



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MATERIALES INSTITUTO DE
CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

*“Estudio electroquímico de la movilidad de elementos potencialmente
tóxicos (EPT´s) presentes en suelos contaminados con residuos mineros
de Zimapán”*

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN CIENCIAS DE MATERIALES

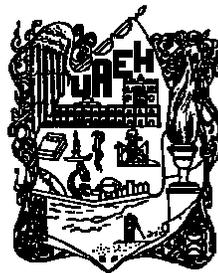
PRESENTA:

FAMARI VALDEZ DE JESÚS

ASESOR: DR. VÍCTOR ESTEBAN REYES CRUZ



Agradecimiento al Proyecto Fondo Mixto HGO-2003-CO1-.9166. Por la infraestructura proporcionada para realizar este trabajo de investigación.



A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, al Instituto de Ciencia
Básicas e Ingeniería y a la Licenciatura en Ingeniería en Ciencia de
Materiales, por la oportunidad que me brindo en mi formación
profesional.



ÍNDICE

RESUMEN	III
NOMENCLATURA	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.	V
ÍNDICE DE TABLAS.	IX
INTRODUCCIÓN.	1
Hipótesis	2
Objetivo General.	2
Objetivos Particulares.	2
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.	4
1.1. Importancia de la Industria Minera en México.	4
CAPÍTULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.	16
2.1. Estrategia experimental.	16
2.2. Parte experimental.	17
2.2.1 Electrodo de pasta de carbono.	17
2.3 Estudios voltamperométricos.	18
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	20
3.1. Estudio voltamperométrico de los EPT's presentes en los suelos del distrito minero de Zimapán del muestreo exploratorio.	20
3.1.1 Estudios Voltamperométricos de inversión Anódica de los Perfiles 3 y 4.	20
3.1.1.1 Perfil 3.	20
3.1.1.2 Perfil 4.	25
3.1.2 Estudios Voltamperométricos de 6 Perfiles del muestreo exploratorio.	28
3.1.3 Estudio de la relación de [Pb] / [As].	50
3.2. Estudio voltamperométrico de los EPT's presentes en los suelos del distrito minero de Zimapán del muestreo sistemático.	52



CONCLUSIONES GENERALES.	58
GLOSARIO	60
REFERENCIAS.	63



RESUMEN

La minería es una de las actividades económicas de mayor tradición, basta recordar que ha tenido un peso importante en el desarrollo de la economía del país. Sin embargo, la explotación, exploración y beneficios de metales base y preciosos conlleva a un problema de actualidad, la acumulación de residuos mineros (jales), que al estar expuestos a ciertas condiciones ambientales afecta a los ecosistemas, desde el subsuelo hasta la atmósfera. En el Distrito Minero de Zimapán, los residuos mineros provenientes de la explotación y beneficio de los metales están expuestos a la intemperie lo que favorece su erosión y provoca la dispersión de elementos potencialmente tóxicos (EPT's) hacia suelos no contaminados. El proceso de electroremediación puede ser una alternativa viable para la solución de la problemática ambiental que generan los residuos mineros. Sin embargo, antes de implementar la remediación de suelos es necesario contar con información de la movilidad de los EPT's en los suelos de Zimapán. Es por ello que en este trabajo se utilizan las técnicas electroquímicas con electrodos de pasta de carbono (EPC), para determinar la movilidad de los EPT's.

Los resultados voltamperométricos de 6 suelos provenientes de un muestreo exploratorio mostraron que es posible determinar la movilidad de los EPT's al concentrar éstos en la interface de los EPC. Este estudio permite también determinar las interacciones entre los principales EPT's de los suelos de Zimapán (Pb y As). De igual manera, la comparación de las respuestas voltamperométricas del estudio de la reactividad en suelos, y de sulfuros minerales de alta pureza, que antecede a este trabajo, Canales C. [1] permite determinar que la cerusita (PbCO_3) es la especie que se encuentra bioaccesible en los suelos del distrito minero de Zimapán.

Finalmente, los resultados voltamperométricos de 12 perfiles provenientes de un muestreo sistemático indican la viabilidad de utilizar la técnica de electrodos de pasta de carbono para determinar la presencia de especies bioaccesibles como el Pb, en horizontes superficiales del distrito minero de Zimapán y poder generar mapas de dispersión de EPT's de forma eficiente y económica.



NOMENCLATURA

ABREVIATURA	DESCRIPCIÓN	
ABA	Conteo de Ácido- base	
ACP	Análisis Estadístico de Componentes Principales	
CPE	Electrodos de Pasta de Carbono	
DAR	Drenaje Ácido de Roca	
DRX	Difracción de Rayos X	
EPT's	Elementos Potencialmente Tóxicos	
H	Horizonte	
MEB	Microscopía Electrónica de Barrido	
P	Perfil	
ppm	partes por millón	
MC	Malla Cerrada	
SHE	Electrodo Estándar de Hidrogeno	
SSE	Electrodo de referencia de sulfatos	
PbS	Galena	
PbCO ₃	Cerusita	
FeS ₂	Pirita	
FeS	Pirrotita	
ZnS	Esfalerita	
FeAsS	Arsenopirita	
(Cu,Ag,Zn,Cd) ₃ (Sb,As)S ₃	Tetrahedrita- tentativa	
SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
E	Potencial eléctrico	(volts.)
j	Densidad de corriente	(mAcm ⁻²)



INDICE DE FIGURAS

1.1	Concentraciones totales de arsénico, plomo y cadmio, en los jales de (Santa María, San Miguel y el Monte). Moreno y col 2007 [11].	5
1.2	Imagen de los 6 perfiles de suelo por horizonte, del muestreo exploratorio en el área de estudio	7
1.3	Análisis de textura de muestras de suelo arena a arena limosa	8
1.4	Mapas de dispersión de EPT's	11
2.1	Preparación de electrodos de pasta de carbono. (EPC)	17
2.2	Arreglo experimental celda electroquímica de tres electrodos	18
2.3	Equipo PAR 263A	19
3.1	Voltamperogramas obtenidos sobre EPC, del Perfil 3 Horizonte 1A y 1B, en un medio lixivante ($V = 20 \text{ mV s}^{-1}$). El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de $0.815 \text{ V} < E < 2.015 \text{ V}$, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4 V .*	22
3.2	Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del Perfil 3 Horizonte 2 y 3, en un medio lixivante ($V = 20 \text{ mV s}^{-1}$). * Bajo las mismas condiciones	23
3.3	Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del Perfil 3 Horizonte 4 y 5 en un medio lixivante ($V = 20 \text{ mV s}^{-1}$). *Bajo las mismas condiciones	24



3.4	Voltamperogramas obtenidos sobre CPE del Perfil 4 Horizonte 1 y 2 en un medio lixivante ($V = 20 \text{ mV s}^{-1}$). *Bajo las mismas condiciones	26
3.5	Voltamperogramas obtenidos sobre del Perfil 4 Horizonte 3 en un medio lixivante ($V = 20 \text{ mV s}^{-1}$). *Bajo las mismas condiciones	27
3.6	Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del Perfil 1 Horizonte A, (a) en un medio lixivante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . *Bajo las mismas condiciones	32
3.7	Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del Perfil 1 Horizonte 1B (a) en un medio lixivante y (b) en un medio en 0.1M de NaNO_3 , a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . *Bajo las mismas condiciones	33
3.8	Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del Perfil 2 Horizonte 1 (a) en un medio lixivante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . *Bajo las mismas condiciones	34
3.9	Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del Perfil 2 Horizonte 2(a) en un medio lixivante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . *Bajo las mismas condiciones	35
3.10	Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del Perfil 3 Horizonte 1A (a) en un medio lixivante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . *Bajo las mismas condiciones	36



- 3.11** Voltamperogramas obtenidos sobre ECP del Perfil 3 Horizonte 1B (a) en un medio lixivante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 , a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . *Bajo las mismas condiciones 37
- 3.12** Voltamperogramas obtenidos sobre EPC -Suelos 20:80% en peso del Perfil 3 Horizonte 2 (a) en un medio lixivante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . *Bajo las mismas condiciones 38
- 3.13** Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del Perfil 3 Horizonte 3 (a) en un medio lixivante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . *Bajo las mismas condiciones 39
- 3.14** Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del Perfil 3 Horizonte 4 (a) en un medio lixivante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . *Bajo las mismas condiciones 40
- 3.15** Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del Perfil 3 Horizonte 5 (a) en un medio lixivante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . *Bajo las mismas condiciones 41
- 3.16** Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del Perfil 4 Horizonte 1 (a) en un medio lixivante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . *Bajo las mismas condiciones 42
- 3.17** Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del Perfil 4 Horizonte 2 (a) en un medio lixivante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . *Bajo las mismas condiciones 43



- 3.18** Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del Perfil 4 Horizonte 3 (a) en un medio lixivante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . *Bajo las mismas condiciones 44
- 3.19** Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del Perfil 5 Horizonte 1(a) en un medio lixivante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . *Bajo las mismas condiciones 45
- 3.20** Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del Perfil 5 Horizonte 2 (a) en un medio lixivante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . *Bajo las mismas condiciones 46
- 3.21** Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del Perfil 5 Horizonte 3(a) en un medio lixivante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . *Bajo las mismas condiciones 47
- 3.22** Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del Perfil 6 Horizonte 1(a) en un medio lixivante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . *Bajo las mismas condiciones 48
- 3.23** Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del Perfil 6 Horizonte 2 (a) en un medio lixivante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . Bajo las mismas condiciones 49
- 3.24** Relación $[\text{Pb}] / [\text{As}]$ vs densidad de corriente del pico de disolución de Pb proveniente de la lixiviación de la galena contenida en los suelos de Zimapán. 50



3.25 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del Perfil MC-2, MC-6, MC-14 en un medio lixivante a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . *Bajo las mismas condiciones	54
3.26 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC de los Perfiles MC-16, MC-17, y MC-21, en un medio lixivante a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . *Bajo las mismas condiciones	55
3.27 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC de los Perfiles MC-22, MC-26, y MC-31 en un medio lixivante a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . * Bajo las mismas condiciones	56
3.28 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC de los Perfiles MC-38, MC-39 y MC-43, en un medio lixivante a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . *Bajo las mismas condiciones	57

ÍNDICE DE TABLAS

1.1 Análisis químico de 6 perfiles de suelos contaminados del Distrito Minero de Zimapán (Jiménez, 2005).	9
--	---



INTRODUCCIÓN

Las actividades mineras en el distrito de Zimapán, sobre todo durante el siglo XX, con la introducción de la flotación como proceso de beneficio y concentración de valores, favoreció la disposición (no controlada) en superficie de residuos mineros (jales y terreros). La exposición de los depósitos de residuos mineros abandonados a condiciones de intemperie ha favorecido su erosión e intemperismo, provocando la dispersión de partículas con metales y metaloides hacia suelos, así como la movilidad química (disolución y transporte en medio acuoso) de elementos potencialmente tóxicos (EPT's) Ahlberg. E. [2], principalmente como: As, Cd, Pb, Sb, Hg, Zn, Cu y Fe. Es por ello de vital importancia la remediación de los suelos del distrito minero de Zimapán para evitar los altos riesgos ecológicos y en la salud de la comunidad expuesta, provocados por jales históricos.

Sin embargo, antes de proponer alternativas de la disminución de los EPT's en suelos contaminados del Distrito Minero de Zimapán se requiere el estudio de la movilidad de éstos con el fin de determinar los procesos de oxidación y reducción que presentan los minerales puros provenientes de los jales en los suelos; así como las interacciones que estén presentes en estos minerales.

Las técnicas electroquímicas en la última década han sido utilizadas para el estudio de la reactividad de sulfuros metálicos en electrodos sólidos y de pasta de carbono (EPC) Urbano G. [3]. Sin embargo, este arreglo electroquímico tiene más que ofrecer en la caracterización, reactividad y la movilización de sulfuros minerales. Es por ello que en este trabajo se utiliza dicho arreglo electroquímico para determinar la movilidad de los EPT's presentes en los suelos de Zimapán. Así como para determinar si los principales EPT's se encuentran bioaccesibles en los suelos de Zimapán.



De esta manera se plantea la siguiente hipótesis del trabajo:

Hipótesis

El arreglo electroquímico con electrodos de pasta de carbono (EPC) permite determinar la movilidad de los EPT's; así como si se encuentran bioaccesibles en los suelos contaminados del Distrito Minero de Zimapán, Hgo.

Para comprobar la hipótesis planteada se proponen los siguientes objetivos:

Objetivo General

Demostrar que es posible efectuar la determinación la movilidad de EPT's en suelos del Distrito Minero de Zimapán, Hgo.; utilizando electrodos de pasta de carbono en un arreglo electroquímico típico de tres electrodos. Así como, determinar si los EPT's se encuentran bioaccesibles a la población expuesta.

Objetivos Particulares

- Demostrar que es posible obtener respuestas voltamperométricas de procesos oxido-reducción de EPT's que están presentes en bajas y altas concentraciones en suelos contaminados de suelos de Zimapan en un medio lixivante.
- Demostrar que se puede caracterizar electroquímicamente la movilidad de los EPT's presentes en suelos contaminados por jales históricos del distrito minero de Zimapan
- Analizar las respuestas voltamperométricas para determinar las interacciones entre los EPT's que afecten la movilidad de estos en los suelos de Zimapán.



- Determinar la presencia de los principales EPT's en los suelos superficiales del distrito minero de Zimapán que se encuentran bioaccesibles a la población expuesta.

Con el fin de generar el marco teórico adecuado y situar la atención del lector se presentan:

- a) Los antecedentes de la contaminación generada por EPT's provenientes de jales. Además, la descripción de las investigaciones realizadas sobre algunos estudios referentes a sulfuros minerales puros con electrodos de pasta de carbono (Capítulo I).
- b) En este trabajo se presenta la metodología experimental utilizada para llevar a cabo la caracterización electroquímica de la movilidad de los EPT's. Dicha estrategia está basada en voltamperometrias cíclicas y cronoamperometrías a potencial de inversión controlado (Capítulo II), tal como lo estableció el estudio que antecede a este trabajo Canales C. [1].
- c) Los resultados de la movilidad de los EPT's presentes en suelos contaminados del Distrito Minero de Zimapán fueron analizados con fundamento en la caracterización de minerales de alta pureza, la cual ha sido previamente realizada por Urbano G. [3] y con los estudios de reactividad de los suelos de Zimapán (Capítulo III).
- d) Finalmente, se presentan las conclusiones generales obtenidas a partir de los resultados experimentales.



CAPITULO 1 ANTECEDENTES

1.1. Importancia de la Industria Minera en México

En México la minería es una de las actividades económicas de mayor tradición, ya que la industria minera indiscutiblemente ha tenido un peso importante en el desarrollo de la economía del país. Basta recordar que México es mundialmente reconocido como el tercer productor de plata (aportando el 4% de la producción mundial en 2008) [4]. Sin embargo, la explotación, exploración y beneficios de metales base y preciosos (cobre, plomo, zinc, plata, oro, platino, entre otros) conlleva a un problema de actualidad; la acumulación de residuos mineros (jales) que se ha producido por más de cinco siglos Moreno T.R. [5].

Al estar expuestos a ciertas condiciones ambientales, los residuos mineros tienden a Descomponerse (oxidarse) de manera natural bajo condiciones de humedad y en presencia de oxígeno, reaccionando por vía química y/o biológica para formar un lixivante de metales y drenaje ácido de roca (DAR), a una velocidad mayor de lo que puede ser neutralizado por cualquier compuesto alcalino contenido en el residuo. Marcus J [6]. La oxidación natural de los sulfuros metálicos tales como pirita (FeS_2), pirrotita (FeS), esfalerita (ZnS), arsenopirita (FeAsS), galena (PbS), etc., contenidos en los residuos mineros es la principal fuente de la generación de iones sulfato, metales pesados (Pb , Zn , Cu , Cd , Hg) y metales de transición (As , Sb , Se , Bi) en solución. Sin embargo otros factores como el estado superficial y las interacciones entre sulfuros, no pueden ser descartados.

