60 ‰ (Ohmoto, 1986). Por otro lado, el fraccionamiento entre el ión sulfato y la barita es despreciable (Claypool, 1980). En el mecanismo de reducción bacteriana del sulfato, el oxígeno del sulfato del agua de poro es utilizado por las bacterias para metabolizar materia orgánica, liberando el ión sulfuro, el cual reacciona con el hierro de los minerales detríticos para producir piritita (Canet *et al.*, 2006; Birosta 2008; Canet y Prol-Ledesma, 2010). Previamente se han observado y descrito la presencia de ambos minerales en regiones donde existen fenómenos que involucran la liberación de fluidos (Otero *et al.*, 2003; Canet *et al.*, 2006).

### 7.2.3. Carbonatos

El último factor descrito por el análisis de factores (capítulo 6) es el correspondiente a los carbonatos; coincidiendo con lo que previamente había identificado por Daesslé *et al.* (2004) y Shumilin *et al.* (2002) para las regiones del AGC y NGC.

Ambos trabajos hallaron una correlación del Ca con el Sr, que refuerza el componente de los carbonatos biogénicos. Dicha correlación no se observa para nuestro caso ( $r = -0.3$ ); sin embargo el Ca y  $C_{inor}$  muestran una buena correlación positiva ( $r = 0.7$ ; Figura 7.7) indicando su asociación de estos elementos en minerales de los  $\text{CaCO}_3$ .

Según Daeselé *et al.* (2004), la costa de Sonora y la zona de las Grandes Islas se caracterizan por la abundante presencia de carbonatos que, sin embargo, no definen patrones regulares de distribución. En Wagner y Consag, los carbonatos minerales (calcita) mostraron un alto contenido de restos orgánicos, producto de algunos organismos como foraminíferos o bivalvos.

Como se mencionó previamente los carbonatos marinos se pueden generar por precipitación inorgánica (carbonatos autigénicos), o bien pueden ser de origen biótico (carbonatos biogénicos). Los carbonatos autigénicos pueden precipitar directamente del agua o en la interfaz agua-sedimento. Por ejemplo, en sistemas de *cold seeps* precipitan resultado de la liberación de fluidos ricos en metano, el cual es consumido anaeróbicamente por microorganismos (oxidación anaeróbica del metano, AOM por sus siglas en inglés), donde el sulfato actúa como oxidante (Aloisi *et al.*, 2004):



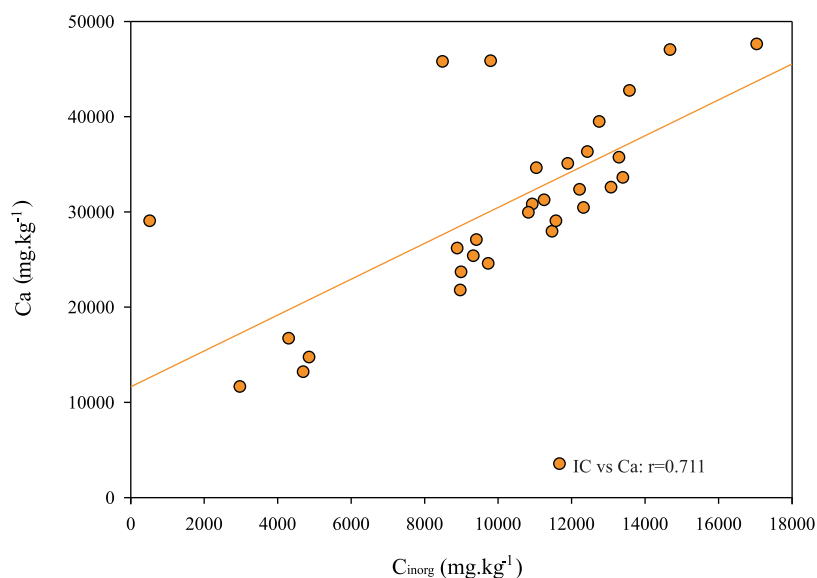


Figura 7.7. Gráfica de correlación del  $C_{inorg}$  vs Ca para las muestras de sedimento del NGC.

Al aumentar el contenido de bicarbonato, aumentará la alcalinidad del agua, propiciando la precipitación de carbonatos de Ca y Mg.

La composición isotópica los carbonatos varió en un amplio rango en el área de estudio: desde  $\delta^{13}C_{PDB}$  -1.26 a -2.23 ‰, y  $\delta^{18}O_{SMOW}$  +24 a +26.3 ‰ para el depocentro (WAG-15) y borde este de la Cuenca Wagner (WAG E-9, WAG E-11, WAG 18-A y WAG 31C), hasta  $\delta^{13}C_{PDB}$  -36.78 a -39.27 ‰, y  $\delta^{18}O_{SMOW}$  +33.95 a +34.953 ‰ para la Cuenca Consag. En ambientes someros, donde las aguas tienen un intercambio limitado con el océano abierto, como la región del AGC y NGC, las razones isotópicas del C pueden mostrar fuertes variaciones debido a procesos de remineralización del  $C_{org}$  y de incremento en la fotosíntesis y/o respiración. Además, los isótopos de O pueden variar debido a fenómenos físicos como la evaporación y la precipitación pluvial (Hamon y Merzeraud, 2007) pluvial. Valores ligeramente negativos de  $\delta^{13}C$  como los obtenidos en los carbonatos de la Cuenca de Wagner han sido observados en sedimentos de plataforma previamente y se atribuyen a una diagénesis temprana de los mismos bajo la influencia de fluidos sedimentarios pobres en  $^{13}C$  y  $^{18}O$  (Allan y Matthews, 1982; Immenhauser *et al.*, 2003; Hamon y Merzeraud, 2007).

Por otro lado, los valores muy negativos, encontrados en la Cuenca de Consag, indican un producto de la AOM (valores de -25 a -50 ‰, según Cavagna *et al.*, 1999). En la Figura 7.8 se muestran los valores obtenidos y además se muestran valores isotópicos de C y O para carbonatos de la localidad Palos Verdes (Formación Monterrey, Mioceno; Hein *et al.*, 2007). De acuerdo a este gráfico, los valores analizados indican que los carbonatos son producto de la AOM, acoplada con la reducción de sulfato del agua marina (produciéndose un enriquecimiento en el isótopo pesado de C y O; Hein *et al.*, 2007), lo que concuerda con el hallazgo de pirita framboidal.

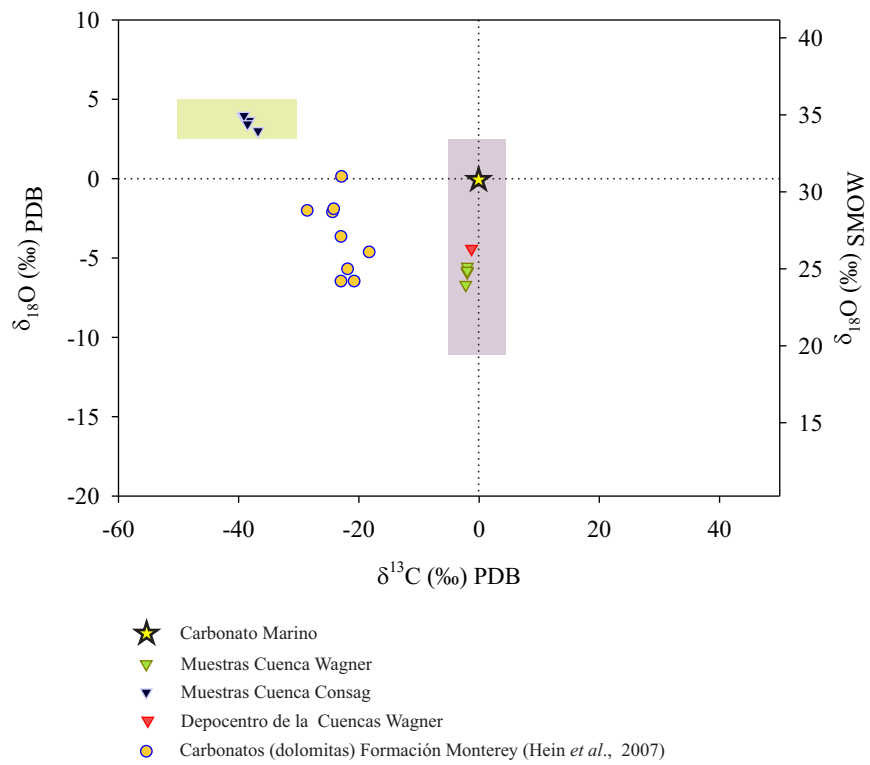


Figura 7.8. Gráfica de las relaciones entre  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  para carbonatos las cuencas Wagner y Consag. Además, se muestran los valores reportados para carbonatos marinos de la localidad Palos Verdes (Fm. Monterrey, Mioceno). Los valores típicos para calizas y mármoles se indican en el recuadro morado (Rollinson, 1993). El recuadro amarillo indica los valores para carbonatos que contienen carbón de origen metanotrófico (AOM).