Es por ello que la industria minero metalúrgica es globalmente considerada como una de las principales fuentes de metales tóxicos que contaminan al medio ambiente, afectando a los ecosistemas desde el subsuelo hasta la atmósfera, incluyendo suelos y cuerpos de agua superficiales y subsuperficiales, Nriagu J. [7]. Algunas localidades en las que se encuentran los mayores índices de contaminación por residuos mineros



son la Comarca Lagunera, el área de Zimapán, Hgo; así como algunas poblaciones de los estados de Chihuahua, Sonora, San Luis Potosí, Guanajuato y Baja California.

En el caso particular del Distrito Minero de Zimapán se explotó y benefició por más de 400 años una mineralización polimetálica de los cuales destacan Pb, Zn, Cu, Ag y Au, procedentes de un sistema mineralizado tipo skarn. Los yacimientos polimetálicos tipo skarn además de contener a los citados metales de valor económico, contienen cadmio y arsénico como principales impurezas químicas, donde el cadmio se encuentra principalmente dentro de la esfalerita (ZnS), mientras que el arsénico en forma de arsenopirita (FeAs) Moreno y col [5].

Estudios recientes realizados por Moreno y col [5]. en jales históricos del Distrito Minero de Zimapán identificaron concentraciones totales de arsénico (**As**) y las concentraciones de plomo (**Pb**) y cadmio (**Cd**), por su efecto tóxico. En los jales conocidos como Santa María, San Miguel y el Monte. (Figura 1.1).

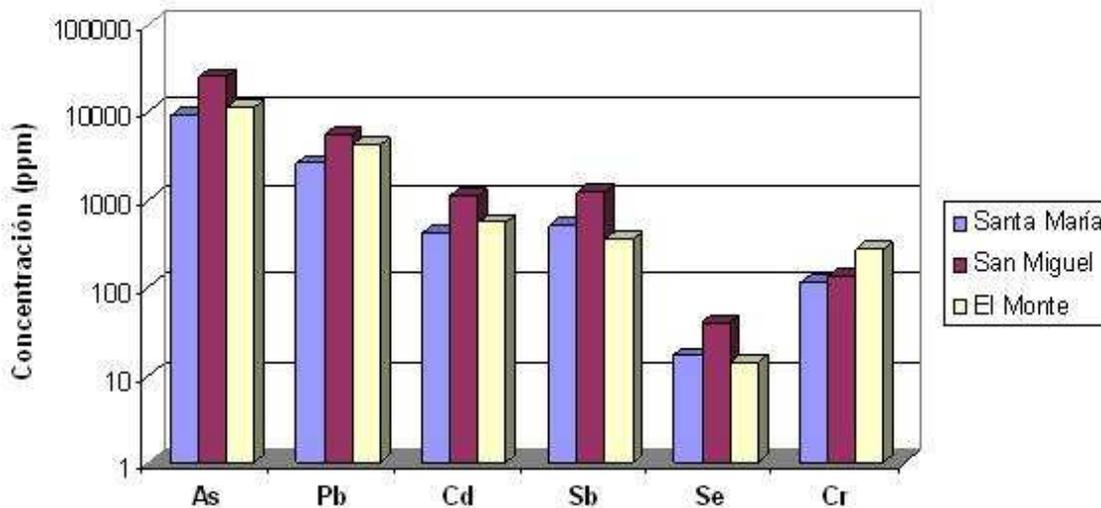


Figura 1.1. Concentraciones totales de arsénico, plomo y cadmio, (jales de Santa María, San Miguel y el Monte). Moreno y col [5].



Además el estudio de análisis estadístico de componentes principales (ACP, por sus siglas en inglés) permitió determinar las siguientes asociaciones geoquímicas en el Distrito Minero de Zimapán: Zn-Pb, atribuida a la asociación textural entre galena (PbS) y esfalerita (ZnS); As-Sb-Ag-Cd, atribuida a la asociación mineralógica de las sulfosales minerales, tipo tetrahedrita-tennatita $(Cu,Ag,Zn,Cd)_3(Sb,As)S_3$.

El Fe presenta una baja asociación geoquímica con cualquier otro elemento metálico, lo que se atribuye a su gran variedad mineralógica, presente mayoritariamente como pirita FeS_2 , pirrotita FeS y magnetita Fe_3O_4 , pero también presente en otros sulfuros (esfalerita y calcopirita), así como en minerales secundarios. Moreno y col [5].

Estos resultados indican que los jales del distrito minero de Zimapán generan los metales pesados Pb, Zn, Cu, Cd, Fe y los metales de transición As y Sb en solución. Por otra parte, los estudios de pruebas estáticas de predicción de drenaje ácido de roca (DAR) por el método acid-base-accounting (ABA conteo de ácido base) realizados por Moreno [5] mostraron que los jales históricos de Zimapán, son potenciales generadores de drenajes ácidos a pesar de su alto contenido de carbonatos de calcio.

Algunos de los elementos químicos como el plomo, mercurio, cadmio, níquel, vanadio, cromo, cobre, aluminio, arsénico o plata, etc., que se encuentran distribuidos en determinadas concentraciones en el medio ambiente, tales como aire, agua y suelo, pueden ser considerados como sustancias tóxicas si se encuentran en concentraciones que puedan manifestar o provocar un daño a los seres vivos, Knox A. S. [8]. Para fines de este estudio, estos elementos se han denominado "*elementos potencialmente tóxicos*" (EPT's), los cuales se pueden definir como aquellos elementos que pueden provocar efectos dañinos a la salud debido a una acumulación en la cadena trófica y/o exposición directa a medios contaminados, incluso estando en concentraciones muy pequeñas. Echarri P. L. [9].



En estudios recientes del distrito minero de Zimapán se realizó un muestreo exploratorio para determinar el impacto de los jales en los suelos ubicados en cuencas donde se desarrolló principalmente la actividad minera histórica y se depositaron los residuos tipo jales. En este estudio se tomaron 28 muestras de suelo por horizonte a través de 6 perfiles de suelo (figura 1.2). Jiménez I. [10]

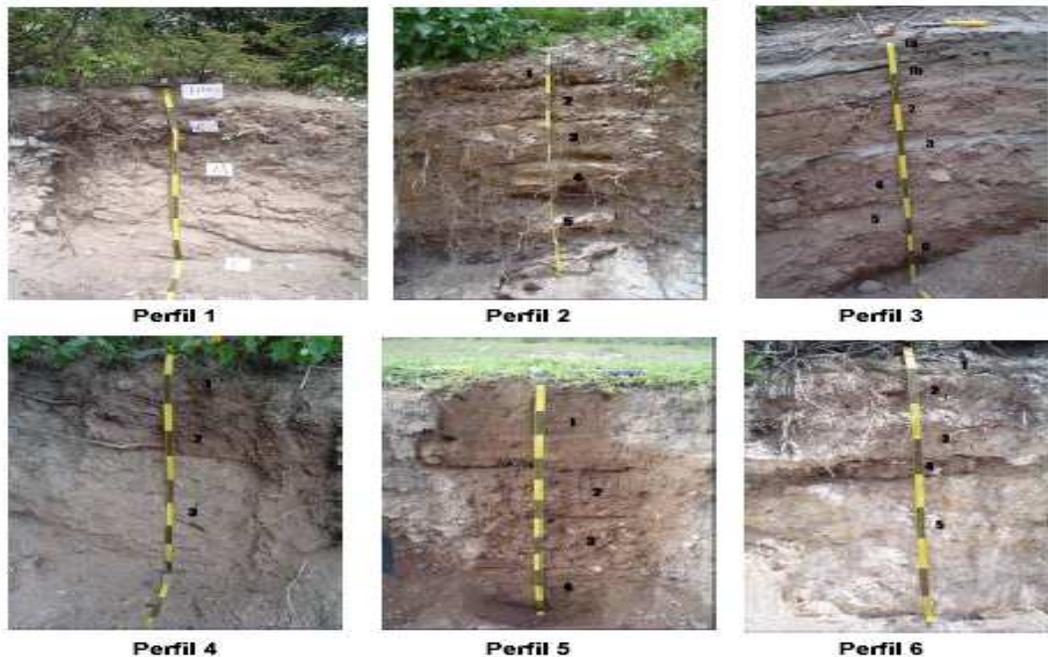


Figura 1.2. Imagen de los 6 perfiles de suelo por horizonte, del muestreo exploratorio en el área de estudio

Los estudios de textura realizados a los suelos de los 6 perfiles del área de Zimapán han permitido clasificarlos en su mayoría de la clase textural arena a arena limosa. (Ver figura 1.3). También se pudo observar que, mientras mayor es la profundidad del horizonte en el perfil, mayor será su contenido de la fracción de arena y su granulometría es más fina. Jiménez I. [10].

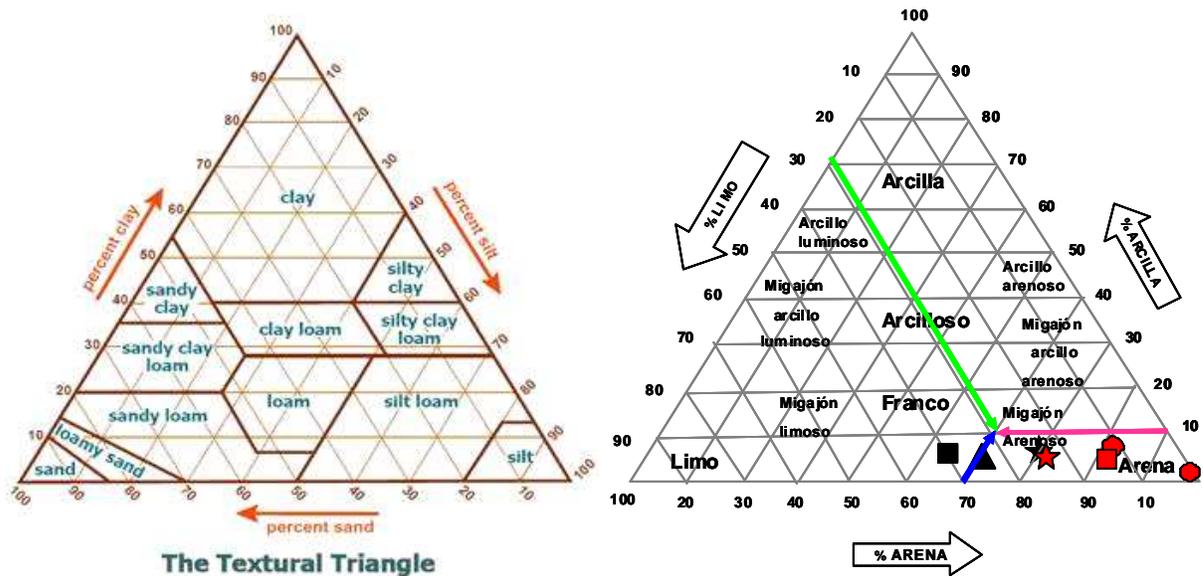


Figura 1.3. análisis de textura de muestras de suelo, arena a arena limosa Jiménez I., [10].

Los estudios realizados a los suelos del distrito minero de Zimapán, indicaron que los jales son la principal fuente de los EPT's ya que estos elementos se encuentran mayoritariamente distribuidos en la fracción <250µm. Jiménez I. [10].

Por otra parte, el análisis químico de los seis perfiles (tabla 1.1) determina que la concentración de la mayoría de los EPT's es mayor en las muestras del horizonte más superficial, sobre todo para arsénico, plomo y zinc, así como en menor medida para el cobre. Esto podría ser indicativo de un posible impacto ambiental de los suelos a partir de los jales mineros, considerando que las concentraciones de estos EPT's en los horizontes superficiales son equivalentes a los reportados para los jales del área [11]. Las concentraciones de As, Pb y Zn pueden alcanzar hasta los 3000 mg. de estos metales /Kg. de suelo en el perfil 3 mientras que para el perfil 2 la concentración de estos elementos no es superior a 300 mg de estos metales /Kg. de suelo.



Tabla 1.1. Análisis químico de 6 perfiles de suelos contaminados del Distrito Minero de Zimapán Jiménez, 2005 [10].

Perfil	Horizonte	Concentración de los EPT's en suelos contaminados de Distrito Minero de Zimapán (ppm)						
		As	Bi	Sb	Cu	Zn	Cd	Pb
1	HJ	3000	70	60	80	600	20	800
	HA	300	70	60	30	280	10	400
	HB	200	70	60	20	65	5	20
2	1	280	75	60	55	230	5	240
	2	135	75	60	30	90	5	130
	3	80	70	55	28	85	5	80
	4	90	75	60	26	90	5	90
3	1 ^a	18300	100	110	1500	14000	100	4500
	1B	14000	100	110	1200	11000	100	4000
	2	3000	100	110	200	2000	100	500
	3	6400	100	110	200	3300	100	600
	4	5300	100	110	200	2000	100	550
	5	4500	100	110	200	3500	100	1100
4	1	3000	65	145	250	1800	15	2200
	2	120	60	55	15	150	2	15
	3	140	55	50	10	160	1	10
5	1	250	70	55	80	380	5	430
	2	155	70	55	40	120	2	210
	3	165	60	50	40	150	2	250
6	1	12000	90	100	300	5000	5	850
	2	730	80	90	70	280	0	420
	3	210	80	90	60	100	0	280
	4	480	80	90	70	220	0	1400

Además, los resultados de los contenidos bioaccesibles de arsénico y plomo para los 6 perfiles de suelo mostraron que las concentraciones de As bioaccesible en los horizontes superficiales son significativamente menores a las concentraciones totales de los EPT's, lo cual indica que la concentración de As en la evaluación de riesgo en salud es menor a la concentración total de los EPT's.



Cabe señalar, sin embargo, que aun cuando el contenido bioaccesible de As es menor que el total, estas concentraciones bioaccesibles en los horizontes superficiales son mayores a la concentración de referencia para suelos de uso agrícola y residencial (22 mg de As/Kg suelo), mientras que la concentración bioaccesible de Pb en los horizontes superficiales permanece superior a las concentraciones de referencia para suelos de cualquier tipo de uso (400 mg de Pb/Kg de suelos uso residencial y 750 mg de Pb/Kg de suelos de uso industrial), para los perfiles 1, 3, 4 y 6.

Finalmente un muestreo sistemático G. Urbano [16] muestra una alta contaminación; aún a bajos porcentajes de bioaccesibilidad de los contaminantes metálicos en los jales. La alta concentración de los residuos provoca concentraciones bioaccesibles de As de 8901-10000 ppm. Fig.1.4 a) y para Pb de 7501-10000 ppm. Fig.1.4 b)

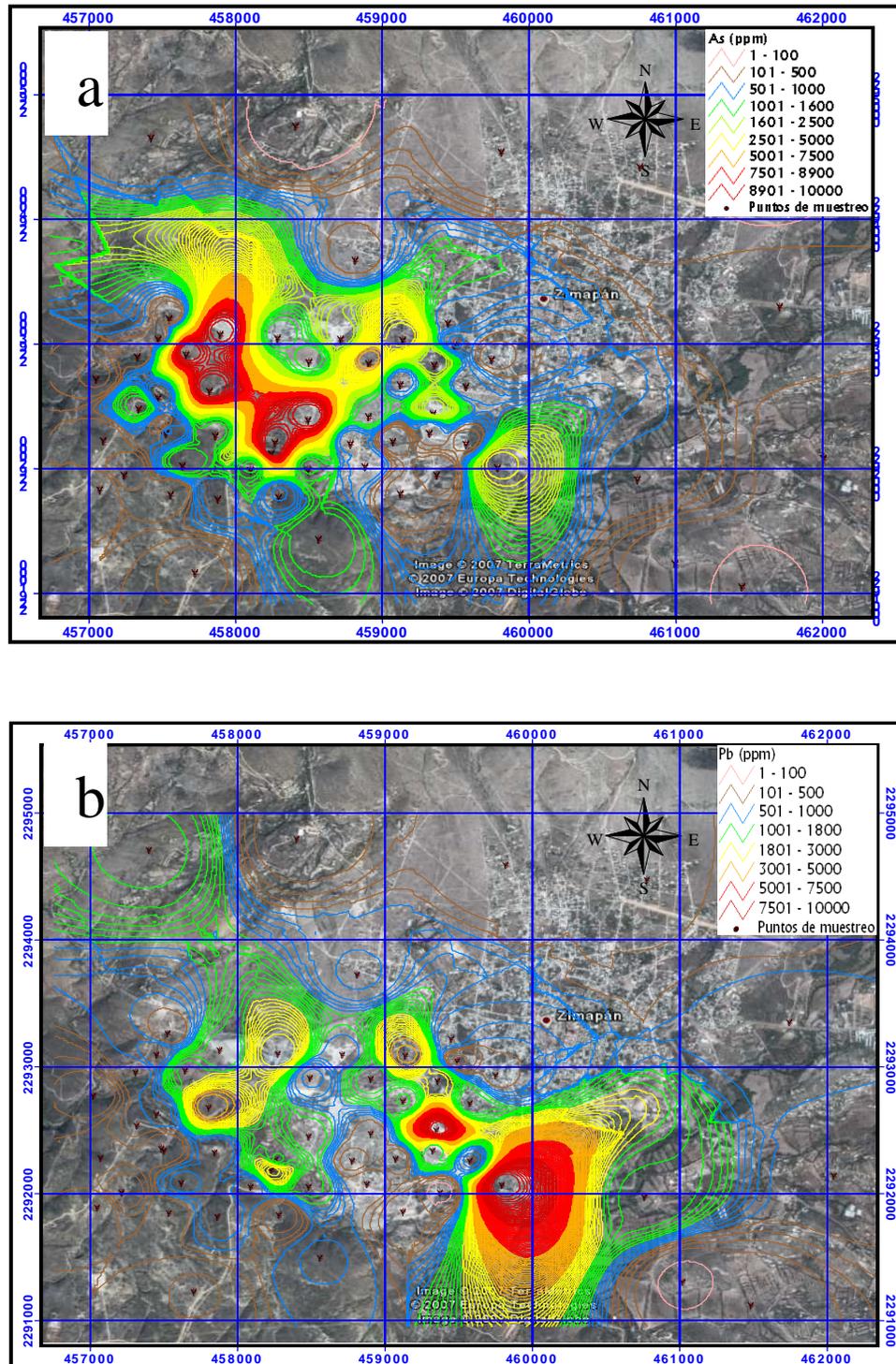


Figura 1. 4. Mapas de dispersión de EPT's. G. Urbano [16]



Los resultados del estudio sistemático de los suelos contaminados provocados por jales en el distrito minero de Zimapán muestran la importancia de remediación para evitar los altos riesgos ecológicos y en la salud de la comunidad expuesta.

Sin embargo, antes de proponer alternativas de la disminución de los EPT's en suelos contaminados del distrito minero de Zimapán se requiere el estudio de la movilidad de éstos, con el fin de determinar los procesos de oxidación y reducción que presentan los minerales con alta pureza provenientes de los jales en los suelos; así como las interacciones que estén presentes en estos minerales.

Las técnicas electroquímicas con electrodos de pasta de carbono (EPC) han mostrado su conveniencia confirmando la presencia de EPT's en los suelos en la caracterización de la reactividad de sulfuros minerales con alta pureza como la pirita, arsenopirita, galena, entre otros. Es importante mencionar que la sensibilidad de los electrodos de pasta de carbono es alta debido a sus bajas corrientes residuales; cabe mencionar, que ciertos minerales poco conductores pueden ser estudiados empleando la técnica de EPC-mineral, lo cual no se puede lograr empleando electrodos sólidos. Esto último es debido a que un mineral poco conductor homogéneamente disperso en una matriz de grafito su conductividad se ve mejorada debido a un fenómeno de percolación. Entre los trabajos más recientes con EPC se encuentran los siguientes:

Nava y col, 2004. [12]. Muestran un estudio sistemático, que permite establecer zonas de potencial en donde se lleva a cabo la disolución oxidativa de cada uno de los sulfuros minerales (calcopirita, galena, arsenopirita, esfalerita, pirita y tetraedrita) presentes en concentrado de calcopirita, utilizando electrodos de pasta de carbono, en 1.7M de H_2SO_4 . Los resultados de este estudio mostraron que hay una tendencia a oxidarse en la dirección galena-calcopirita-pirita, por lo que se puede realizar una oxidación selectiva de dichos sulfuros minerales



Cisneros y col. [13]. Mostraron que durante la electrodisolución anódica pueden formarse complejos insolubles con cationes de plomo, sobre la superficie de galena, los cuales inhiben la electrodisolución de este sulfuro metálico. Por esta razón se han estudiado diferentes medios electrolíticos, destacando que en medio de percloratos y pH ácidos, el proceso de electrodisolución es favorecido. Ellos muestran que durante la disolución anódica de galena, en medio de ácido perclórico, las especies de azufre pueden ser oxidadas en diferentes estados de oxidación en función del potencial aplicado (como azufre elemental, tiosulfatos y sulfatos principalmente).

Ahlberg y col. [14]. Muestran un estudio electroquímico de dos muestras de esfalerita altamente puras (sólo contenían 0.8% a 8.2% de hierro como impurezas), en medios ácidos, donde se concluyó que la esfalerita con bajo contenido en hierro es inactiva en un medio de ácido perclórico y clorhídrico. Ellos mismos demostraron que en un medio de ácido sulfúrico la electrodisolución de la esfalerita se incrementa. La información que se encuentra para la disolución anódica de la esfalerita es muy escasa, esto debido a las propiedades semiconductoras de la esfalerita,

En el 2004 Nava J. Y col [13]. Obtuvieron los intervalos de potencial en los cuales son oxidados, los diferentes minerales contenidos en el concentrado de esfalerita en un medio de ácido sulfúrico.

Monroy R. Y González I. [15]. Optimizaron procesos industriales involucrando oxidaciones químicas o biológicas de arsenopirita y para controlar el drenaje de rocas ácidas demostraron que un estudio voltamperométrico con electrodos de pasta de carbono (EPC) provee una posible alternativa para la caracterización de superficies de arsenopirita., Esto significa la presencia de sulfuros o FeAsO_4 . Capas pasivas en la superficie son mostradas cuando la arsenopirita es previamente oxidada por un químico y métodos biológicos asistidos. La presencia de sulfuros o FeAsO_4 fue confirmada por DRX e IR. De otra manera la heterogeneidad de los precipitados



formados durante los procesos previos de oxidación fue detectado por los EPC-mineral.

Nava J. y col. [13]. Reportaron que las disoluciones anódicas de galena proveniente de un mineral concentrado es inhibida por la formación de sulfuros elementales en el mineral. A través de la caracterización voltamperométrica de especies producidas en la interface después de microelectrólisis a potencial constante, la presencia de sulfuros elementales como PbS, persulfatos y sulfatos PbS_2O_3 $PbSO_4$ fueron detectados. Los estudios cronoamperométricos realizados prueban que los persulfatos y sulfatos inhiben la electrodisolución de la galena y la presencia de iones Pb en la interfase que da como resultado una gran porosidad en la capa formada.

Urbano G. [3]. Muestra que los resultados concentrando la esfalerita, la reactividad electroquímica de la galena se reduce y los potenciales más positivos se desplazaron respecto a la alta pureza del mineral (galena). Este comportamiento puede atribuirse a la protección galvánica que ofrece la esfalerita en la galena, evitando su libre oxidación. Por otra parte, la oxidación de la esfalerita fue disminuida por la formación de una película de un producto pasivo que se disuelve más positiva para los potenciales, provocando la oxidación de otros minerales como $CuFeS_2$, CdS y FeAsS presentes en una menor proporción en el concentrado de esfalerita.

Canales C. [1]. Estableció una alternativa rápida para determinar la reactividad de EPT's de sulfuros minerales presente en los suelos contaminados del distrito minero de Zimapán con electrodo de pasta de carbonó.

Urbano G. [16]. Muestra la interacción galvánica que se tiene cuando coexiste pirita en un mineral de arsenopirita y los mecanismos de reacción de estos minerales. Estos resultados se validaron con estudio de simulación molecular y con estudios de MEB y difracción de RX de los productos de lixiviación de los sulfuros minerales en electrodos de pasta de carbono.



En los trabajos anteriormente mencionados sólo se aborda lo referente a los procesos de oxidación y reducción de sulfuros minerales con alta pureza. Teniéndose únicamente un trabajo acerca de suelos donde se utilizan los electrodos de pasta de carbono para determinar los procesos de oxidación y reducción de los sulfuros minerales que contaminan los suelos. Por tal motivo este trabajo de investigación propone emplear las técnicas electroquímicas con EPC para determinar la movilidad de los EPT's presentes en suelos contaminados por jales históricos que permitan posteriormente proponer alternativas para la disminución de los EPT's en suelos contaminados del distrito minero de Zimapán.



CAPITULO 2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Las técnicas electroquímicas han mostrado ser una alternativa en la caracterización de minerales, provenientes de los desechos de la industria minero-metalúrgica, mediante técnicas voltamperométricas con EPC. En este trabajo de investigación se propone utilizar la estrategia experimental de la obtención de la reactividad de sulfuros minerales en suelos para caracterizar la movilidad de los EPT's presentes en suelos contaminados por jales históricos

2.1.1.- Estrategia experimental.

En respuesta a la problemática antes expuesta y la necesidad de conocer con exactitud el impacto que producen los residuos mineros al ambiente, se requiere realizar un estudio voltamperométrico de 6 perfiles obtenidos a partir de un muestreo exploratorio en suelos contaminados por jales del distrito minero de Zimapán, para determinar si es posible observar los procesos de oxidación y reducción de EPT's, utilizando electrodos de pasta de carbono en un medio lixivante que simula las condiciones del sitio.

Posteriormente, se realizan estudios voltamperométricos en dirección catódica y anódica de los 6 perfiles de un muestreo exploratorio presentes en suelos contaminados del distrito minero de Zimapán, después de concentrar los EPT's en la interface para determinar la movilidad y la interacción que presentan entre ellos.

Finalmente, se lleva a cabo el estudio voltamperométrico en dirección anódica de 11 suelos contaminados del muestreo sistemático del distrito después de concentrar los productos de oxidación de los EPT's en la interfase mediante la imposición constante de un potencial anódico durante 15 min. (Cronoamperometría) con el propósito de determinar la dispersión y la bioaccesibilidad de los EPT's en los suelos de Zimapán.



2.1.2.- Parte experimental.

2.2.1 Electrodo de pasta de carbono

Las muestras de suelo fueron recolectadas de las principales zonas de exposición de riesgo cercanas a la presa de jales Santa María en el Distrito Minero de Zimapán (ver figura 1.2) y tamizadas para conseguir un tamaño de partícula menor a $200\ \mu\text{m}$. El grafito utilizado para la preparación de los electrodos de trabajo fue polvo de grafito Alfa Aesar, con un tamaño de partícula de $2\text{-}15\ \mu\text{m}$ con 99.9995% de pureza. El aceite de silicón que se utilizó como aglutinante fue de Sigma-Aldrich (Densidad $0.963\ \text{g/mL}$ (25°C), Viscosidad $200\ \text{cSt}$ ($25\ ^\circ\text{C}$)).

Para preparar los electrodos de trabajo se mezclaron $0.2\ \text{g}$ de grafito y $0.8\ \text{g}$ de mineral (pirita, arsenopirita ó galena) con $0.3\ \text{mL}$ de aceite de silicón, hasta homogenizar en un mortero de ágata (figura 2.1). La pasta resultante se colocó dentro de un tubo de $7\ \text{cm}$ de longitud con $0.2\ \text{cm}$ de diámetro interno, el cual funge como contenedor del electrodo de trabajo. La superficie del electrodo fue renovada y homogeneizada antes de cada experimento debido a que las reacciones electroquímicas toman lugar completamente en la interfase. Con la finalidad de asegurar la reproducibilidad de la respuesta electroquímica obtenida.

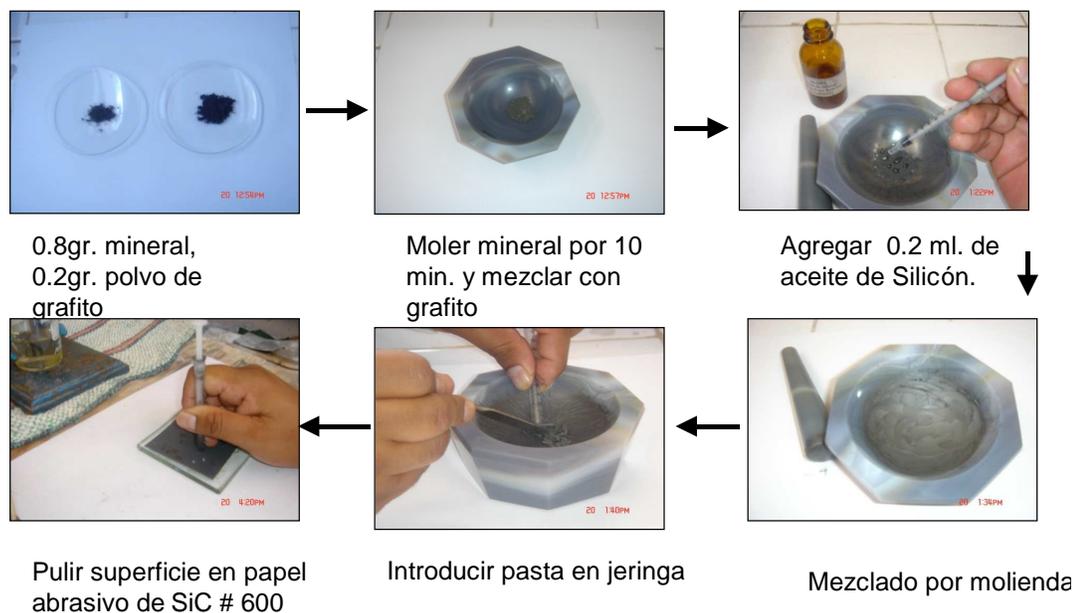


Figura 2.1. Preparación de electrodos de pasta de carbono.

2.3 Estudios Voltamperométricos

Para el estudio voltamperométrico se utilizan dos celdas de vidrio Pyrex de 100 ml de capacidad, un sistema de 3 electrodos, (electrodo de trabajo, contra electrodo, electrodo de referencia) con entrada y salida de nitrógeno (figura 2.2). Como electrodo de trabajo se utilizó EPC, preparado con suelos contaminados del Distrito minero de Zimapán del muestreo exploratorio y sistemático. Se utiliza un electrodo de referencia de sulfatos (SSE) $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{SO}_4(\text{s})/\text{K}_2\text{SO}_4(\text{sat})$, inmerso en un capilar de Luggin y un electrodo auxiliar de grafito. Todos los valores de potencial fueron convertidos a la escala del electrodo estándar de hidrógeno (SHE, sumando 0.615 V).