### 7.3 Tierras raras

La baja solubilidad de los REE y, en consecuencia, su baja movilidad, evitan su fraccionamiento durante el intemperismo y la diagénesis; además, sus bajas concentraciones en el agua de mar y de río permiten inferir que los REE presentes en los sedimentos han sido transportados principalmente en la materia particulada, reflejando la química de su fuente de origen (Toyoda *et al.*, 1990; Ottonello, 1991; Rollinson, 1993; Dubinin, 2004).

Sin embargo, un intemperismo extremo puede afectar la composición de REE. Así, los REE pueden ser liberados durante la degradación de los minerales primarios y ser incorporados en los minerales secundarios, principalmente en las arcillas (Nesbitt *et al.*, 1990). La fracción de minerales pesados, por su contenido en zircón, monacita y allanita, también concentra los REE, pudiendo tener un efecto significativo pero errático en los patrones de REE por muestra (Cullers *et al.*, 1987; Rollinson, 1993).

El contenido de REE en las muestras de sedimentos de Wagner y Consag se halla por debajo de los valores de referencia (estándar NASC; Gromet *et al.*, 1984), estando claramente empobrecidos. Es importante mencionar que el análisis de factores, realizado sobre la composición de los sedimentos de Wagner y Consag, muestra dos componentes terrígenas importantes para describir la composición de los sedimentos marinos. El primero, caracterizado por minerales primarios como plagioclasa y el otro descrito por el K donde posiblemente se encuentren asociada el resto de las REE (Figura 7.3 y 7.4). Dado que los factores terrígenos son los más representativos, la concentración de REE estará principalmente definida por los minerales de este origen que encontramos en los sedimentos. Los minerales primarios mostrarán una concentración de REE relacionada con el material parental del cual proceden (Piper, 1974), mientras que los minerales secundarios incorporarán a su estructura REE durante su formación, de los minerales primarios degradados y otras fuentes alternas como el agua de mar o fluidos en zonas con actividad hidrotermal.

#### 7.3.1. Normalización de las tierras raras y anomalías de Ce y Eu

El patrón de los valores normalizados para los REE obtenido para los sedimentos de Wagner y Consag es muy similar al reportado para sedimentos del AGC por Shumilin *et al.* (2002) (Figura 7.9), sugiriendo una posible fuente común para los sedimentos. De acuerdo con la gráfica promedio no se observa ninguna anomalía en los diferentes REE; los valores normalizados a lutita norteamericana (estándar NASC; Gromet *et al.*, 1984) muestran un empobrecimiento en REE respecto a este estándar, la razón  $La_{norm}/Yb_{norm}$  mayor a 1 para la mayoría de muestras ( $1.51 \pm 0.30$ , Figura 6.23) señala un ligeramente enriquecimiento en los LREE, lo que es característico de los materiales estrechamente relacionados con la corteza, donde los LREE se presenten en con-

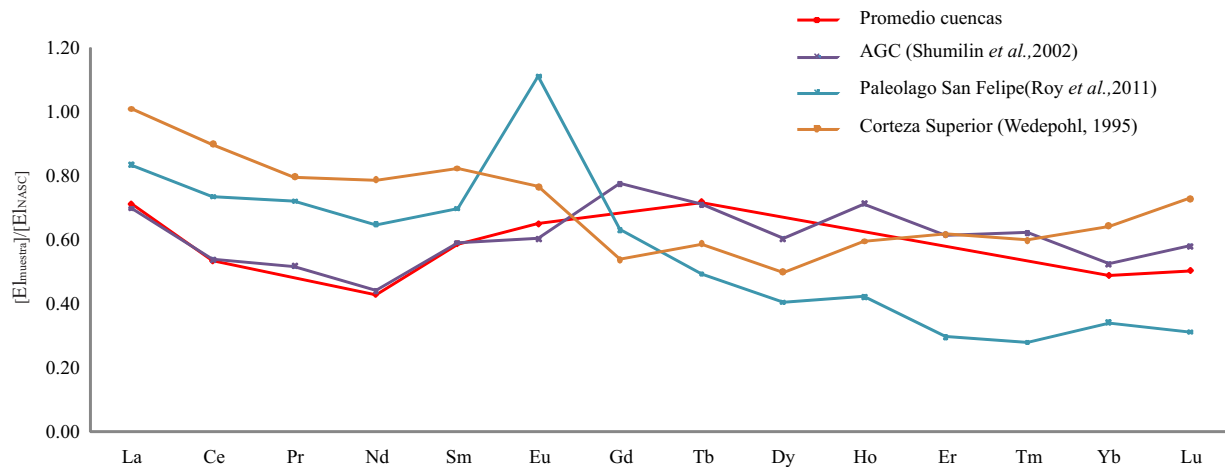


Figura 7.9. Patrones de tierras raras normalizadas a lutita norteamericana (NASC, Gromet *et al.*, 1984). Se observa una importante similitud entre los perfiles de las cuencas de Wagner y Consag y el del AGC, sugiriendo una posible fuente común para los sedimentos. Además se muestran los perfiles de la corteza superior promedio (Wedepohl, 1995) y del paleolago de San Felipe, (Roy *et al.*, 2011) a manera de comparación.

centraciones mayores en comparación con los HREE, puesto que los LREE son más abundantes en la corteza, mientras que los HREE lo son en el manto.

Las muestras de sedimento de las cuencas Wagner y Consag no presentan anomalías de Ce (Figura 6.21). El cálculo de la anomalía de Ce arrojó valores muy similares para la mayoría de muestras (0.84-0.93). Murray *et al.* (1990) mencionan que valores de la anomalía de Ce cercanos la unidad, como los obtenidos en las muestras de Wagner y Consag, son característicos de sedimentos de margen costero, ya que la constante entrada de material continental a elevadas tasas de sedimentación minimiza el tiempo de exposición de los mismos con el agua marina y, consecuentemente, el fraccionamiento del Ce. La presencia de carbonatos en las muestras de sedimento marino fue el factor que detonó el interés en el análisis de la anomalía de Ce, pues el identificar una anomalía positiva de Ce podría indicarnos una abundancia importante de restos calcáreos (p.e. foraminíferos); en el caso de las cuencas de Wagner y Consag, aunque se observó la presencia de carbonatos no se observa una anomalía de Ce, tal vez debido a las concentraciones de  $\text{CaCO}_3$  presentes en las muestras respecto al aporte terrígeno.

Por el contrario, algunas de las muestras estudiadas presentan una ligera anomalía positiva de Eu (0.90-1.30), habiéndose obtenido los valores más altos a 1 (máximo de 1.88) en los sedimentos de la Cuenca de Consag (Figura 6.22). La anomalía positiva de Eu puede deberse a la abundancia de plagioclasas, las cuales concentran dicho elemento durante los procesos magmáticos. La característica del Eu de cambiar su estado de oxidación de Eu (+3) a Eu (+2) le permite sustituir al Ca durante la cristalización de plagioclasas cálcicas, proceso que empobrece los magmas en este REE (Philpotts, 1970; Tlig y Steinberg, 1983). Este cambio de estado de oxidación sucede también en procesos metamórficos e hidrotermales (Dubinin, 2004). Frecuentemente empobreci-

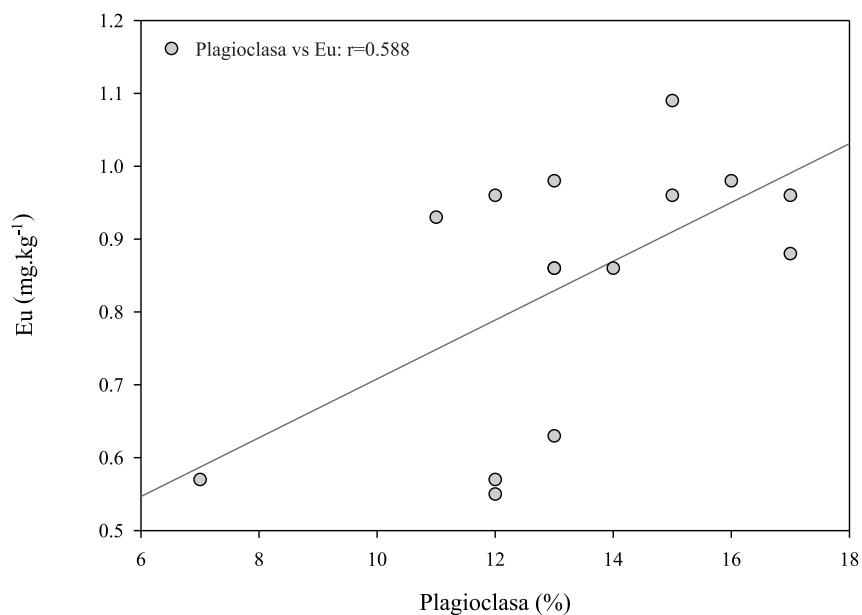


Figura 7.10. Gráfica de correlación de la Plagioclasa vs Eu para las muestras de sedimento del NGC.

mientos (anomalías negativas) o enriquecimientos (anomalías positivas) en europio pueden estar relacionados con el contenido de plagioclasa presente en la muestra de sedimento.