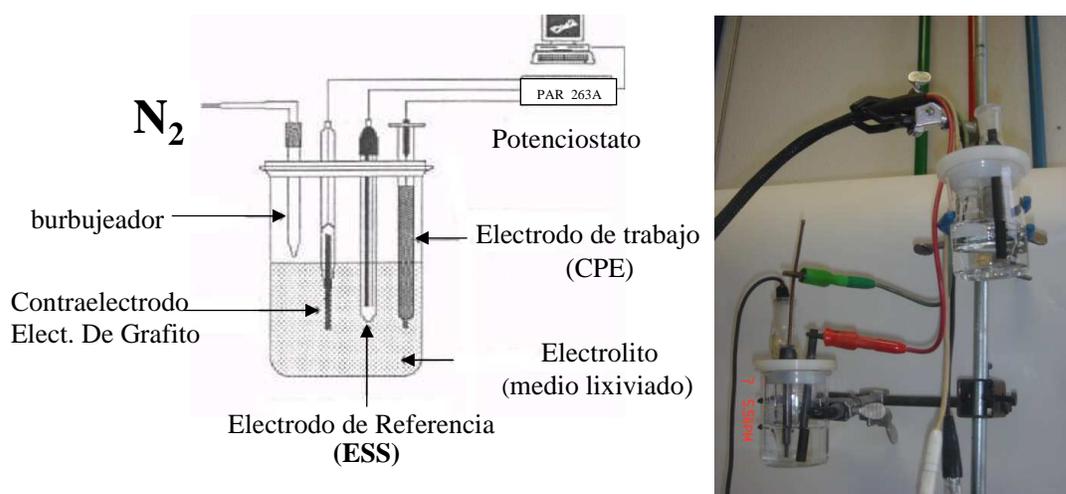


Figura 2.2. Arreglo experimental, celda electroquímica de tres electrodos

La solución utilizada para el estudio voltamperométrico de este trabajo fue una solución, 0.0187 M de NaNO_3 , 0.0094 M de NaHCO_3 , 0.059 M NaCl , 0.19 M de NaSO_4 . Dichas soluciones se prepararon con agua desionizada de $18.2 \text{ M}\Omega \text{ cm}^{-2}$ y reactivos de grado analítico.



El pH se mantuvo constante en 7.9 y la solución fue desoxigenada con nitrógeno durante 10 min., antes de realizar el estudio voltamperométrico. Durante el experimento se mantiene el flujo de N_2 sobre la solución.

Se utiliza un equipo potenciostato-galvanostato de la marca PAR, modelo 263A conectado a una PC (figura 2.3) El manejo de las técnicas se realiza mediante el software proporcionado por la misma compañía.

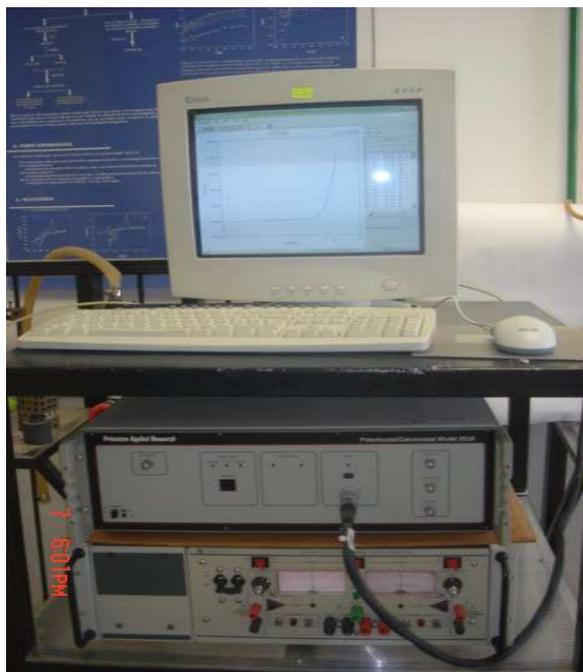


Figura.2.3. Equipo PARC 263A



CAPITULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Estudio voltamperométrico de los EPT's presentes en los suelos del Distrito Minero de Zimapán del muestreo exploratorio.

3.1.1 Estudios Voltamperométricos de inversión Anódica de los Perfiles 3 y 4.

La figura 3.1 presenta las respuestas voltamperométricas únicamente de los perfiles 3 y 4 de los suelos ubicados en la malla de muestreo exploratorio, en sus diferentes horizontes. Se eligen estos dos perfiles para mostrar que si es posible observar los procesos de oxidación y reducción en el medio que simula las condiciones de lixiviación del distrito minero de Zimapán, cuando se tiene una mayor y menor concentración de EPT's presentes en el suelo. Las curvas muestran las respuestas voltamperométricas después de hacer la concentración de los productos de oxidación mediante la imposición de un potencial constante anódico durante 15min (cronoamperometría). El potencial impuesto en la cronoamperometría es el potencial en donde se realiza la inversión anódica de los voltamperogramas; en un intervalo de 0.815 V a 2.015 V y el tiempo de 15 minutos es para poder observar las respuestas voltamperométricas de los procesos oxidación reducción de los EPT's.

3.1.1.1. Perfil 3.

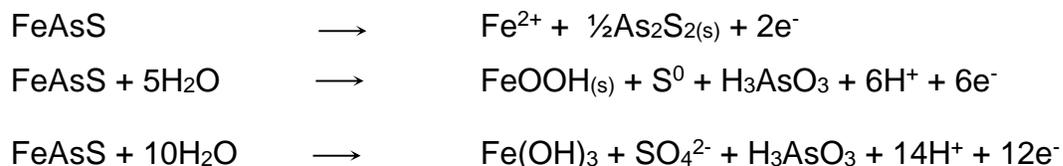
En las figuras 3.1, 3.2 y 3.3, se muestran los voltamperogramas del perfil 3 de los horizontes 1A, 1B, 2, 4 y 5 respectivamente.

En las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 se observa que al cambiar el potencial anódico en el intervalo de inversión 0.815 V a 2.015 V en todos los horizontes del perfil 3 se tiene un proceso de oxidación A1 que comienza en el potencial de 1.4 V.

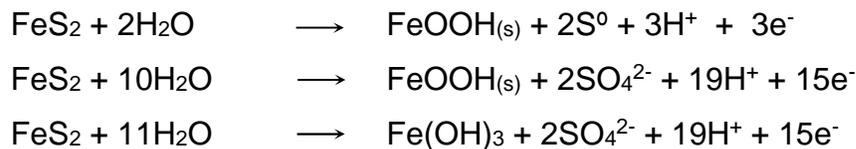


Este proceso es atribuido a la lixiviación de los minerales con alta pureza presente en los suelos que contienen los EPT's de acuerdo a algunas de las siguientes reacciones reportadas en la literatura. Urbano. G. [3]:

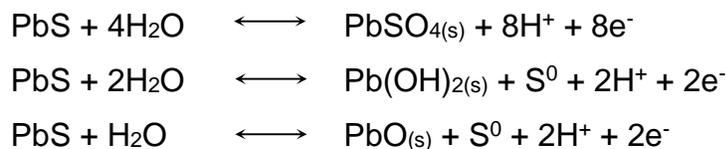
Para la arsenopirita:



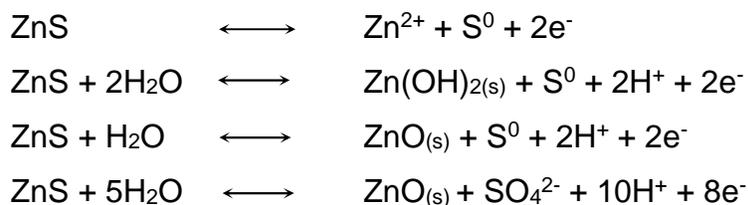
Para la pirita



Para la galena



Para la esfalerita



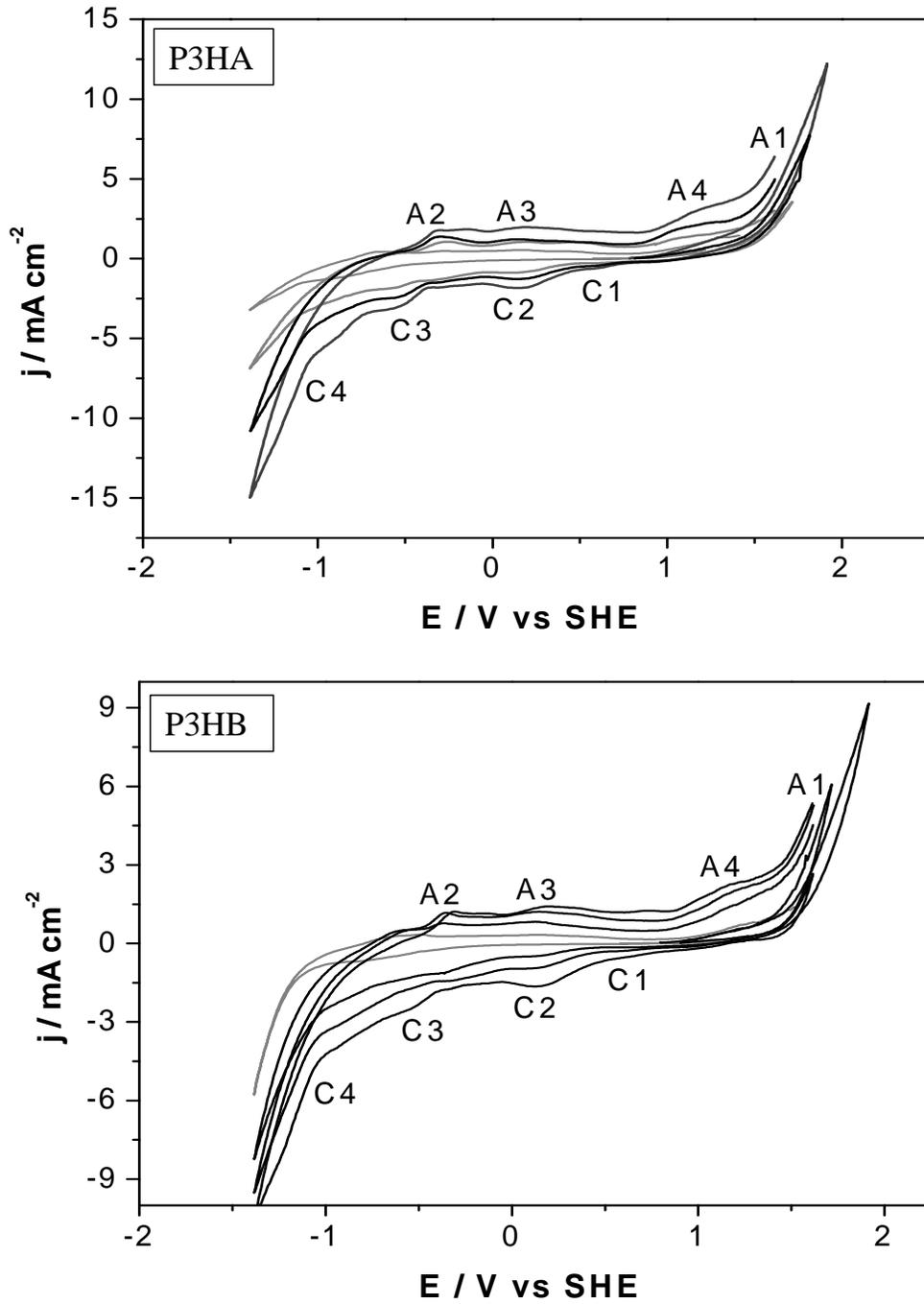


Figura 3.1. Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del perfil 3 horizontes 1A y 1B, en un medio lixiviado ($V = 20 \text{ mV s}^{-1}$). El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de $0.815 \text{ V} < E < 2.015 \text{ V}$, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4 V .

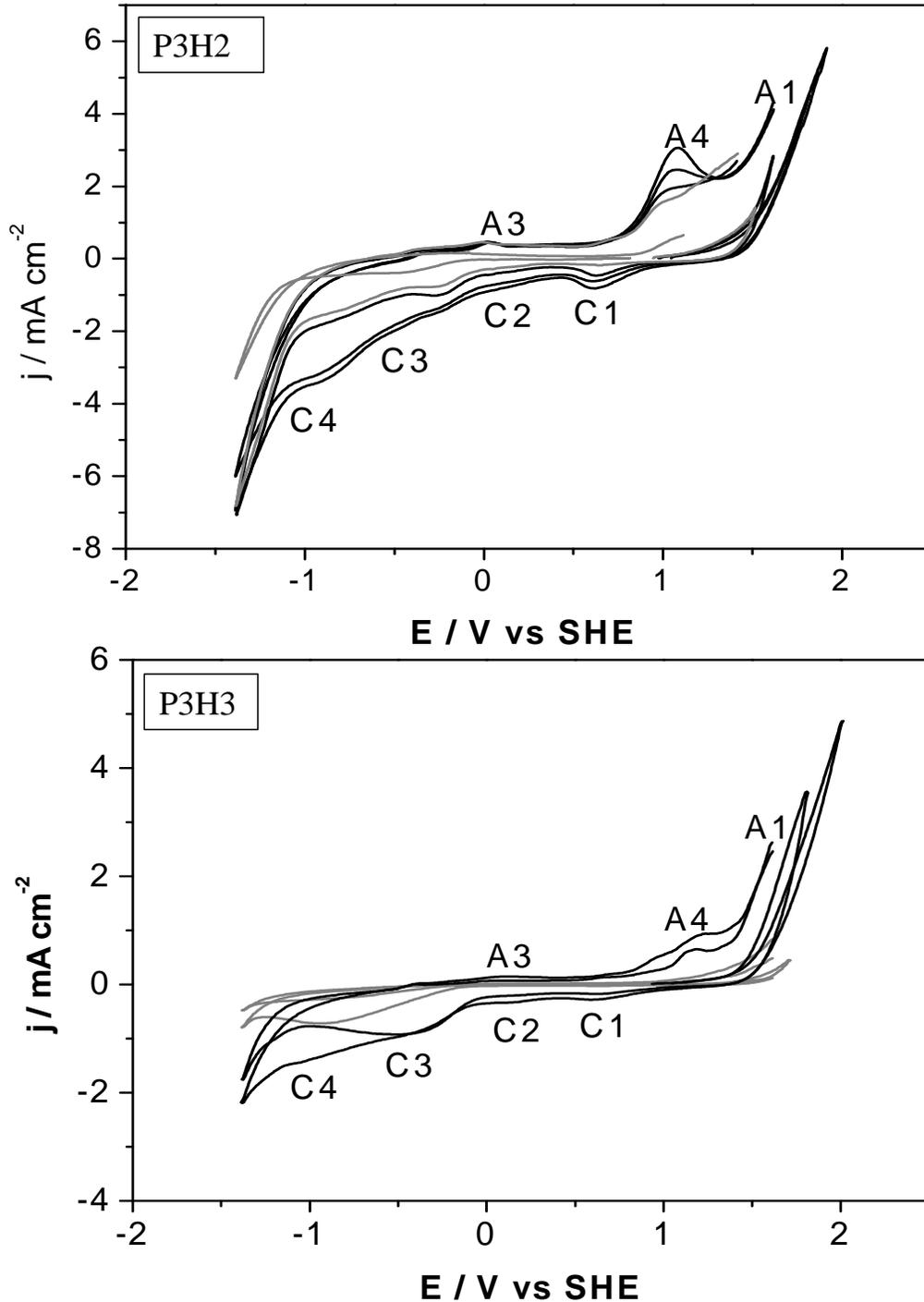


Figura 3.2. Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del perfil 3 horizontes 2 y 3, en un medio lixiviante ($v = 20 \text{ mV s}^{-1}$). El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de $0.815 \text{ V} < E < 2.015 \text{ V}$, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4 V .

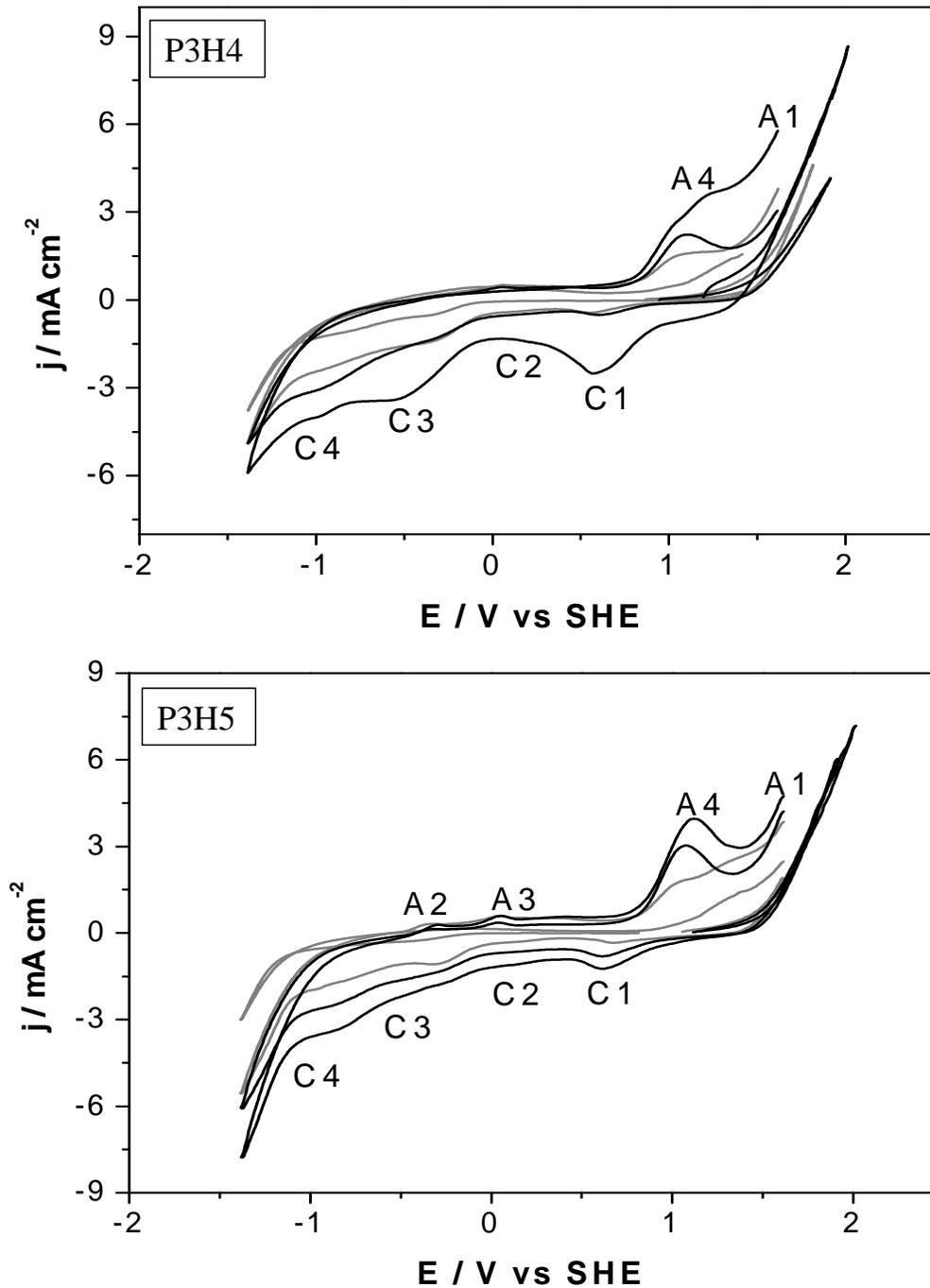


Figura 3.3. Voltamperogramas obtenidos sobre EPC perfil 3 horizontes 4 y 5 en un medio lixiviante ($V = 20 \text{ mV s}^{-1}$). El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de $0.815 \text{ V} < E < 2.015 \text{ V}$, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4 V .



Al invertir el barrido de potencial en dirección catódica se observan 4 procesos de reducción C1, C2, C3 y C4 en los horizontes 1A, 1B, 2, 3; 4, 5 en los intervalos de 0.8 a 0.4 V, 0.4 a -0.1 V, -0.1 a -0.6 V, y -0.6 a -1.1 V respectivamente (figuras 3.1, 3.2 y 3.3). Los procesos de reducción antes mencionados van apareciendo conforme el potencial de inversión se hace más positivo. Los procesos de C1, C2, C3, C4 que se observan en los voltamperogramas son atribuidos a la reducción de los productos formados en la oxidación del barrido directo.

Al invertir nuevamente el barrido de potencial se aprecian 3 procesos de oxidación A2, A3 y A4 en los horizontes 1A, 1B y 5 en los intervalos de potencial -0.5 a -0.2 V, -0.2 a 0.4 V, 0.7 a 1.4 V (figuras 3.1 y 3.3). Mientras que en los horizontes 2 y 3 (figura 3.2), se observan sólo los procesos A3 y A4. Por otra parte, en el horizonte 4 se presenta sólo el proceso A4 (Figura 3.3). La densidad de corriente de estos procesos de oxidación también cambia, conforme el potencial de inversión anódica del barrido directo se hace más positivo. Estos procesos de oxidación son atribuidos a la oxidación de las especies reducidas en C1, C2, C3, Y C4

3.1.1.2. Perfil 4.

En las figuras 3.4 y 3.5 se muestran los voltamperogramas del perfil 4 de los horizontes 1, 2, y 3 respectivamente.

Al igual que en el perfil 3, en las figuras 3.4 y 3.5 se observa que al cambiar el potencial anódico en el intervalo de inversión 0.815 V a 2.015 V en todos los horizontes del perfil 4 se presenta el proceso de oxidación A1 el cual es atribuido a la lixiviación de los minerales como la pirita (FeS_2), pirrotita (FeS) y arsenopirita (FeAsS), presentes en los suelos que contiene los EPT's.

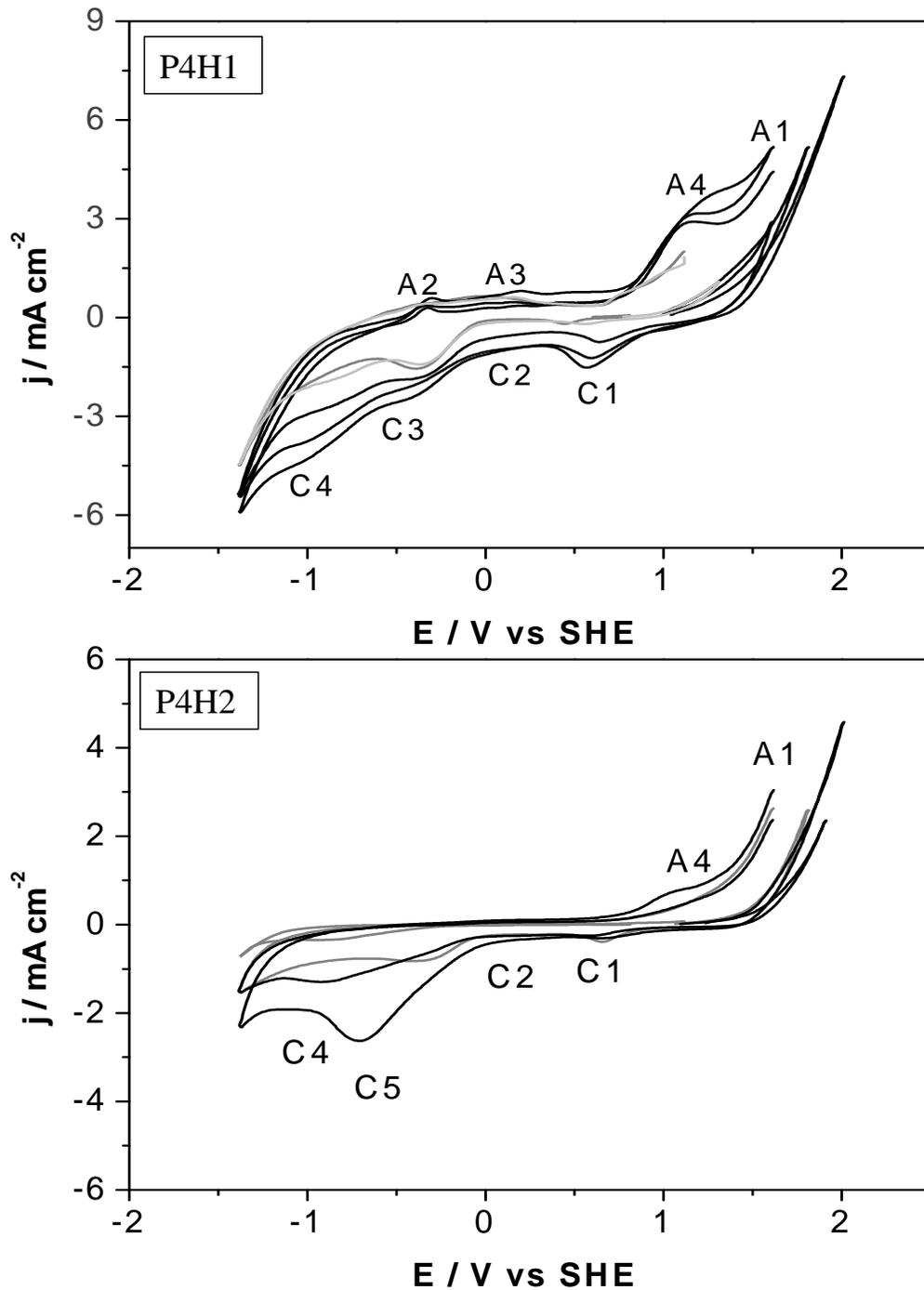


Figura 3.4. Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del Perfil 4 Horizontes 1 y 2 en un medio lixiviante ($v = 20 \text{ mV s}^{-1}$). El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de $0.815 \text{ V} < E < 2.015 \text{ V}$, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4 V .



Al invertir el barrido de potencial en dirección catódica en el horizonte 1 y 3 se observan 4 procesos de reducción C1, C2, C3 y C4 en los intervalos 0.8 a 0.4 V, 0.4 a -0.1 V, -0.1 a -0.6 V, y -0.6 a -1.1 V respectivamente. (Figura 3.4 y 3.5) Mientras que en el horizonte 2 al invertir el barrido en dirección catódica se observa los procesos de reducción C1, C2, C5 Y C4 en los intervalos, de 0.8 a 0.4 V, 0.4 a -0.1 V, -0.1 a -0.9 V y -0.9 a -1.1 V respectivamente. (Figura 3.4)

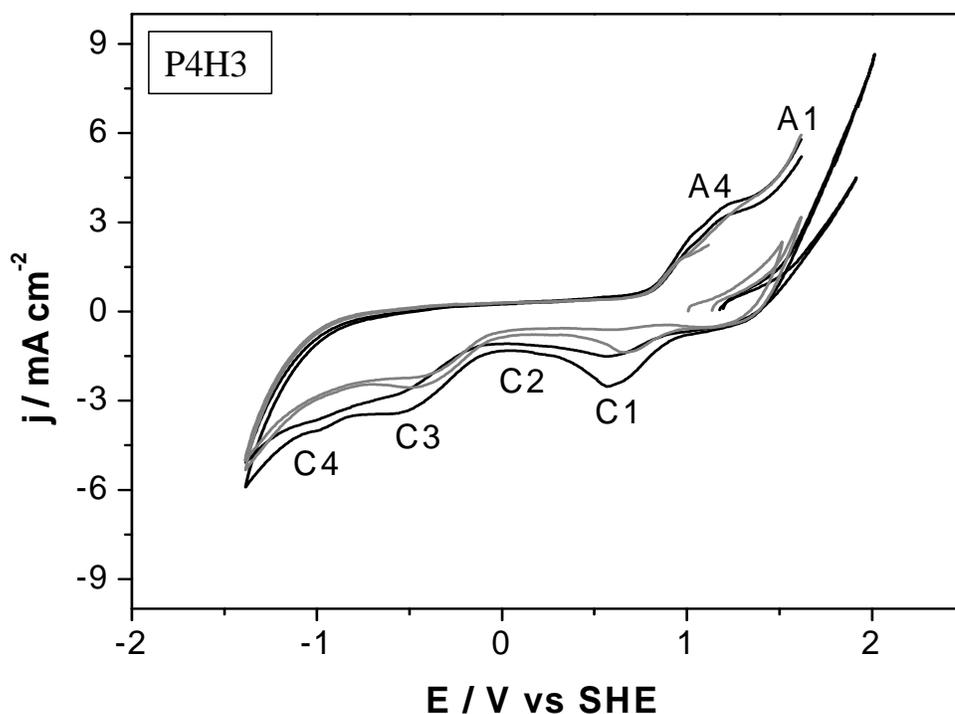


Figura 3.5. Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del perfil 4 horizonte 3 en un medio lixiviante ($V = 20 \text{ mV s}^{-1}$). El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de $0.815 \text{ V} < E < 2.015 \text{ V}$, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4 V .



Al invertir nuevamente el barrido de potencial se aprecian 3 procesos de oxidación A2, A3 y A4 en el horizonte 1 en los intervalos de -0.5 a -0.2 V, -0.2 a 0.4 V, 0.7 a 1.4 V. Mientras que en los horizontes 2 y 3 no se observan los procesos de oxidación A2 y A3. La ausencia de estos procesos de oxidación se debe a que se tiene una menor concentración de EPT's como el Pb.

Los resultados voltamperométricos de inversión anódica, con electrodos de pasta de carbono muestran que es posible obtener respuesta de los procesos de oxidación y reducción de altas y bajas concentraciones de los EPT's presentes en los suelos contaminados del distrito minero de Zimapán.

Sin embargo, se requiere identificar que los EPT's corresponden estos procesos de oxido-reducción. Es por ello que se realiza la comparación de los procesos observados del muestreo exploratorio en un medio estándar de 0.1 M de NaNO_3 en el potencial de inversión anódico más grande 2.015 V, ver los voltamperogramas de los perfiles del muestreo exploratorio (figuras b). Canales C. [1],

3.1.2. Estudios Voltamperométricos de 6 Perfiles del muestreo exploratorio.

En las figuras de 3.6 hasta 3.23 se muestran los voltamperogramas de los perfiles 1, 2, 3, 4, 5 y 6 en sus diferentes horizontes. En las curvas i y ii, se muestran las respuestas voltamperométricas cuando el barrido se inicia en dirección catódica y anódica respectivamente, mientras que las curvas iii muestran las respuestas voltamperométricas en dirección anódica después de realizar la concentración de los productos de oxidación mediante la imposición de un potencial constante de 2.015 V durante 15 min. Voltamperogramas a) en un medio lixivante y voltamperogramas b) realizados en una solución de 0.1 M NaNO_3 y utilizando las mismas condiciones



En los voltamperogramas de las figuras de la 3.6 a la 3.23 gráficas a y b curvas i, iniciadas en dirección catódica se observa un proceso de reducción que comienza en un potencial de aproximadamente -0.5 V en los horizontes A, B del perfil 1; horizontes 1,2 del perfil 2; horizontes 1A, 1B, 2, 3, 4 y 5 del perfil 3, horizontes 2 y 3 del perfil 4, horizontes 2 y 3, del perfil 5 y horizonte 2 del perfil 6. Así mismo no se presenta este proceso de reducción en los horizontes 1 y 2 del perfil 4, horizonte 1 del perfil 5 y horizonte 1 del perfil 6. Al invertir el barrido en dirección anódica sólo se observa el proceso A1 de oxidación en los 2 medios. Este proceso es atribuido a la lixiviación de los EPT's provenientes de los residuos mineros presentes en los suelos de Zimapán en los diferentes medios electrolíticos.

Por otra parte, las respuestas voltamperométricas de los perfiles del 1 al 6 en dirección anódica (curvas ii), permiten observar en todos los horizontes el proceso de oxidación A1 que tiende a incrementar su densidad de corriente a partir de un potencial de 1.5 V (figuras a). Al invertir el barrido en dirección catódica se observa sólo un proceso de reducción que comienza en el potencial -0.1 V para todos los horizontes de los perfiles del 1 al 6. Este proceso de reducción es atribuido a la reducción de EPT's oxidados en el barrido directo. Así mismo, cuando se invierte la dirección del barrido hacia potenciales positivos no se observan procesos de oxidación definidos en los todos los horizontes de los 6 perfiles. Este comportamiento podría indicar que la respuesta voltamperométrica que se observa es debido sólo al suelo y a los sulfuros que lo contaminan. Sin embargo, se puede descartar que sea la respuesta debido al suelo ya que los resultados son comparables Urbano R. [3] a aquellos obtenidos a partir de los sulfuros minerales atribuidos a la oxidación de los EPT's reducidos en el barrido directo en las ampliaciones del horizonte A del perfil 1; en los horizontes 1A, 1B, 2, 3, 4 y 5 del perfil 3; horizontes 1, 2 y 3 del perfil 4 y horizontes 1, 2 y 3 del perfil 5 (ver gráficas a de las figuras 3.6, 3.10 al 3.21y 3.23, curvas ii ver ampliaciones).