Aunque la determinación de plagioclasa fue semicuantitativa, como se muestra en la Figura 7.10, es posible observar, que existe cierta correlación ( $r: 0.588$ ) entre el contenido en plagioclasa y la concentración de Eu en los sedimentos, lo cual corrobora que este elemento posiblemente se encuentra asociado a esta fase mineral.

Es importante mencionar que la presencia de anomalías positivas de Eu muy fuertes ( $>3$ ) en ocasiones se atribuye a una fuente hidrotermal para dicho elemento, ya que el Eu es significativamente móvil en fluidos de elevada temperatura y condiciones reductoras (Canet *et al.*, 2004; Shumilin *et al.*, 2005). Por el contrario las anomalías negativas de Eu pueden señalar fluidos fríos y oxidantes (Parr, 1992). Para el caso de los sedimentos de las cuencas Wagner y Consag las anomalías de Eu observadas son débiles de manera que los patrones observados son debidos principalmente al contenido de plagioclasa, no es posible distinguir anomalías relacionadas con la liberación de fluidos observada en el área y por lo tanto determinar las condiciones redox del sistema utilizando esta herramienta.



## 8. Conclusiones

- La similitud en la composición elemental de los sedimentos superficiales de las cuencas de Wagner y Consag y la composición promedio de la corteza superior indica que los sedimentos estudiados son fruto, en gran parte, del aporte natural del Río Colorado y, en menor proporción, de otros ríos y del Desierto de Sonora.
- Mineralógicamente los sedimentos se caracterizan por su alto contenido en cuarzo y plagioclasas, y por contener cantidades menores de calcita y dolomita, además de otros minerales accesorios. Particularmente algunas estaciones de muestreo presentaron altas concentraciones de minerales autigénicos como barita (33-38 %) en asociación con pirita, en coherencia con un enriquecimiento en Ba y S observado en el análisis geoquímico. El Ba se transporta en fluidos reductores, con bajas concentraciones de sulfato, y puede precipitar como barita, cuando estos fluidos se mezclan con agua intersticial o agua marina, rica en sulfato.
- Las anomalías geoquímicas y mineralógicas de pirita (FeS) y barita (BaSO<sub>4</sub>) muestran una distribución espacial estrechamente asociada al trazado de la Falla Wagner, sugiriendo la liberación de fluidos reducidos a través de dicha estructura.
- La composición isotópica del azufre ( $\delta^{34}\text{S}_{CDT}$ , +38.6 a +44.8 ‰) en barita paragenéticamente asociada con pirita framboidal es evidencia de un proceso de reducción bacteriana de sulfato del agua de mar, acompañada por oxidación anaeróbica de metano (AOM por sus siglas en inglés), lo que causaría la precipitación de carbonatos. Esto es coherente con la composición isotópica de O ( $\delta^{18}\text{O}_{PDB}$ , 3.66 a 3.97 ‰) y C ( $\delta^{13}\text{C}_{PDB}$ , -39.11 a -39.27 ‰) de los carbonatos.
- El análisis estadístico de factores basado en la composición de los sedimentos marinos para las cuencas de Wagner y Consag, muestra la interacción entre una componente terrígena dominante, otra autigénica y una biogénica menor, representadas mineralógicamente por plagioclasas, arcillas y minerales pesados, barita y carbonato de calcio respectivamente.
- El análisis de elementos de las tierras raras no mostró anomalías significativas que evidenciaran la influencia de procesos hidrotermales. No se observaron anomalías de Ce y las débiles anomalías de Eu reflejan el contenido de plagioclasas de las muestras. El patrón normalizado de tierras raras es similar al reportado por otros autores para sedimentos de regiones aledañas al área de estudio, sugiriendo de esta manera una fuente común para los sedimentos de todo el Norte del Golfo de California.
- El análisis estadístico de cluster en su modo Q a partir de datos de geoquímica de los sedimentos muestra que en el área de estudio hay dos regiones geoquímicas diferenciadas:



(1) el este de la Cuenca Wagner (incluye las muestras enriquecidas en Ba) y los depocentros de ambas cuencas, y (2) el margen sureste de la Cuenca Consag. El primer grupo de caracterizó por mostrar la asociación de Ba y S, sin embargo ambos evidencian la influencia de los factores terrigeno I y II.

## 9. Referencias

- Aguilar Campos, C., 2007. *Sísmica de Reflexión en el Alto Golfo de California*. Tesis de Maestría CICESE, Ensenada, México. 82 p.
- Aguilar Campos, C., González Escobar, M., Martín-Barajas, A., 2008. *Geometría de la Cuenca Wagner, Golfo de California, a partir de sísmica de reflexión*. GEOS 28, 1-11.
- Allan, J.R., Matthews, R.K., 1982. *Isotope signatures associated with early meteoric diagenesis*. Sedimentology 29, 797-817.
- Allison, E.C., 1964. *Geology of the areas bordering the Gulf of California*, en: van Andel, T.J., Shor, G.G., (Eds.), Marine Geology of the Gulf of California: A symposium, AAPG., Mem. 3. pp. 3-29.
- Aloisi, G., Wallmann, K., Bollwerk, S.M., Derkachev, A., Bohrmann, G., Suess, E., 2004. *The effect of dissolved barium on biochemical processes at cold seeps*. Geochemica et Cosmochimica Acta 68, 1735-1748.
- Alt, J.C., 1995. *Subseafloor processes in mid-ocean ridge hydrothermal systems*, en: Humphris, S.E., Zierenberg, R.A., Mullineaux, L.S., Thomson, R.E., (Eds.), Seafloor hydrothermal systems. physical, chemical, biological, and geological Interactions. American Geophysical Union. pp. 85-114.
- Álvarez-Borrego, S., 2007. *Principios generales del ciclo del carbono en el océano*, en: Hernandez de la Torre, B., Gaxiola Castro, G., (Eds.), Carbono en ecosistemas acuáticos de México. SEMARNAT-CICESE. México. pp. 11-28.
- Álvarez-Borrego, S., Flores-Báez, B., Galindo-Bect, L., 1975. *Hidrología del Alto Golfo de California II. Condiciones durante invierno, primavera y verano*. Ciencias Marinas 2, 21-36.
- Alvarez-Borrego, S., y Gaxiola Castro, G., 1988. *Photosynthetic parameters of northern Gulf of California phytoplankton*. Continental Shelf Research 8, 37-47.
- Álvarez-Borrego, S. y Lara-Lara, J., 1991. *The physical environment and primary productivity of the Gulf of California*, en: Dauphin, J.P., Simoneit, B.R.T., (Eds.), The Gulf and Peninsular Province of the Californias. America Association of Petroleum Geologists Mem. vol 47, pp. 556-567.
- Álvarez-Borrego, S., Rivera, J.A., Gaxiola-Castro, G., Acosta-Ruiz, M.J., Schwartzlose, R.A., 1978. *Nutrientes en el Golfo de California*. Ciencias Marinas 5, 53-71.
- Álvarez, L.G., Jones, S.E., 2002. *Factors influencing suspended sediment flux in the Upper Gulf of California*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 54, 747-759.
- Álvarez, L.G., Suárez-Vidal, F., Mendoza-Borunda, R., González-Escobar, M., 2009. *Bathymetry and active geological structures in the Upper Gulf of California*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 61, 129-141.
- Andrews, E.D., 1991. *Sediment Transport in the Colorado River basin*, Colorado River Ecology and Dam Management. Proceedings of a Symposium. National Academic Press. Nuevo Mexico. pp. 54-74.
- Anónimo, 1992. *Monografía geológico-minera del estado de Sonora*, en: Cendejas-Cruz, F., Ramos-Cruz, S., Terán-Martínez, G.E., Macedo-Palencia, R., (Eds), Consejo de Recursos Minerales, México, 220 p.
- Anónimo, 1995. *Monografía Geológica-minera de Baja California*, en: Martín-Barajas, A., Delgado-Argote, L.A., (Eds) Secretaría de Desarrollo del Gobierno del Estado de Baja California, Mexicali, México, 112 p.
- Anónimo, 1999. *Monografía geológico-minera del estado de Baja California*, en: Islas-López, J., (Eds), Consejo de Recursos Minerales, México, 162 p.
- Anonymous, 2006. *GEOTRACES. An International Study of Marine Biogeochemical Cycles of Trace Elements and Their Isotopes*. Science Plan, International Council for Science, SCOR (Scientific Committee on Oceanographic Research), Plymouth, Reino Unido, 79 p.
- Antúnez Argüelles, M., 2010. *Estudio del procedimiento analítico para el análisis de estroncio isotópico en minerales sulfatados*. Tesis de licenciatura UNAM. México D.F., México. 50 p.
- Baba, J., Peterson, C.D., Schrader, H.J., 1991a. *Moder Fine-grained sediments in the Gulf of California*, en: Dauphin, J.P., Simoneit, B.R.T., (Eds.), The Gulf and Peninsular Province of the Californias. America Association of Petroleum Geologists Mem. vol 47, pp. 589-602.
- Baba, J., Peterson, C.D., Schrader, H.J., 1991b. *Fine-grained terrigenous Sediment Supply and dispersal in the Gulf of California during the last Century*, en: Dauphin, J.P., Simoneit, B.R.T., (Eds.), The Gulf and Peninsular Province of the Californias. America Association of Petroleum Geologists Mem. vol 47, pp. 589-602.

- Barron, J.A., Bukry, D., Bischoff, J.L., 2004. *High resolution paleoceanography of the Guaymas Basin, Gulf of California, during the Past 15 000 years*. Marine Micropaleontology 50, 185-207.
- Barron, J.A., Bukry, D., Dean, W.E., 2005. *Paleoceanography history of the Guaymas Basin, Gulf of California, during the past 15, 000 years based on diatoms, silicoflagellates, and biogenic sediments*. Marine Micropaleontology 56, 81-102.
- Best, M.G., 1982. *Igneous and Metamorphic Petrology*. Freeman and Company. Estados Unidos. 729 p.
- Bigioggero, B., Chiesa, S., Zanchi, A., Montrasio, A., Vezzoli, L., 1995. *The Cerro Mencenares volcanic center, Baja California Sur: Source and tectonic control on postsubduction magmatism within the Gulf Rift*. Geol. Soc. Am. Bull. 107, 1108-1122.
- Birosta, M.E., 2008. *Mostreig i anàlisi mineralògica de llocs pelàgics a les conques de Wagner i de Consag (Golf de Califòrnia Nord, Mèxic)*. Tesis de Licenciatura UB. Barcelona, España. 39 p.
- Böning, P., Brumsack, H.J., Böttcher, M.E., Schnetger, B., Kriete, C., Kallmeyer, J., Borchers, S.L., 2004. *Geochemistry of Peruvian near-surface sediments*. Geochimica et Cosmochimica Acta 68, 4429-4451.
- Bray, N.A., 1988. *Water Mass Formation in the Gulf of California*. Journal of Geophysical Research 93, 9223-9240.
- Bruland, K.W., Lohan, M.C., 2004. *The control of trace metals in seawater*, en: Elderfield, H., (Eds.), *The Oceans and Marine Geochemistry*, in *Treatise on Geochemistry*. pp. 23-46.
- Brumsack, H.J., 1989. *Geochemistry of recent TOC-rich sediments from the Gulf of California and the Black Sea*. Geologische Rundschau 78, 851-882.
- Burdige, D.J., 2006. *Geochemistry of Marine Sediments*. Princeton University Press. Estados Unidos de America. 609 p.
- Camacho-Ibar, V.F., Aveytua-Alcázar, L., Carriquiry, J.D., 2003. *Fatty acid reactivities in sediment cores from the northern Gulf of California*. Organic Geochemistry 34, 425-439.
- Canet, C., Alfonso, P., Melgarejo, J.C., Belyatsky, B. V., 2004. *Geochemical evidences of sedimentary-exhalative origen of the shale-hosted PDE-AG-AU-An-Cu occurrences of the Prades Mountains (Catalonia, Spain): trace-elements abundances and Sm-Nd isotopes*. Journal of Geochemical Exploration 82, 17-33.
- Canet, C., Prol-Ledesma, R.M., Escobar-Briones, E., Mortera-Gutiérrez, C., Lozano-Santa Cruz, R., Linares, C., Cienfuegos, E., Morales-Puente, P., 2006. *Mineralogical and geochemical characterization of hydrocarbon seep sediments from the Gulf of Mexico*. Marine and Petroleum Geology 23, 605-619.
- Canet, C., Prol-Ledesma, R.M., 2007. *Mineralizing processes at shallow submarine hydrothermal vents*, en: Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F. (Eds.), *Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México*. Geological Society of America Special Paper 422, pp. 359-376.
- Canet, C., Prol-Ledesma, R.M., Bandy, W.L., Schaaf, P., Linares, C., Camprubí, A., Tauler, E., Mortera-Gutiérrez, C., 2008. *Mineralogical and geochemical constraints on the origin of ferromanganese crusts from the Rivera Plate (western margin of Mexico)*. Marine Geology 251, 47-59.
- Canet, C., Prol-Ledesma, R.M., Dando, P.R., Vazquez-Figueroa, V., Shumilin, E., Birosta, E., Sanchez, A., Robinson, C.J., Camprubí, A., Tauler-Tauler, E., 2010. *Discovery of massive seafloor gas seepage along the Wagner fault, Northern Gulf of California*. Sedimentary Geology 228, 292-303.
- Canet, C., Prol-Ledesma, R.M., 2010. *Infiltración y escape de fluidos sedimentarios en el fondo marino: estructuras y procesos de mineralización*. Revista de la Sociedad Española de mineralogía 12, 04-09.
- Carriquiry, J.D., Sanchez, A., 1999. *Sedimentation in the Colorado River delta and upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss*. Mar. Geol. 158, 125-145.
- Carriquiry, J.D., Sánchez, A., Camacho-Ibar, V.F., 2001. *Sedimentation in the northern Gulf of California after cessation of the Colorado River discharge*. Sedimentary Geology 144, 37-62 pp.
- Carriquiry J.D., Villaescusa, J.A., Camacho-Ibar, V., Daesslé, L.W., Castro-Castro, P.G., 2009. *The effects of damming on the materials flux in the Colorado River Delta*. Environ Earth Sci. DOI 10.1007/s12665-010-0626-z
- Cavagna, S., Clari, P., Martire, L., 1999. *The role of bacteria in the formation of cold seep carbonates: geological evidence from "Montferrato" (Tertiary, NW Italy)*. Sedimentary Geology 126, 253-270.
- Chen-Feng, Y., Gieskes, J.M., 2001. *Hydrothermal alteration of hemi-pelagic sediments: experimental evaluation of geochemical processes in shallow subduction zones*. Applied Geochemistry 16, 1055-1066.
- Chester, R., 2003. *Marine geochemistry*. Blackwell Science. London. 506 p.

- Choumiline K., 2009. *Aplicación de métodos estadísticos multivariados en la determinación de las fuentes de aportes de sedimentos. Estudio del caso de la Laguna de la Paz, B.C.S., México*. Tesis de Licenciatura UABCS. La Paz, México. 64 p.
- Claypool, G.E., Holser, W.T., Kaplan, I.R., Sakai, H., Zak, I., 1980. *The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation*. Chemical Geology 28, 199-260.
- Cullers, R.L., Barrett, T., Carlson, R., Roninson, B., 1987. *Rare-earth element and mineralogic changes in holocene soil and stream sediment: A case study in the Wet Mountains, Colorado, U.S.A.* Chemical Geology 63, 275-297.
- Daesslé, L.W., Ramos, S.E., Carriquiry, J.D., Camacho-Ibar, V.F., 2002. *Clay dispersal and the geochemistry of manganese in the Northern Gulf of California*. Continental Shelf Research 22, 1311-1323.
- Daesslé, L.W., Camacho-Ibar V.F., Carriquiry, J.D., Ortiz-Hernández, M.C., 2004. *The geochemistry and source of metals and phosphorus in the recent sediments from the Northern Gulf of California*. Continental Shelf Research 24, 2093-2106.
- Dean, W.E., 2006. *The geochemical record of the last 17,000 years in the Guaymas Basin, Gulf of California*. Chemical Geology 232, 87-98.
- Delgadillo-Hinojosa, F., Segovia-Zavala, J.A., Huerta-Díaz, M.A., Atilano-Silva, H., 2006. *Influence of geochemical and physical processes on the vertical distribution of manganese in the Gulf of California water*. Deep Sea Research Part I: Oceanography Research Papers 53, 1301-1319.
- Demina, L.L., Galkin, S.V., Shumilin, E., 2009. *Bioaccumulation of some trace elements in the biota of hydrothermal fields of the Guaymas Basin (Gulf of California)*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 61, 31-45.
- Dominguez Rosas, A., 2008. *Distribución vertical y temporal de níquel y cadmio en el Golfo de California*. Tesis de Maestría IIO-UABC. Ensenada, México. 97 p.
- Douglas, R., Gonzalez-Yajimovich, O., Ledesma-Vazquez, J., Staines-Urias, F., 2007. *Climate forcing, primary production and the distribution of Holocene biogenic sediments in the Gulf of California*. Quaternary Science Reviews 26, 115-129.
- Dubinín, A.V., 2004. *Geochemistry of rare earth elements in the ocean*. Lithology and Mineral Resources 39, 289-307.
- Folk, R.L., 1954. *The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary rock nomenclature*. Journal of Geology 62, 344-359.
- Folk, R.L., 1974. *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publishing Company. Texas. 105 p.
- Förstner, U. y Wittmann, G., 1979. *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Springer-Verlag. Berlin - New York. 486 p.
- García-Villalobos, F.J. y Escobar-Briones, E., 2007. *Distribución espacial de carbono Orgánico total en el sedimento superficial de la planicie abisal del Golfo de México*, en: Hernandez de la Torre, B., Gaxiola Castro, G., (Eds.), Carbono en ecosistemas acuáticos de México. SEMARNAT-CICESE. pp. 117-128.
- Fütterer, D., 1999. *The solid phase of marine sediments*, en: Shulz, H.D., Zabel, M. (Eds), Marine geochemistry. Springer Science. pp. 1-25.
- Gibbs, R., 1977. *Transport phases of transition metals in the Amazon and Yukon Rivers*. Geol. Soc. Am. Bull. 88, 829-843.
- Giesemann, A., Jäger, H.J., Norman, A.L., Krouse, H.R., Brand, W.A., 1994. *On-line sulfur-isotope determination using an elemental analyzer coupled to a mass spectrometer*. Anal. Chem. 66, 2816-2819.
- Gieskes, J., Shaw, T., Brown, T., Sturz, A., Campbell, A., 1991. *Interstitial Water and Hydrothermal Water Chemistry, Guaymas Basin, Gulf of California*, en: Dauphin, J.P., Simoneit, B.R.T., (Eds.), The Gulf and Peninsular Province of the Californias. America Association of Petroleum Geologists Mem. vol 47, pp. 753-779.
- Goldberg, E., 1954. *Marine geochemistry 1. Chemical scavengers of the sea*. J. Geol 62, 249-265.
- Grim, R.E., Dietz, R.S., Bradley, W.F., 1949. *Clay mineral composition of some sediments from the Pacific Ocean off the California coast and the Gulf of California*. Geol. Soc. Am. Bull. 60, 1785-1808.
- Gromet, L.P., Dymek, R.F., Haskin, L.A., Korotev, R. L., 1984. *The "North American shale composite": Its compilation, major and trace element characteristics*. Geochimica et Cosmochimica Acta 48, 2469-2482.
- Hair, J., Anderson, R., Tatham, R., Black, W., 2010. *Análisis Multivariante*. 5a ed. Prentice Hall. España. 799 p.