Es importante mencionar que el medio estándar presenta prácticamente el mismo comportamiento, en la respuesta voltamperométrica de los 6 perfiles en estudio (figuras 3.6, 3.10 a 3.21 y 3.23). En este medio la respuesta de la densidad de corriente del proceso de oxidación es menor (ver ampliaciones de gráficas b, curvas ii). Este comportamiento puede ser atribuido a que la reactividad de los EPT's es mayor en el medio lixiviante.

Es por ello que se requiere de la concentración de los productos de oxidación de los sulfuros en la interface del electrodo de trabajo (EPC) que permita observar más claramente los procesos de oxido-reducción de los EPT's. Esta concentración se lleva a cabo aplicando un potencial de oxidación de 2.015V durante 15 minutos, para posteriormente realizar una voltamperometría en la dirección positiva (gráficas aiii, biii). Este estudio se llevó a cabo con el propósito de alterar la superficie del mineral a un potencial controlado e identificar los productos formados sobre la superficie, y así obtener información más detallada acerca de los procesos involucrados.

En los voltamperogramas de las gráficas aiii en la dirección anódica de los 6 perfiles, se aprecian los procesos de oxidación que está relacionado con la lixiviación de los minerales sulfurosos (disolución de los EPT's). Cuando se invierte el barrido en la dirección catódica se observa en todos los horizontes de los 6 perfiles la reducción de una primera especie de Fe en el intervalo de potencial de 0.8V a 0.6V; la reducción de una primera especie de Pb en el intervalo 0.3V a -0.1V, la reducción de As, Zn, Cd, y una segunda especie de Fe en el intervalo de -0.1V a -0.6V y la reducción de una segunda especie As, Zn y Pb en el intervalo -0.6V a -1.1V. Al invertir nuevamente el barrido de potencial se aprecia la disolución de plomo a Pb^{2+} en un intervalo de potencial de -0.3V a -0.5 V para los horizontes 1A del perfil 1, en el horizonte 2 del perfil 2, en todos los horizontes del perfil 3, en los horizontes 1 y 3 del perfil 4, en los horizontes 2 y 3 del perfil 5 y en los horizontes 1 y 2 del perfil 6. Asimismo en los horizontes de estos perfiles se presenta la disolución de Fe^0 , Zn^0 , As^0 , Cd^0 , a Fe^{2+} , Zn^{2+} , As^{2+}



, Cd^{2+} en el intervalo -0.2 a 0.4 V y la oxidación de una especie de hierro $\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$ en el intervalo de 0.9 a 1.4 V.

Por otra parte, en el horizonte 1B del perfil, 1, en el horizonte 1 del perfil 2, en el horizonte 2 del perfil 4, y en el horizonte 1 del perfil 5, sólo se tiene la oxidación de una especie de hierro $\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$ en el intervalo 0.9 a 1.4 V.

Los intervalos de potencial de reducción hierro, plomo, arsénico, zinc, y cadmio así como los intervalos de oxidación del plomo, hierro, arsénico, zinc y cadmio de los 6 perfiles del muestreo exploratorio corresponden a los determinados en el medio estándar (figuras 3.6 hasta 3.23 curvas (b)) Canales C. [1] y al estudios de minerales altamente puros de arsenopirita, pirita galena y esfalerita Urbano G., [3].

Los resultados hasta este momento indican que los EPT's se movilizan en los diferentes horizontes de los 6 perfiles del muestreo exploratorio cuando se tienen las condiciones del medio lixivante del sitio.

Es importante mencionar que al realizar la comparación del proceso de oxidación del plomo que se lleva a cabo en el intervalo de potencial de 0.3V a -0.1V , en los 2 medios (medio lixivante y medio estándar) se aprecia que éste presenta diferente densidad de corriente, en algunos casos la densidad disminuye (como en las figuras 3.9, 3.12, 3.13, 3.17, 3.18, 3.20, 3.22, 3.23) y en otras aumenta (figuras 3.6, 3.10, 3.11, 3.14, 3.19, 3.21). Además se observa un cambio en la forma de los voltamperogramas a partir del potencial de -0.25 V. Este comportamiento puede ser atribuido a una interacción entre los principales EPT'S presentes en los suelos contaminados (Pb y As).

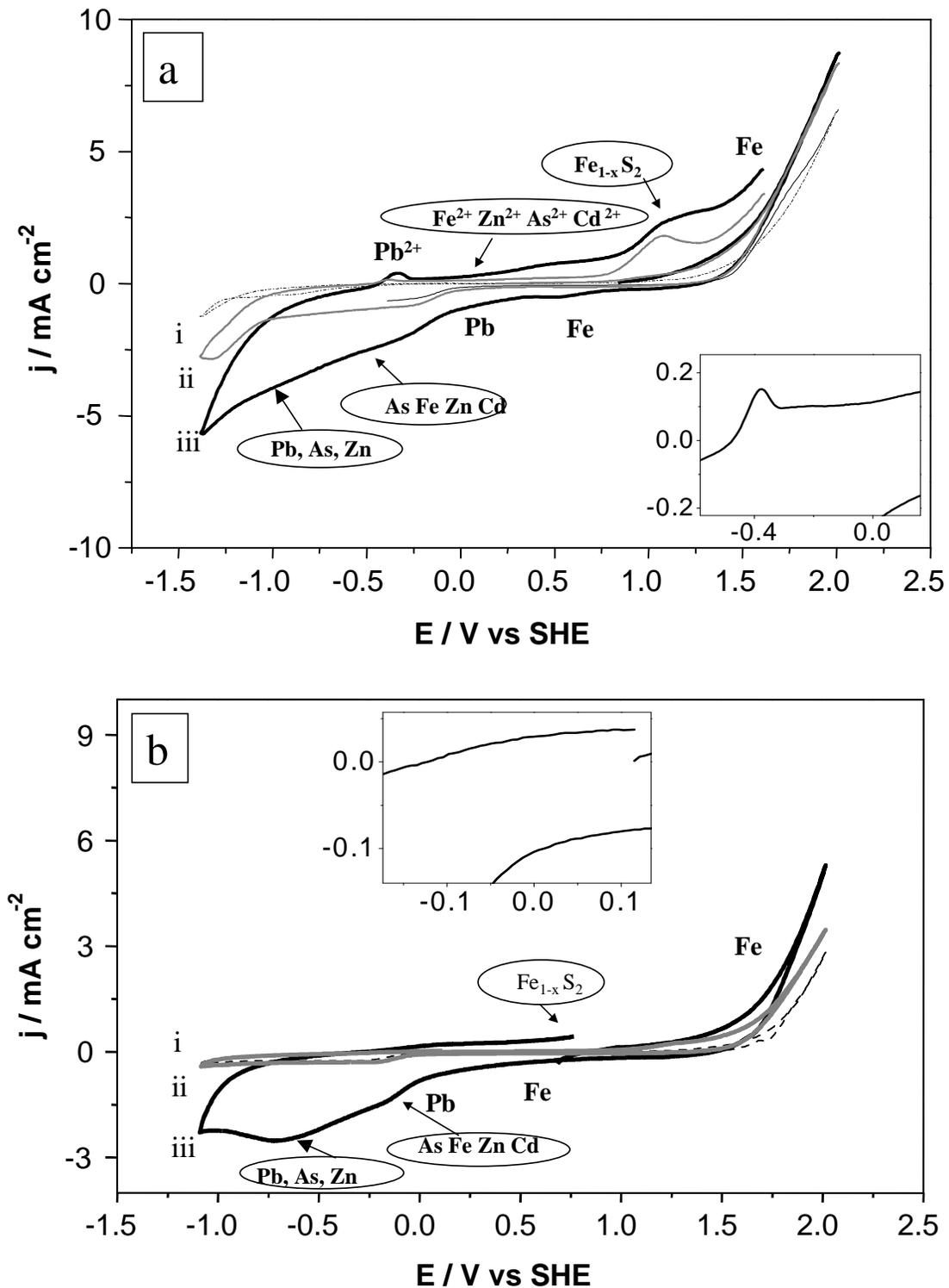


Figura 3.6 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del perfil 1 horizonte A (a) en un medio lixiviante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de $0.815 \text{ V} < E < 2.015 \text{ V}$, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4 V .

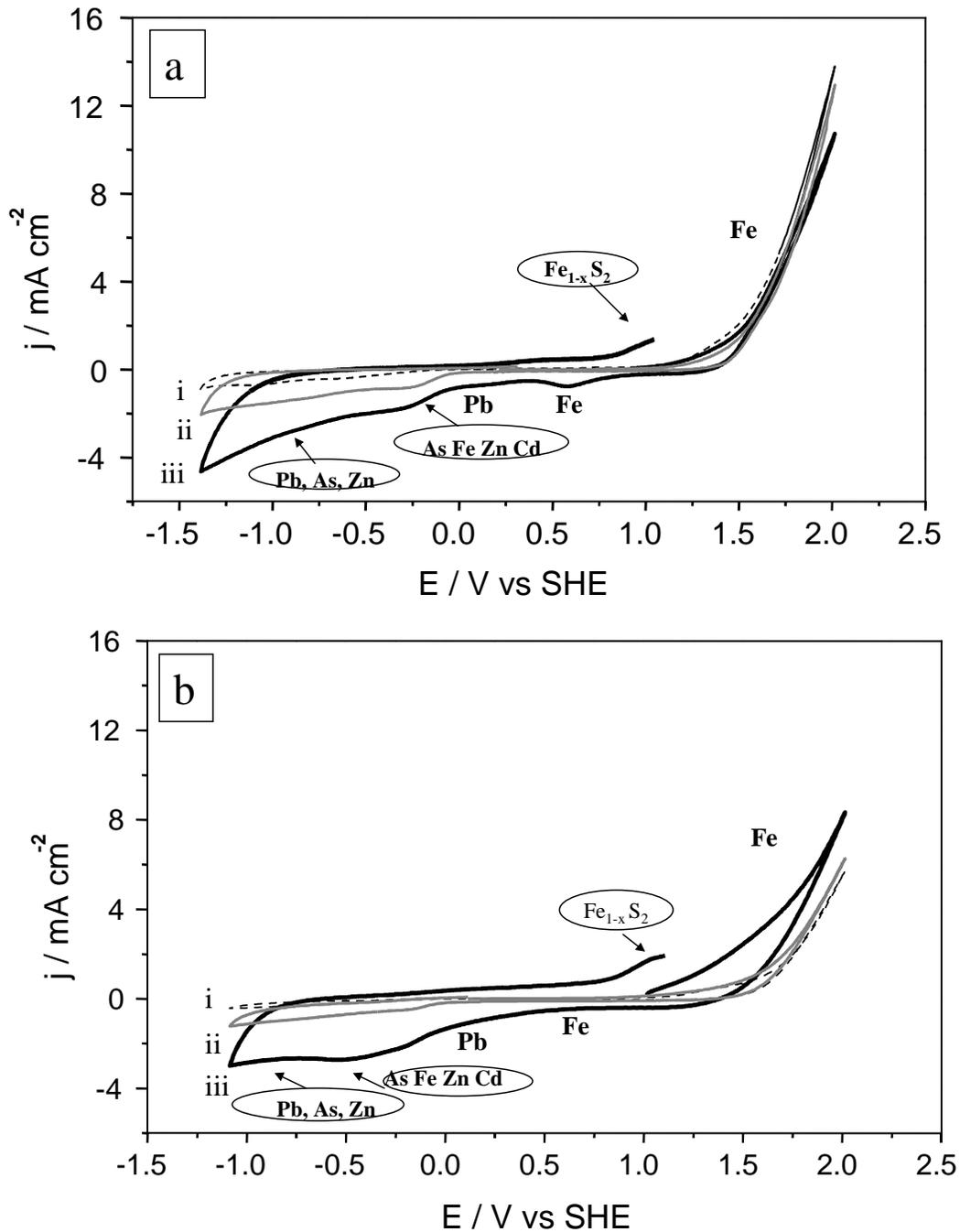


Figura 3.7 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del perfil 1 horizonte 1B(a) en un medio lixiviante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 , a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de $0.815 \text{ V} < E < 2.015 \text{ V}$, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4 V

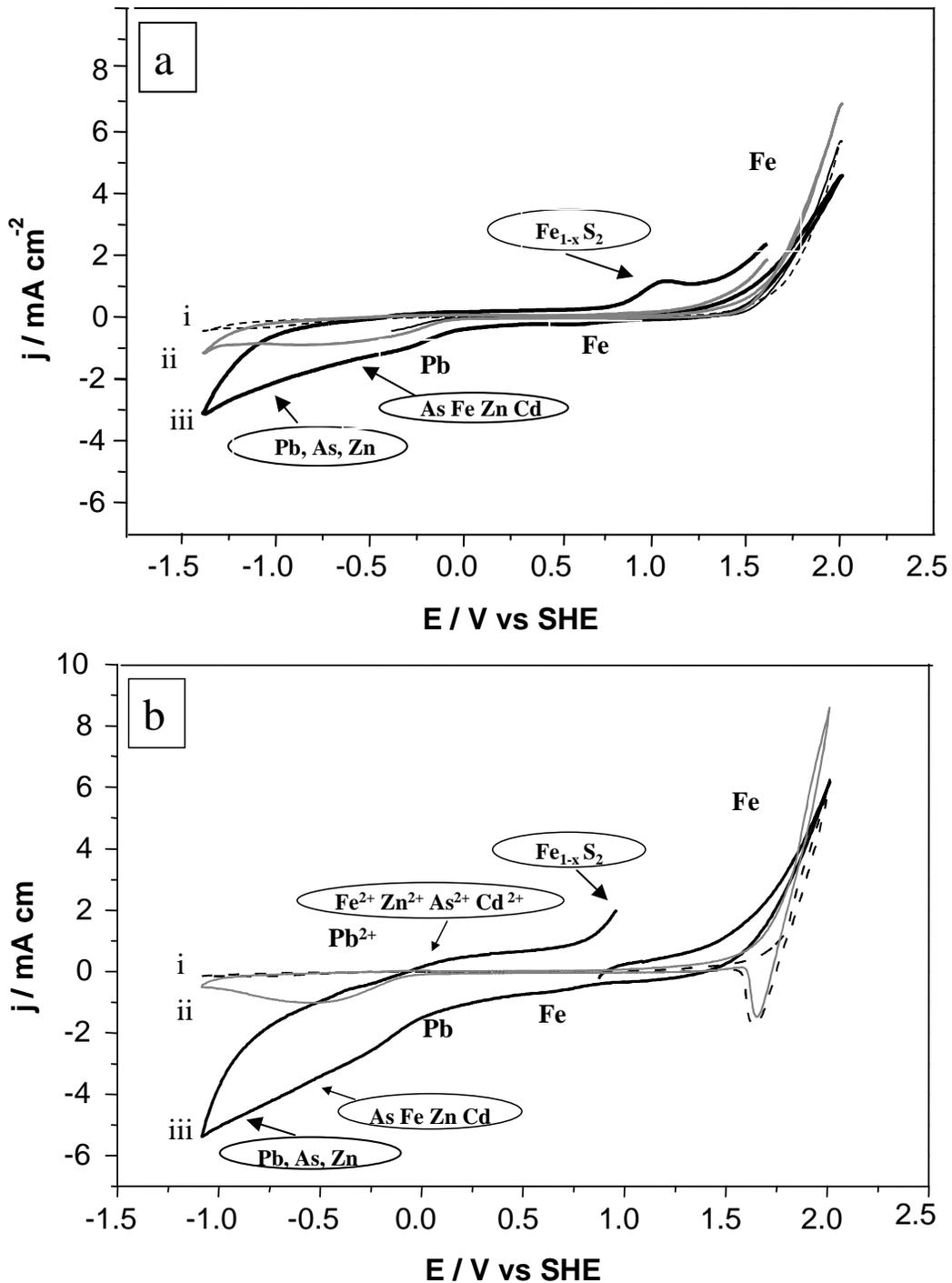


Figura 3.8 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del perfil 2 horizonte 1 (a) en un medio lixiviante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO₃ a una velocidad de barrido de 20 mV s⁻¹. El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de 0.815 V < E < 2.015 V, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4 V.