- Hamon, Y., Merzeraud, G., 2007. *C and O isotope stratigraphy in shallow-marine carbonate: a tool for sequence stratigraphy (example from the Lodève region. Peritethian Domain)*. Journal Geoscience 100, 71-84.
- Harris, D., 2007. *Análisis químico cuantitativo*. 3a edición. Reverte. España. 744 p.
- Hein, J.R., Zierenberg, R.A., Maynard, J.B., Hannington, M.D., 2007. *Barite-forming environments along a rifted continental margin, Southern California Borderland*. Deep-Sea Research II 54, 1327-1349.
- Hernandez Pérez, J.A., 2008. *Estructura y Estratigrafía en las cuencas de Wagner y Consag, Golfo de California, a partir de sísmica de reflexión*. Tesis de Maestría CICESE. Ensenada, México. 100 p.
- Hurlbut C.S., Klein, C., 1974. *Manual de mineralogía de Dana*. Reverte. Barcelona. 564 p.
- Immenhauser, A., Della Porta, G., Kenter, J.A.M., Bahamonde, J.R., 2003. *An alternative model for positive shifts in shallow-marine carbonate  $\delta^{13}C$  and  $\delta^{18}O$* . Sedimentology 50, 953-959.
- Kastner, M., Claypool, G., Robertson, G., 2008. *Geochemical constraints on the origin of the pore fluids and gas hydrate distribution at Atwater Valley and Keathley Canyon, northern Gulf of México*. Marine and Petroleum Geology 25, 860-872.
- Keith, E.C., Suess, E., 1970. *Calcium carbonate saturation in seawater: effects of dissolved organic matter*. Limnology and Oceanography 15, 633-637.
- Kiba, T., Tagaki, T., Yoshimura, Y., Kishi, T.II., 1955. *Strong phosphoric acid, A new reagent for the determination of sulfate by reduction to hydrogen sulfide*. Bull. Chem. Soc. Jpn. 28, 641-644.
- Krauskopf, K., 1956. *Factors controlling the concentrations of thirteen rare metals in sea-water*. Geochemica et cosmochimica Acta 9, 1-32.
- Lanza-Espino, G., Soto, L.A., 1999. *Sedimentary geochemistry of hidrothermal vents in Guaymas Basin, Gulf of California, México*. Applied Geochemistry 14, 499-510.
- Lavín, M., Durazo, R., Palacios, E., Argote, L., Carrillo, L., 1997. *Lagrangian observations of the circulation in the northern Gulf of California*. Journal of Physical Oceanography 27, 2298-2305.
- Lavín, M.F., Beier, E., Badan, A., 1997b. *Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: escalas estacional y interanual*, en: Lavín, M.F. (Eds.), Contribuciones a la oceanografía física en México. Unión geofísica Mexicana. pp. 141-171.
- Lavín, M.F., Godínez, V.M., y Álvarez, L.G., 1998. *Inverse-estuarine features of Upper Gulf of California*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 47, 769-795.
- Lavín, M.F., Organista, S., 1988. *Surface heat flux in the Northern Gulf of California*. Journal of Geophysical Research 93, 14033-14038.
- Leal Acosta, M.L., 2008. *Caracterización geoquímica de los sedimentos del sistema lagunar Ohuira-Topolobambo-Santa María*. Tesis de Maestría CIIDIR-IPN. Guasave, México. 91 p.
- Libes, S. M., 1992. *An Introduction Marine Biogeochemistry*. John Wiley & Sons, Inc. Estados Unidos, 734 p.
- Listzin, A.P. 1996. *Oceanic Sedimentation*. Lithology and geochemistry. AGU American Geophysical Union. Estados Unidos. 400 p.
- Lonsdale, P., 1989. *Geology and tectonic history of the Gulf of California*, en: Winterer, D., Hussong, M. y Decker, R.W. (Eds.), The eastern Pacific and Hawaii, Geological Society of America, Boulder, Co., The Geology of North America. pp. 499-521.
- Marinone, S.G., 2003. *A three-dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California*. Journal of Geophysical Research 108, (23-1) -(23-27).
- Martín-Barajas, A., 2000. *Volcanismo y extensión en la Provincia Extensional del Golfo de California*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 53, 72-83.
- McCrea, J.M., 1950. *On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale*. J. Chem. Phys. 18, 849-857.
- McLaren P. y Bowles D. 1985. *The effects of Sediment Transporto on Grain-Size Distributions*. Journal of Sedimentary Petrology 54, 457-470.
- Mercado, S., 1990. *Manifestaciones Hidrotermales marinas de alta temperatura (350°C) localizada a 21°N a 2600 m de profundidad en la Elevación Este del Pacifico*. Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía 6,225-263.
- Mora-Klepeis, G., McDowell, F., 2004. *Late Miocene calc-alkalic volcanism in northwestern México: an expression of rift or subduction-related magmatism?* Journal of South American Earth Sciences 17, 29-310.
- Morán-Zenteno D.J. 1984. *Geology of the Mexican Republic*. American Association of Petroleum

- Murray, R.W., Buchholtz ten Brink, M.R., Jones, D.L., Gerlach, D.C., Price Russ, G., 1990. *Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale*. *Geology* 3, 268-271.
- Morse, J., 2003. *Formation and diagenesis of carbonate sediments*, en: Mackenzie, F., (Eds.), *Sediments, diagenesis, and sedimentary rocks*, in *Treatise on Geochemistry*. pp. 67-85.
- Nesbitt, H.W., MacRae, N.D., Kronberg, B.I., 1990. *Amazon deep-sea fan muds: light REE enriched product of extreme chemical weathering*. *Earth Planet. Sci. Lett* 100, 118-123.
- Ohmoto, H., 1986. *Stable isotope geochemistry of ore deposits*, en: Valley, J.E., Taylor, H.P.Jr., O'Neil, R., (Eds), *Stable isotopes in high temperature geological processes*. *Mineral Soc Am Rev Mineral* 16,491-560.
- Otero, X.L., Huerta-Diaz, M.A., Macías, F., 2003. *Influence of a turbidite deposit on the extent of pyritization of iron, manganese and trace metals in sediments from the Guaymas Basin, Gulf of California (México)*. *Applied Geochemistry* 18, 1149-1163.
- Ottoneo, G., 1991. *Principles of geochemistry*. Columbia University Press. Estados Unidos. 894 p.
- Palmer, M.R., Edmond, J.M., 1989. *The strontium isotope budget of the modern ocean*. *Earth and Planetary Science Letters* 92, 11-26.
- Parr, J.M., 1992. *Rare-earth element distribution in exhalites associated with Broken Hill-type mineralisation at the Pinnacles deposits, New South Wales, Australia*. *Chemical Geology* 100, 73-91.
- Pares-Sierra, A., Mascarenhas A., Marinone, S. G., Castro, R., 2003. *Temporal and spatial variation of the surface winds in the Gulf of California*. *Geophysical Research Letters* 30, (45-1)-(45-4).
- Paytan, A., Mearon, S., Cobb, K., Kastner, M., 2002. *Origin of marine barite deposits: Sr and S isotope characterization*. *Geology* 30, 747-750.
- Pegau, S. W., Boss, E., Martinez, A., 2002. *Ocean color observations of eddies during the summer in the Gulf of California*. *Geophysical Research Letters* 29, (9-1)-(9-3).
- Perez-Cruz, G.A., 1982. *Algunos resultados de la investigación geológico-geofísica en la porción noroccidental del Golfo de México*. *Bol. Asoc. Mex. Geol. Petr.* 34, 71-77.
- Persaud, P., Stock, J., Steckler, M., Martin-Barajas, A., Diebold, J., Gonzalez-Fernandez, A., Mountain, G., 2003. *Active deformation and shallow structure of the Wagner, Consag and Delfin Basins, Northern Gulf of California, México*. *Journal of Geophysical Research* 108, 2355-2377.
- Philpotts, J.A., 1970. *Redox estimation from a calculations of Eu<sup>2+</sup> and Eu<sup>3+</sup> concentración in natural phases*. *Earth and Planetary Science Letters* 9, 257-268.
- Piper, D.Z., 1974. *Rare earth elements in the sedimentary cycle: a summary*. *Chemical Geology* 14, 285-304.
- Prol-Ledesma, R.M., Canet, C., Villanueva-Estrada, R.E., Ortega-Osorio, A., 2010. *Morphology of pyrite in particulate matter from shallow submarine hydrothermal vents*. *American Mineralogist* 95, 1500-1507.
- Rama Murthy, V., Beiser, E., 1968. *Strontium isotopes in ocean water and marine sediments*.
- Riley, J.P. y Chester, R. 1989. *Introduction to marine chemistry*. Academic Press. Reino Unido. 459p.
- Rodríguez Castañeda, P., 2008. *Variación de flujos de los elementos particulados en Cuenca Alfonso, Bahía de la Paz, en el periodo 2002-2005*. Tesis de Doctorado CICIMAR-IPN. La Paz, México. 199 p.
- Rodríguez Figueroa, G., 2004. *Geoquímica de los oligoelementos, elementos mayores y elementos de las tierras raras, en los sedimentos marinos del distrito minero de Santa Rosalía, B.C.S., México*. Tesis de Maestría. CICIMAR-IPN. La Paz, México. 137 p.
- Rodríguez-Meza, G.D., Shumilin, E., Sapozhnikov, D., Méndez-Rodríguez, L., Acosta-Vargas, B., 2009. *Evaluación geoquímica de los elementos mayoritarios y oligoelementos en los sedimentos de Bahía Concepción (B.C.S., México)*. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 6, 57-72.
- Rollinson, H., 1993. *Using Geochemical Data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Scientific & Technical. Singapore. 352 p.
- Roy, P.D., Caballero, M., Lozano, M., Morton, O., Lozano, R., Jonathan, M., Sánchez, J., Macias, M., 2011. *Provenance of sediments deposited at paleo-lake San Felipe, Western Sonora Desert: implications to regimes of winter and summer rainfall during last 50 cal Kyr BP*. *Journal of Arid Environments*, (en revision).
- Rusnak, G.A., Fisher, R.L., Shepard, F.P., 1964. *Bathymetry and Faults of Gulf of California*, en: van Andel, T.J., Shor, G.G. (Eds.), *Marine Geology of the Gulf of California: A symposium*, AAPG., Mem. 3, pp. 59-75.
- Salomons, W., Förstner, U., 1984. *Metals in the Hydrocycle*. Springer-Verlag Berlín. Alemania. 349 p.
- Schlesinger, W.H. 1991. *Biogeochemistry: An analysis of global change*. Academic Press, San Diego. 443 p.

- Schneider, R., Horst, S., Schulz, D., Hensen, C., 1999. *Marine carbonates: their formation and destruction*, en: Schulz, H.D., Zabel, M. (Eds), *Marine geochemistry*. Springer Science. Alemania. pp. 311-337.
- Schnetger, B., Brumsack, H.J., Schale, H., Hinrichs, J., Dittert, L., 2000. *Geochemical characteristics of deep-sea sediments from the Arabian Sea: a high-resolution study*. *Deep-Sea Research II* 47, 2735-2768.
- Seiter, K., Hensen, C., Schröter, J., Matthiaz Zabel., 2004. *Organic carbon content in surface sediments defining regional province*. *Deep Sea Research I*, 2001-2026.
- Shumilin, E.N., Rodríguez-Figueroa, G, Morton-Bermea, O, Lounejeva Baturina, E, Hernández, E y Rodríguez Meza, G.D. 2000. *Anomalous trace elements composition of coastal sediments near the cooper mining district of Santa Rosalía, Peninsula of Baja California, México*. *Bull. Environ. Contam. Toxicol* 65, 261-268.
- Shumilin, E., Carriquiry, J.D., Camacho-Ibar, V.F., Sapozhnikov, D., Kalmykov, S., Sanchez, A., Aguiñiga-García, S., Sapozhnikov, Y.A., 2002. *Spatial and vertical distribution of elements in sediments of the Colorado River delta and Upper Gulf of California*. *Marine Chemistry* 79, 113-131.
- Shumilin, E., Rodríguez-Figueroa, G y Sapozhnikov, D., 2005. *Lanthanide Contamination and Strong Positive Europium Anomalies in the Surface Sediments of the Santa Rosalía Copper Mining Region, Baja California Peninsula, Mexico*. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 75, 308-315.
- Taylor, S. and S. McLennan. 1985. *The continental crust: its composition and evolution: An examination the geochemical records preserved in sedimentary rocks*. Blackwell Scientific Publication. Reino Unido. 312 pp.
- Tlig S., Steinberg M., 1982. *Distribution of rare earth elements (REE) in size fractions of recent sediments of Indian Ocean*. *Chem Geology* 37, 317-333.
- Torres, M., Bohrmann, G., Dube, T., Poole, F., 2003. *Formation of modern and Paleozoic stratiform barite at cold methane seeps on continental margins*. *Geological Society of America* 31, 897-900.
- Torres-Orozco, E. 1993. *Análisis volumétrico de las masas de agua en el golfo de California*. Tesis de maestría CICESE. Ensenada, México. 92 p.
- Toyoda, K., Nakumara, Y., Masuda, A., 1990. *Rare earth elements of pelagic sediments*. *Geochemica et Cosmochimica Acta.* 54, 1093-1103.
- van Andel, T.H., 1964. *Recent marine sediments of the Gulf of California*, en: van Andel, T.J., Shor, G.G. (Eds.), *Marine Geology of the Gulf of California: A symposium*, AAPG Mem. vol 3, pp. 216-310.
- Vazquez-Figueroa V., Canet C., Prol-Ledesma R.M., Sánchez A., Dando P., Camprubí A., Robinson C.J., Hiriart Le Bert G., 2009. *Batimetría y características hidrográficas (Mayo 2007) en las Cuencas de Consag y Wagner, Norte del Golfo de California, México*. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 61, 119-127.
- Vernadsky, V., 2007. *The Biosphere*, en: Salisbury, F. (Eds), *Geochemistry and the biosphere: essays by Vladimiri Vernadsky*. pp. 225- 405.
- Villanueva-Estrada, R., Antúnez-Argüelles, M., Villanueva-González, P., Solís-Pichardo, G., Prol-Ledesma, R., Canet, C., Armienta-Hernández, 2001. *A review of ionic exchange, dissolution and complexation methods for barium sulfate and their applications Estrontium isotope studies*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, (en revisión).
- Vinogradov, A., 1962. *Average contents of chemical elements in the principal types of igneous rocks of the Earth's crust*. *Geokhimiya* 7, pp. 641-664.
- Von Damm, K.L., Edmond, J.M., Measures, C.I., Grant, B., 1985a. *Chemistry of submarine hydrothermal solutions at Guaymas Basin, Gulf of California*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49, 2221-2237.
- Von Damm, K.L., Edmond, J.M., Grant, B., Measures, C.I., 1985b. *Chemistry of submarine hydrothermal solutions at 21°N, East Pacific Rise*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49, 2197-2220.
- Weber, A., Jørgensen, B.B., 2002. *Bacterial sulfate reduction in hydrothermal sediments of the Guaymas Basin, Gulf of California, México*. *Deep-Sea Research I* 49, 827-841.
- Wedepohl, K., 1995. *The composition of the continental crust*. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59, 1217-1232.
- Zabel, M., Dahmke, A., Schulz H.D., 1998. *Regional distribution of diffusive phosphate and silicate fluxes through the sediment-water interface: the eastern South Atlantic*. *Deep-Sea Research I* 45, 277- 300.

## Anexos

### A.Tablas

Tabla A1. Parámetros texturales de los sedimentos superficiales recolectados en las cuencas de Wagner y Consag.