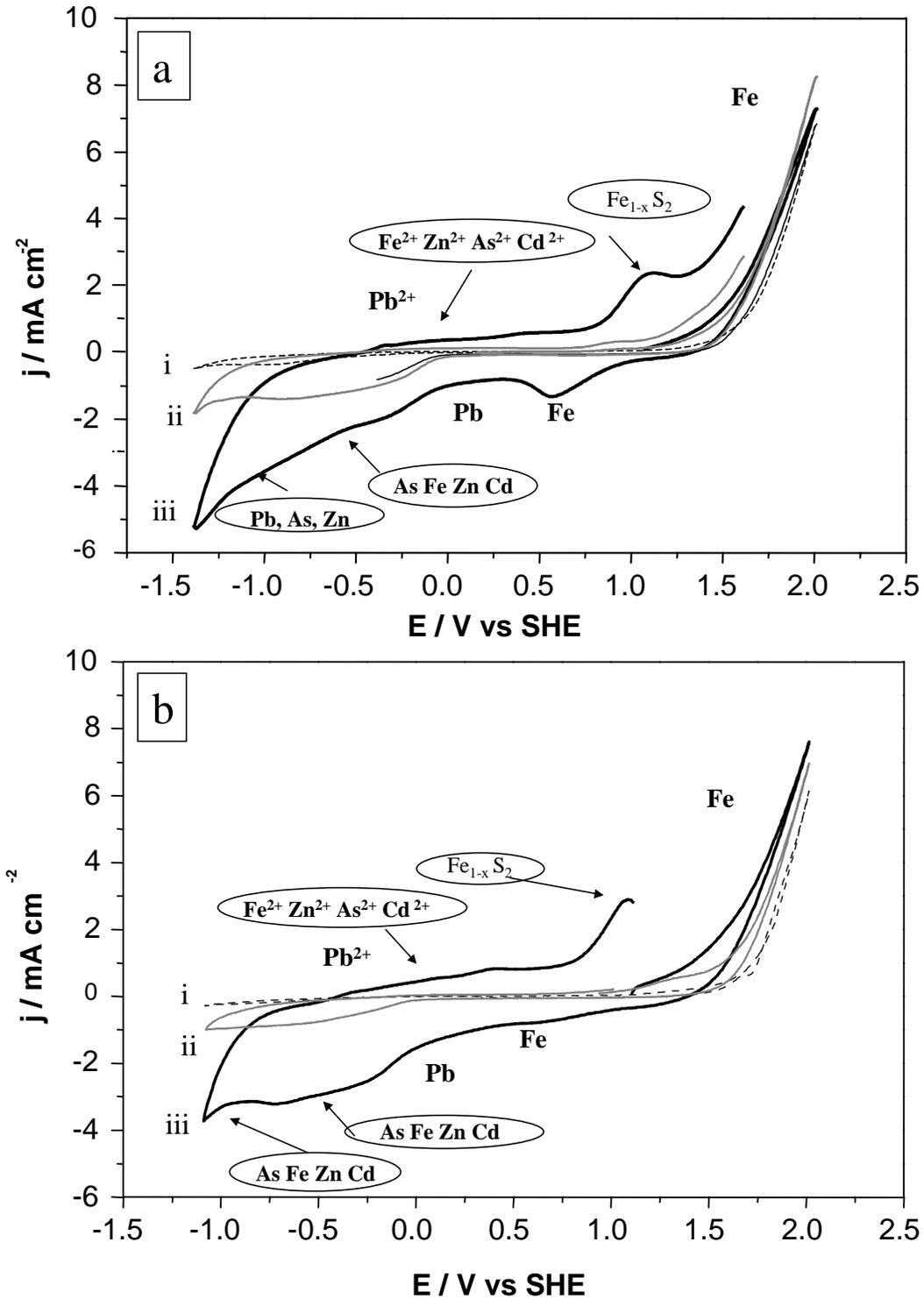


Figura 3.9 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del perfil 2 horizonte 2 (a) en un medio lixiviante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO₃ a una velocidad de barrido de 20 mV s⁻¹. El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de 0.815 V < E < 2.015 V, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4v.

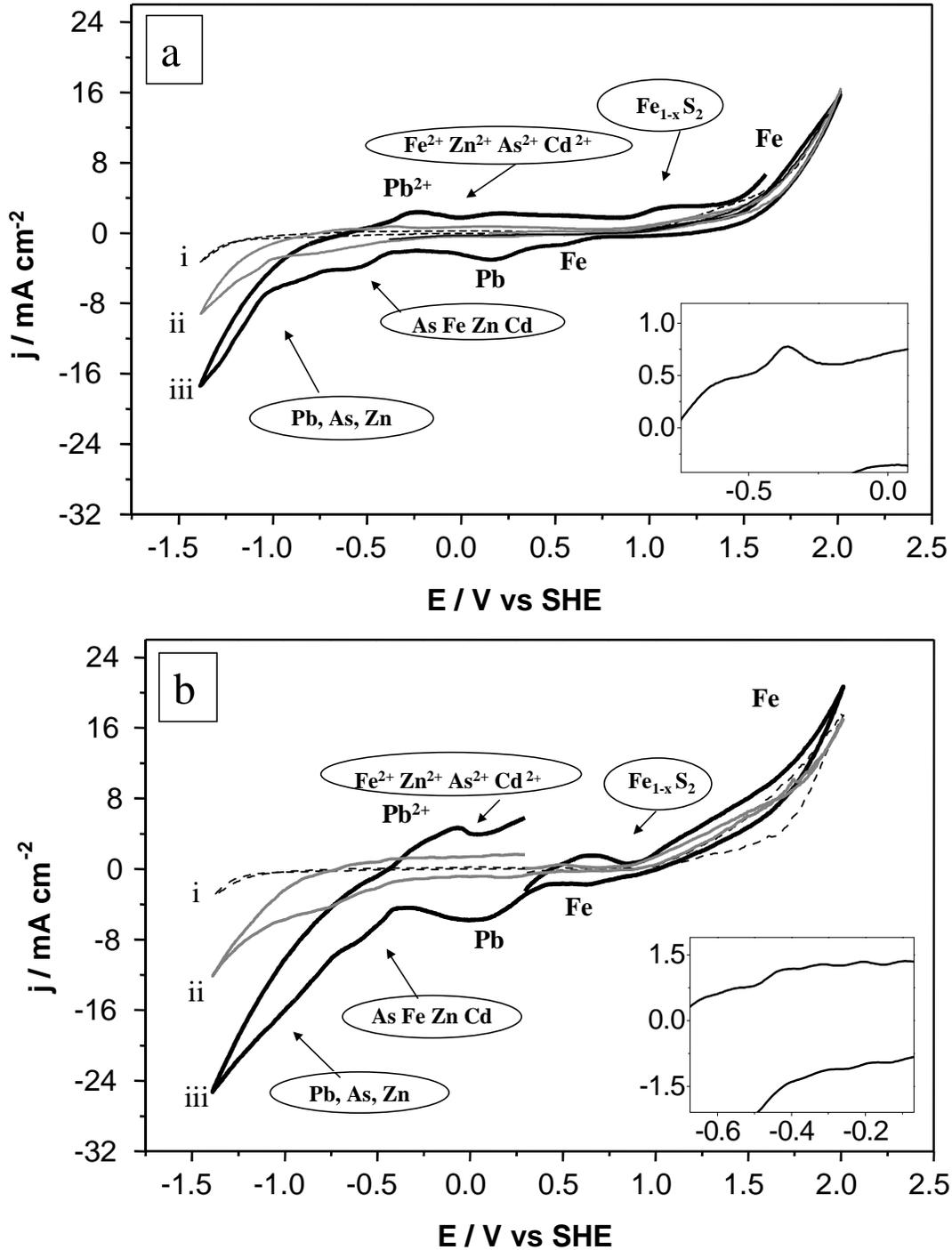


Figura 3.10 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del perfil 3 horizonte 1A (a) en un medio lixiviante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de $0.815 \text{ V} < E < 2.015 \text{ V}$, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4V .

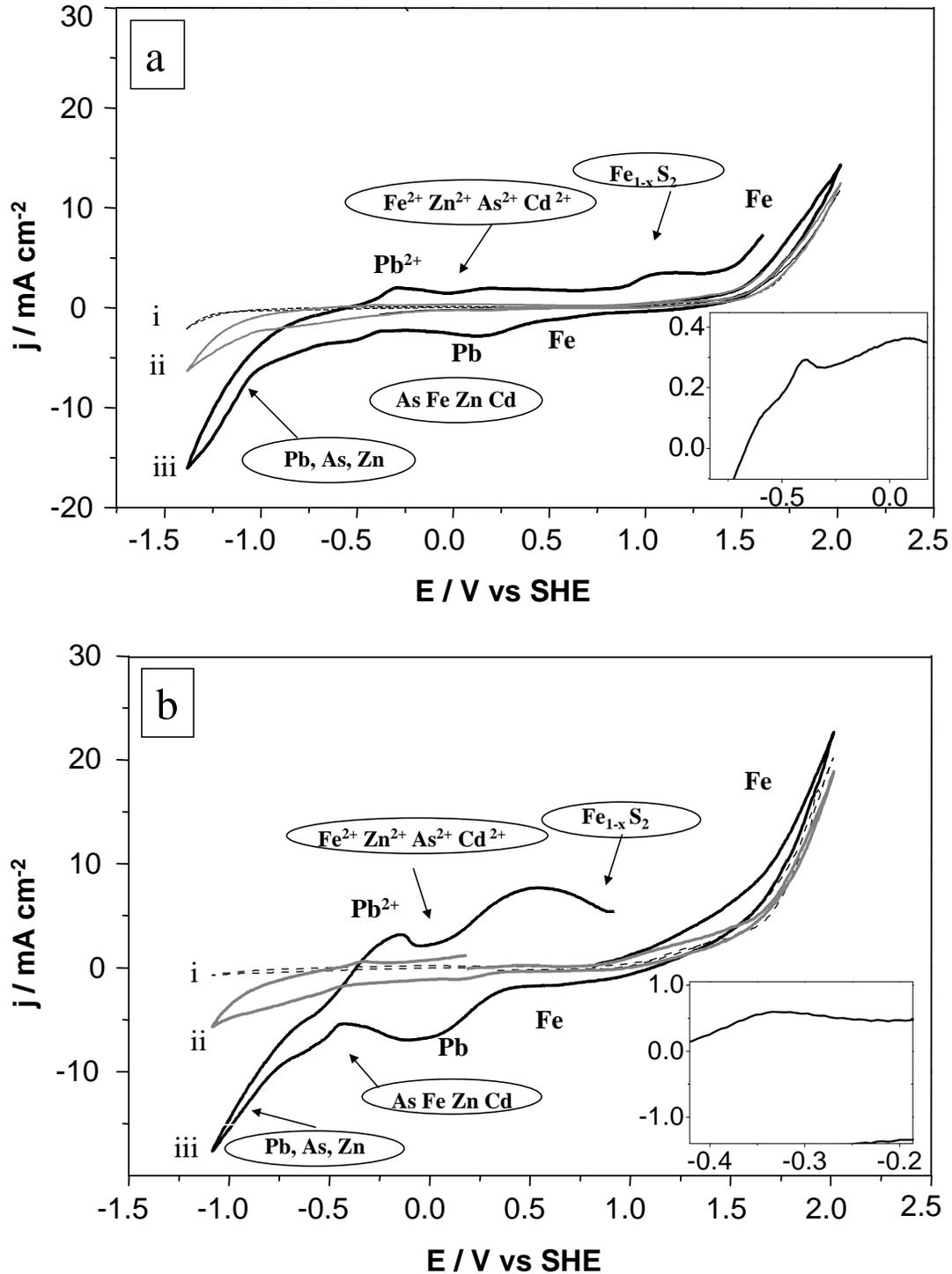


Figura 3.11 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del perfil 3 horizonte 1B (a) en un medio lixiviante y (b) en un medio en 0.1 M NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de $0.815 \text{ V} < E < 2.015 \text{ V}$, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4 V .

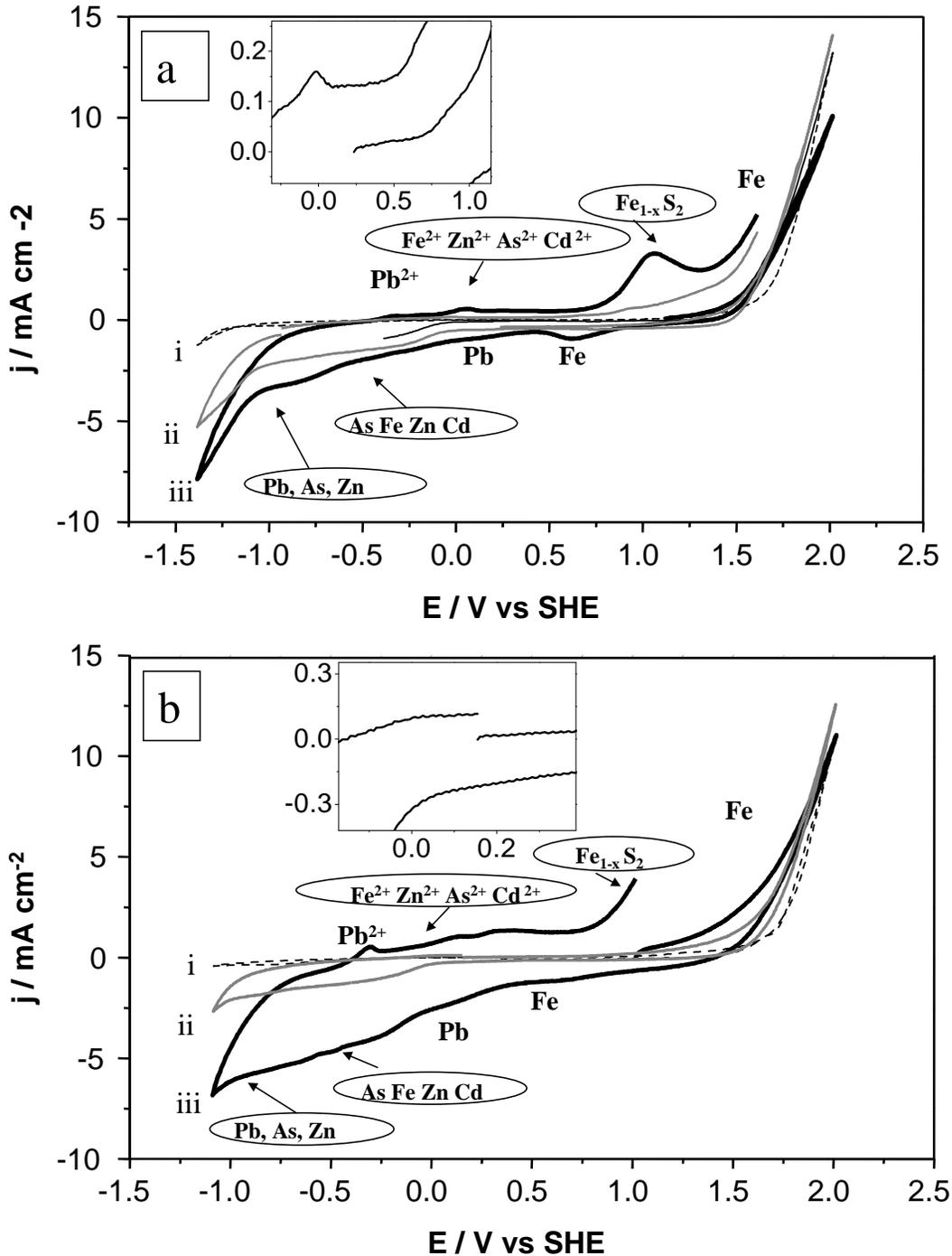


Figura 3.12 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del perfil 3 horizonte 2 (a) en un medio lixiviante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO₃ a una velocidad de barrido de 20 mV s⁻¹. El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de 0.815 V < E < 2.015 V, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4V.