Muestra	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Promedio ( $\phi$ )	Sorteamiento ( $\theta$ )	Tipo
WAG E-9	0.0	28.4	71.6	10.65	1.84	Arcilla
WAG E-8	0.0	60.9	39.1	8.67	1.35	Fango
WAG E-7	0.0	62.6	37.4	8.56	1.37	Fango
WAG E-6	0.0	69.1	30.9	8.33	1.44	Limo Fino
WAG E-5	0.0	69.6	30.4	8.33	1.39	Limo Fino
WAG 31	0.0	27.7	72.3	10.22	1.53	Arcilla
WAG 31B	0.3	91.3	8.5	6.50	1.69	Limo Grueso
WAG 31D	0.0	67.9	32.1	8.41	1.39	Limo Fino
WAG 31E	3.0	88.3	8.8	6.41	1.79	Limo Medio
WAG 31C	0.0	59.1	40.9	8.76	1.28	Fango
WAG 31A	0.0	60.1	39.9	8.73	1.37	Fango
WAG E-3	0.0	62.0	38.0	8.74	1.25	Fango
WAG 18A	0.0	73.3	26.7	8.01	1.58	Limo Fino
WAG 18B	0.0	63.2	36.8	8.56	1.46	Fango
WAG E-2	0.0	57.0	43.0	8.86	1.24	Fango
WAG 18	0.0	61.9	38.1	8.64	1.35	Fango
WAG E-1	0.0	59.1	40.9	8.72	1.37	Fango
WAG E-11	0.0	46.9	53.1	9.74	1.90	Fango
WAG E-12	-	-	-	-	-	-
WAG 30	0.0	57.6	42.4	8.79	1.36	Fango
WAG 1A	0.0	20.9	79.1	10.38	1.55	Arcilla
WAG II	0.0	66.1	33.9	8.45	1.42	Fango
WAG 24	0.0	25.9	74.1	10.34	1.67	Arcilla
WAG 26	0.0	61.3	38.7	8.73	1.25	Fango
WAG 21	-	-	-	-	-	-
WAG 21A	0.0	33.7	66.3	10.24	1.71	Fango
WAG 33C	73.2	19.4	7.4	3.71	2.71	Arena muy fina y limos finos
WAG 15	0.0	22.6	77.4	10.71	1.74	Arcilla
WAG 5	0.0	69.6	30.4	8.33	1.39	Limo Fino
WAG 34	0.0	63.4	36.6	8.55	1.39	Fango
WAG 10	-	-	-	-	-	-



Tabla A2. Valores mínimo, máximo, promedio y desviación estándar de la concentración de los elementos mayores y traza en las cuencas Wagner y Consag.

Elemento	$\frac{min-max}{promedio \pm DE}$	Corteza Continental <sup>1</sup>
Al (%)	$\frac{2.96-6.29}{4.9 \pm 0.7}$	7.74
As(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{1.3-2.7}{2.1 \pm 0.3}$	2
Ba(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{306-62051}{5530 \pm 14820}$	668
Bi(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{0.02-0.18}{0.08 \pm 0.04}$	0.123
Ca (%)	$\frac{1.17-4.76}{3 \pm 1}$	2.95
Co(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{3-11}{8 \pm 2}$	11.6
Cr(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{1.2-57.5}{34 \pm 11}$	35
Cs(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{0.54-10.4}{3 \pm 2}$	5.8
Cu(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{2.03-17.9}{10 \pm 3.8}$	14.3
Fe (%)	$\frac{0.55-2.70}{1.8 \pm 0.5}$	3.09
Hf(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{1.7-6.94}{5 \pm 1}$	5.8
K (%)	$\frac{1.50-2.15}{2 \pm 0.2}$	2.87
Mg (%)	$\frac{0.39-2.07}{1.4 \pm 0.4}$	1.35
Mn(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{65-291}{180 \pm 50}$	527
Mo(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{0.19-1.56}{0.4 \pm 0.3}$	1.4
Na (%)	$\frac{1.12-2.73}{2 \pm 0.4}$	2.57
Ni(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{5-27.9}{17 \pm 5}$	18.6
P(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{290-1400}{800 \pm 160}$	665
Pb(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{9.03-19.19}{14 \pm 2}$	17
Rb(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{52.42-96.25}{80 \pm 10}$	110
S(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{1110-7050}{2990 \pm 1150}$	953
Sb(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{0.01-1.63}{0.7 \pm 0.4}$	0.31
Sc(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{2.1-10.72}{7 \pm 2}$	7
Si (%)	$\frac{23.23-39.44}{30 \pm 4}$	30.35
Sn(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{0.07-0.68}{0.4 \pm 0.1}$	2.5
Sr(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{171.74-2129.9}{380 \pm 480}$	316
Ta(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{0.06-1.23}{0.4 \pm 0.3}$	1.5
Te(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{0.04-0.3}{0.1 \pm 0.05}$	0.005
Th(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{2.72-11.26}{7 \pm 2}$	10.3
Ti (mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{870.1-3192.6}{2650 \pm 620}$	3117
Tl(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{0.12-0.87}{0.3 \pm 0.2}$	0.75
U(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{0.4-5.4}{2.0 \pm 0.1}$	2.5
V(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{16.96-80.35}{50 \pm 20}$	53
Y(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{10.43-22.75}{20 \pm 3}$	20.7
Zn(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{13.9-84.5}{52.5 \pm 15.6}$	52
Zr(mg·kg <sup>-1</sup> )	$\frac{123-249.08}{200 \pm 40}$	237

<sup>1</sup> Wedephol (1995)

Tabla A3. Análisis de outliers en los elementos mayores.

Elemento	Outlier Inferior	Outliers Superior	Promedio $\pm$ DE <sup>1</sup>
	Estación: concentración (%)	Estación: concentración (%)	
Si	WAG 34: 23.86	WAG 33C: 39.29	29.9 $\pm$ 16.6
	WAG 15: 23.23	WAG 21: 39.44	
	WAG 5: 24.16	WAG 21A: 39.39	
Al	WAG 21: 2.96	WAG 15: 6.29	5 $\pm$ 0.4
	WAG 21A:3.04	WAG 31: 6.07	
	WAG 33C: 3.36		
Fe	WAG 21: 0.65	WAG 15: 27.00	1.9 $\pm$ 0.2
	WAG 21A: 0.58	WAG 5: 24.52	
	WAG 33C: 0.55	WAG 34: 25.51	
Mg	WAG 21: 0.41	WAG 15: 2.07	1.4 $\pm$ 1.8
	WAG 21A:0.39	WAG 34: 1.96	
	WAG 33C:0.39		
K	WAG 21: 1.52		2.0 $\pm$ 0.08
	WAGB21A: 1.55	-	
	WAGB33C: 1.50		
Ca	-	-	3 $\pm$ 1
Na	-	-	1.99 $\pm$ 0.42

<sup>1</sup> Promedio calculado sin los valores outliers

Tabla A4. Análisis de outliers en los elementos menores.

Elemento	Outlier Inferior Estación: concentración (mg·kg <sup>-1</sup> )	Outliers Superior Estación: concentración (mg·kg <sup>-1</sup> )	Promedio ± DE <sup>1</sup> (mg·kg <sup>-1</sup> )
Ti	WAG 33C: 870.14 WAG 21: 1060.10 WAG 21 A: 943.68	-	2833.4 ± 261.5
Rb	WAG 33C: 52.42 WAG 21: 53.37 WAG 21A: 55.27	-	81.4 ± 6.1
Y	WAG 33C: 10.43 WAG 21: 11.38 WAG 21A: 12.32	-	20.4 ± 1.3
As	WAG 24:1.40 WAG E-9:1.30	-	2.2 ± 0.3
P	WAG 33C: 290.00	WAG 21A: 1400.00 WAG 18B: 1040.00	797.6 ± 66.7
Mn	WAG 33C: 65.00 WAG E-3: 98.00 WAG 21: 82.00 WAG 21A: 75.00	WAG 34: 284.00 WAG 5: 291.00	182.1 ± 29.2
V	WAG 33C: 16.96 WAG 21: 18.02 WAG 21A: 16.96	WAG 15: 80:35	55.7 ± 10.3
Zn	WAG 33C: 13.90 WAG 21: 16.50 WAG 21A: 16.10	WAG 34:79.60 WAG 15: 84.54	54.5 ± 7.3
Cr	WAG 33C: 9.33 WAG 21: 10.10 WAG 21A : 1.18	WAG 15:57.58	36.6 ± 5.6
Ni	WAG 33C : 5.00 WAG 21: 5.50 WAG 21A: 6.20	WAG 24: 25.00 WAG 5: 26.80 WAG II: 24.80 WAG 34: 27.90	16.9 ± 1.9
Cu	WAG 33C: 2.05 WAG 21: 2.03 WAG 21A: 2.81	WAG 34: 17.90 WAG 15: 17.48 WAG 5: 16.60	10 ± 2
Co	WAG 33C: 3.00 WAG 21: 3.00 WAG 21A : 3.00	WAG 34: 11.00 WAG 5: 11.00	7.8 ± 1.1
Th	WAG 33C: 3.69 WAG 21: 3.31 WAG 21A: 2.72	WAG 15: 11.26	7.6 ± 0.9

*continúa...*

<sup>1</sup> Promedio calculado sin los valores outliers

Análisis de outliers en los elementos menores (*continuación*).

Elemento	Outlier Inferior Estación: concentración (mg·kg <sup>-1</sup> )	Outliers Superior Estación: concentración (mg·kg <sup>-1</sup> )	Promedio ± DE <sup>1</sup> (mg·kg <sup>-1</sup> )
Hf	WAG 33C: 2.33 WAG 21A: 1.70	WAG 31E: 6.94	4.8 ± 0.7
Sn	WAG 33C: 0.07 WAG 21: 0.08 WAG 21A: 0.08	WAG 34: 0.68	0.44 ± 0.07
S	WAG 21: 1110.00 WAG 21A: 1480.00 WAG 33C: 1120.00	WAG E-7: 7050.00 WAG E-3: 5970.00 WAG E-2: 4180.00	2870.4 ± 480.5
Sc	WAG E-12: 5.12 WAG 21: 2.11 WAG 21A: 2.10 WAG 33C: 2.21	WAG 15: 10.72 WAG 5: 8.99 WAG 34: 9.17	7.2 ± 0.8
Cs	WAG 21: 0.54 WAG 21A: 0.64 WAG 33C: 0.57	WAG 15: 10.40 WAG 31D: 8.35 WAG 31B: 5.82	2.2 ± 0.3
Bi	WAG 21: 0.02 WAG 21A: 0.02 WAG 33C: 0.02	WAG E-3: 0.18 WAG 5: 0.14 WAG 34: 0.16	0.07 ± 0.01
Ba	-	WAG E-7: 15699.00 WAG E-3: 62051.00 WAG E-2: 57850.00 WAG E-11: 5523.00	1128.1 ± 1054.9
Sr	-	WAG E-7: 827.11 WAG 31D: 432.31 WAG E-3: 2127.97 WAG E-2: 2129.95 WAG E-11: 410.59	221.7 ± 36.4
Mo	-	WAG 21A: 0.79 WAG E-3: 1.56	0.4 ± 0.2
Tl	-	WAG 31C: 0.51 WAG 31A: 0.39 WAG 31B: 0.72 WAG 3D: 0.87	0.2 ± 0.04
Pb	-	WAG 15: 19.98	13.4 ± 1.7
U	-	WAG II: 5.38	1.9 ± 0.8
Ta	-	WAG 18A: 1.23 WAG 5: 1.01	0.3 ± 0.2
Te	-	WAG E-3: 0.24 WAG E-25: 0.30	0.1 ± 0.03
Sb	-	-	0.67 ± 0.43
Zr	-	-	200 ± 40

<sup>1</sup> Promedio calculado sin los valores outliers

Tabla A5. Valores promedio de los FE y desviación estándar para los elementos analizados en los sedimentos de las cuencas Wagner y Consag y su clasificación..

Elemento	promedio FE $\pm$ DE	Clasificación
Al	$0.7 \pm 0.2$	Diluido
As	$1.3 \pm 0.8$	Conservativo
Ba	$8.8 \pm 23.0$	Enriquecido
Bi	$0.6 \pm 0.2$	Diluido
Ca	$1.1 \pm 0.3$	Conservativo
Co	$0.7 \pm 0.1$	Diluido
Cr	$1 \pm 0.2$	Conservativo
Cs	$0.4 \pm 0.2$	Diluido
Cu	$0.7 \pm 0.1$	Diluido
Fe	$0.6 \pm 0.04$	Diluido
Hf	$0.9 \pm 0.5$	Diluido
K	$0.8 \pm 0.3$	Diluido
Mg	$1.0 \pm 0.8$	Conservativo
Mn	$0.4 \pm 0.08$	Diluido
Mo	$0.4 \pm 0.5$	Diluido
Na	$0.9 \pm 0.3$	Diluido
Ni	$1 \pm 0.2$	Diluido
P	$1.5 \pm 1.0$	Conservativo
Pb	$0.9 \pm 0.3$	Diluido
Rb	$0.8 \pm 0.3$	Diluido
S	$3.4 \pm 1.2$	Enriquecido
Sb	$2.3 \pm 1.3$	Enriquecido
Sc	-	-
Si	$1.3 \pm 1$	Conservativo
Sn	$0.2 \pm 0.04$	Diluido
Sr	$1.3 \pm 1.6$	Conservativo
Ta	$0.3 \pm 0.2$	Diluido
Te	$28.2 \pm 10.5$	Enriquecido
Th	$0.8 \pm 0.1$	Diluido
Ti	$0.9 \pm 0.1$	Diluido
Tl	$0.4 \pm 0.2$	Diluido
U	$0.9 \pm 0.5$	Diluido
V	$1 \pm 0.2$	Conservativo
Y	$1 \pm 0.1$	Conservativo
Zn	$1 \pm 0.1$	Conservativo
Zr	$1 \pm 0.4$	Diluido

Tabla A6. Valores mínimo, máximo, promedio y desviación estándar (DE) de la concentración de REE en las cuencas Wagner y Consag.

Elemento	$\frac{min-max}{promedio \pm DE}$	Lutita Norteamericana <sup>1</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )	Corteza Superior <sup>2</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )
La	$\frac{10.2-28.5}{22.8 \pm 4.7}$	32	32.3
Ce	$\frac{17.8-50}{39.0 \pm 8.0}$	73	65.7
Pr	-	7.9	6.3
Nd	$\frac{3.99-19.3}{14.2 \pm 3.4}$	33	26
Sm	$\frac{1.5-4.4}{3.4 \pm 0.7}$	5.7	4.7
Eu	$\frac{0.4-1.22}{0.8 \pm 0.2}$	1.24	0.95
Gd	-	5.2	2.8
Tb	$\frac{0.23-0.71}{0.6 \pm 0.1}$	0.85	0.5
Dy	-	5.8	2.9
Ho	-	1.04	0.62
Er	-	3.4	2.1
Tm	-	0.5	0.3
Yb	$\frac{0.44-2.58}{1.5 \pm 0.4}$	3.1	2
Lu	$\frac{0.07-0.35}{0.2 \pm 0.7}$	0.48	0.35

<sup>1</sup> Taylor y McLennan (1985)

<sup>2</sup> Wedephol (1995)

Tabla A7. Análisis de outliers en los elementos de las tierras raras.

Elemento	Outlier Inferior Estación: concentración (mg.kg <sup>-1</sup> )	Outliers Superior Estación: concentración (mg.kg <sup>-1</sup> )	Promedio $\pm$ DE <sup>1</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> )
Ce	WAG 15: 19.90	-	41.3 $\pm$ 5.1
	WAG 5: 17.80		
	WAG 34: 20.80		
La	WAG 21: 12.10	-	24.0 $\pm$ 3.0
	WAG 21A: 10.20		
	WAG 33C: 12.50		
Sm	WAG 21: 1.54	-	3.6 $\pm$ 0.5
	WAGB21A: 1.53		
	WAG 33C: 1.66		
Nd	WAG 26: 10.20	WAG 15: 19.28	15.2 $\pm$ 1.8
	WAG 21: 3.99		
	WAG 21A: 6.78		
	WAG 33C: 7.04		
Yb	WAG 21a: 0.44	WAG II: 2.58	1.6 $\pm$ 0.3
	WAG 33C: 0.61		
Tb	WAG E-12: 0.49	WAG 15: 0.82	0.7 $\pm$ 0.05
	WAG 26: 0.48		
	WAG 21: 0.28		
	WAG 21A: 0.23		
	WAG 33C: 0.27		
Lu	WAG 33C: 0.09	-	0.3 $\pm$ 0.06
	WAG 21A: 0.06		
Eu	-	-	0.8 $\pm$ 0.2

<sup>1</sup> Promedio calculado sin los valores outliers

Tabla A8. Valores mínimo, máximo, promedios y desviación estándar del contenido de lantánidos en sedimentos superficiales de las cuencas de Wagner y Consag, y valores de la corteza superior normalizados con la lutita norteamericana (Taylor y McLennan, 1985).

Elemento	Promedio $\pm$ DE	Corteza Superior
La	$0.7 \pm 0.2$	1.01
Ce	$0.5 \pm 0.1$	0.90
Pr	-	0.80
Nd	$0.4 \pm 0.1$	0.79
Sm	$0.6 \pm 0.1$	0.82
Eu	$0.7 \pm 0.1$	0.77
Gd	-	0.54
Tb	$0.7 \pm 0.2$	0.59
Dy	-	0.50
Ho	-	0.60
Er	-	0.62
Tm	-	0.60
Yb	$0.5 \pm 0.1$	0.65
Lu	$0.5 \pm 0.1$	0.73

Tabla A9. Valores mínimo, máximo, promedio y desviación estándar para las anomalías de Ce, Eu y razón  $La_{norm}/Yb_{norm}$  para los sedimentos superficiales de las cuencas de Wagner y Consag del NGC y la corteza superior calculados de los datos de Wedepohl (1995).

$Ce_{anom}$	$Ce_{anom}$ (corteza superior)	$Eu_{anom}$	$Eu_{anom}$ (corteza superior)	$\frac{La_{anom}}{Yb_{anom}}$	$\frac{La_{anom}}{Yb_{anom}}$ (corteza superior)
$0.84-0.93$ $0.87 \pm 0.02$	0.96	$0.51-1.88$ $1.14 \pm 0.32$	0.92	$0.94-2.25$ $1.51 \pm 0.30$	1.56