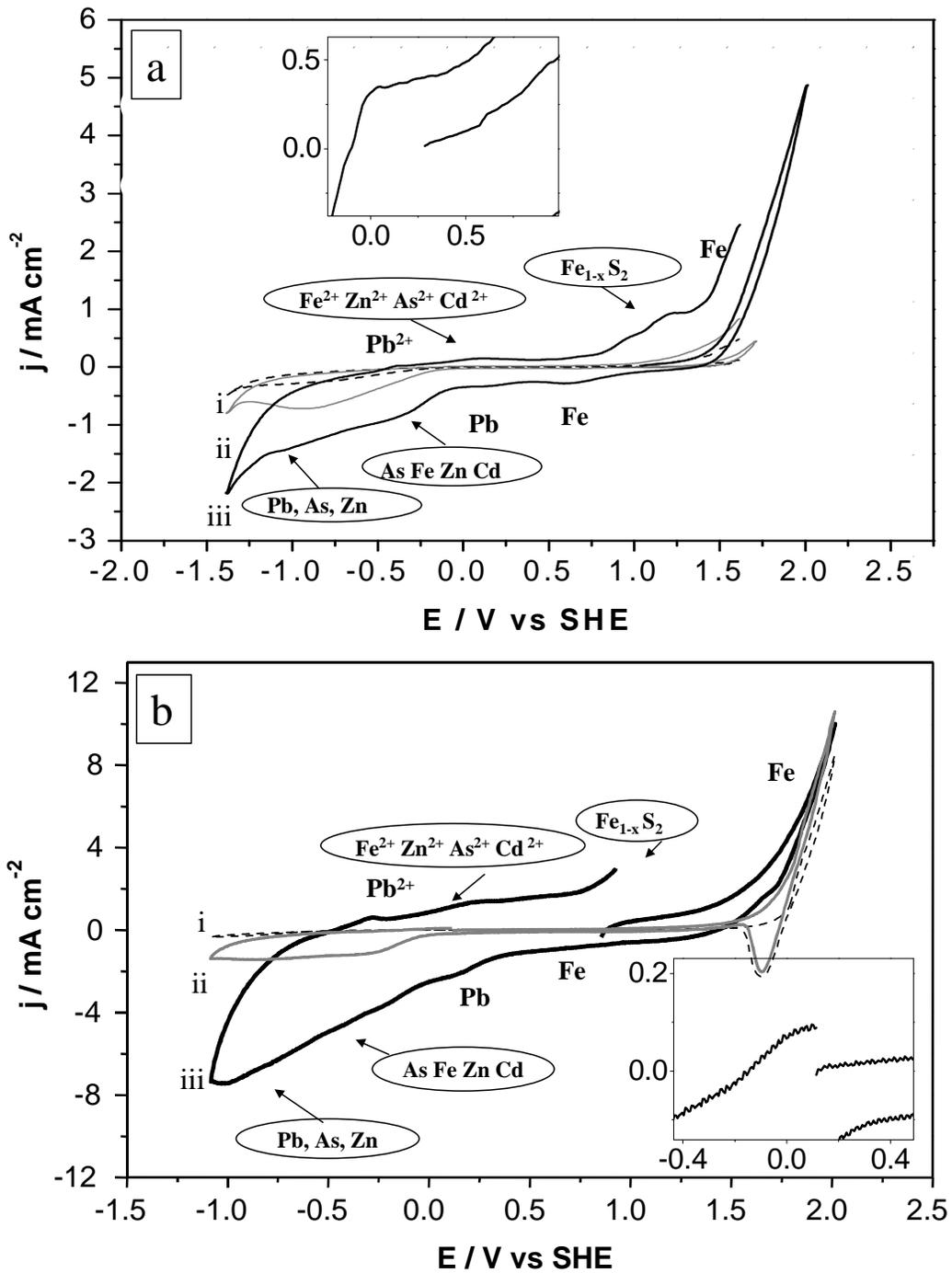


Figura 3.13. Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del perfil 3 horizonte 3 (a) en un medio lixiviante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de $0.815 \text{ V} < E < 2.015 \text{ V}$, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4 V .

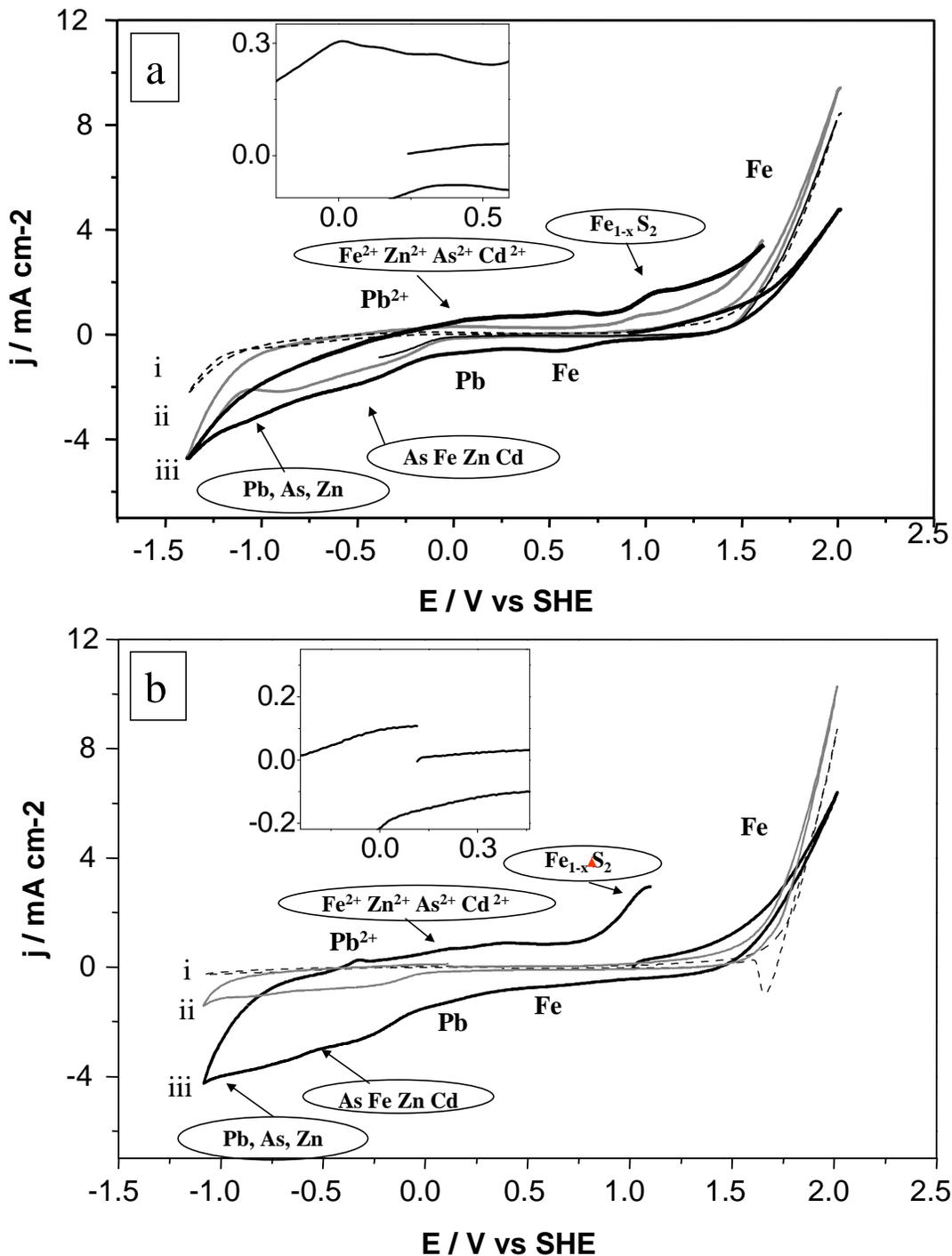


Figura 3.14. Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del Perfil 3 Horizonte 4 (a) en un medio lixiviante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO₃ a una velocidad de barrido de 20 mV s⁻¹. El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de 0.815 V < E < 2.015 V, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4V.

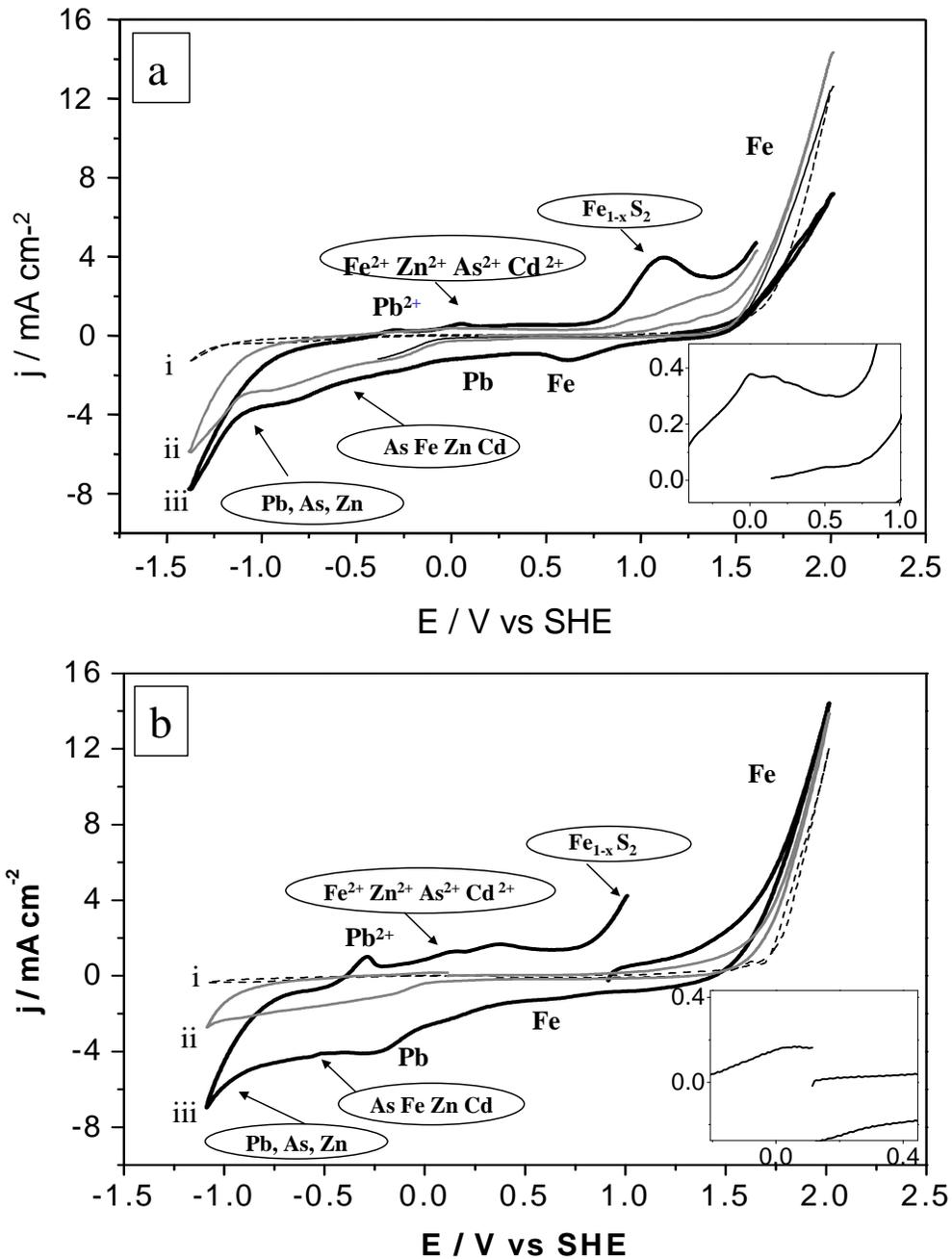


Figura 3.15 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del perfil 3 horizonte 5 (a) en un medio lixiviante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de $0.815 \text{ V} < E < 2.015 \text{ V}$, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4V .

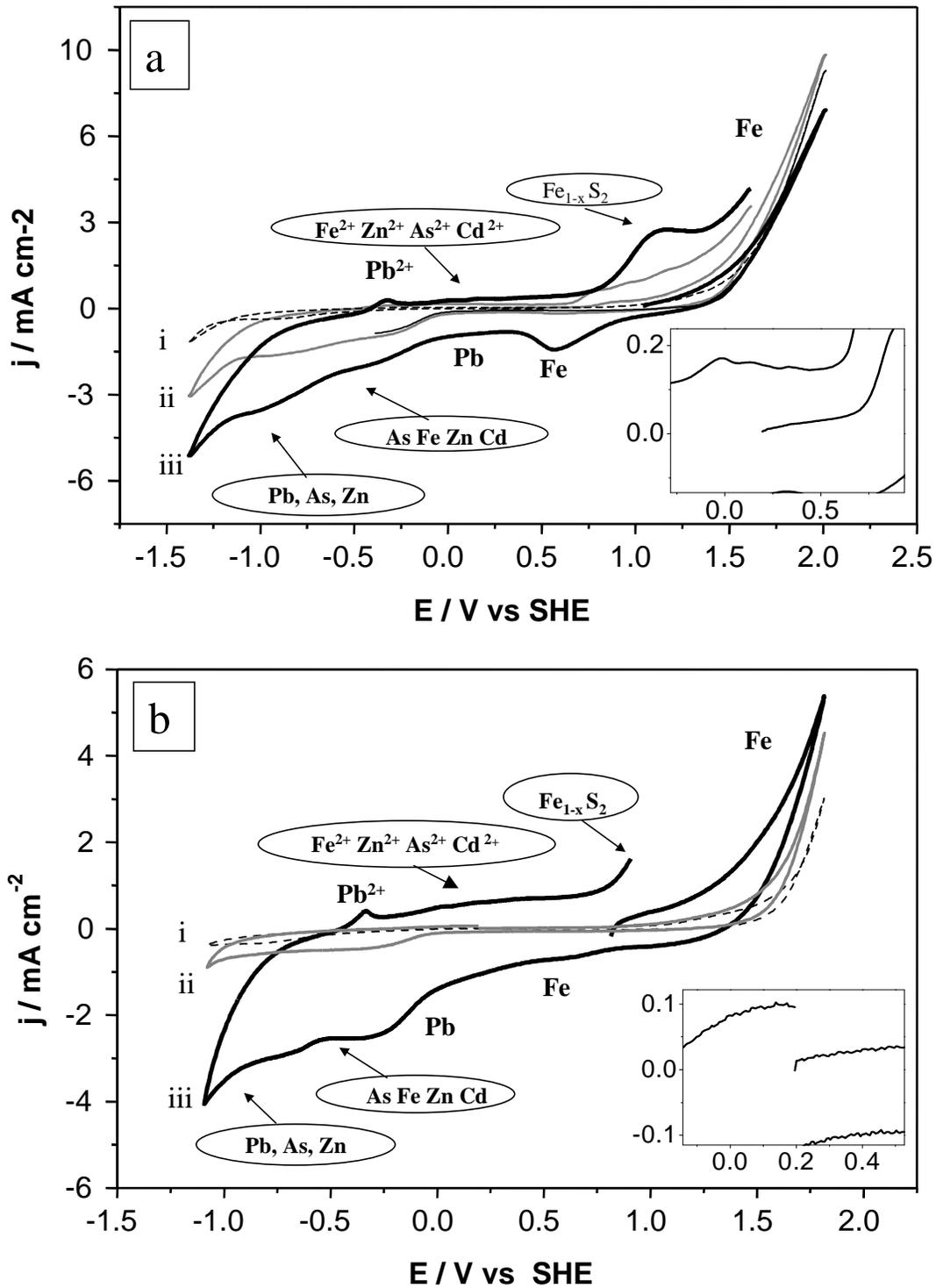


Figura 3.16 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC perfil 4 horizonte 1 (a) en un medio lixiviante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de $0.815 \text{ V} < E < 2.015 \text{ V}$, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4V .

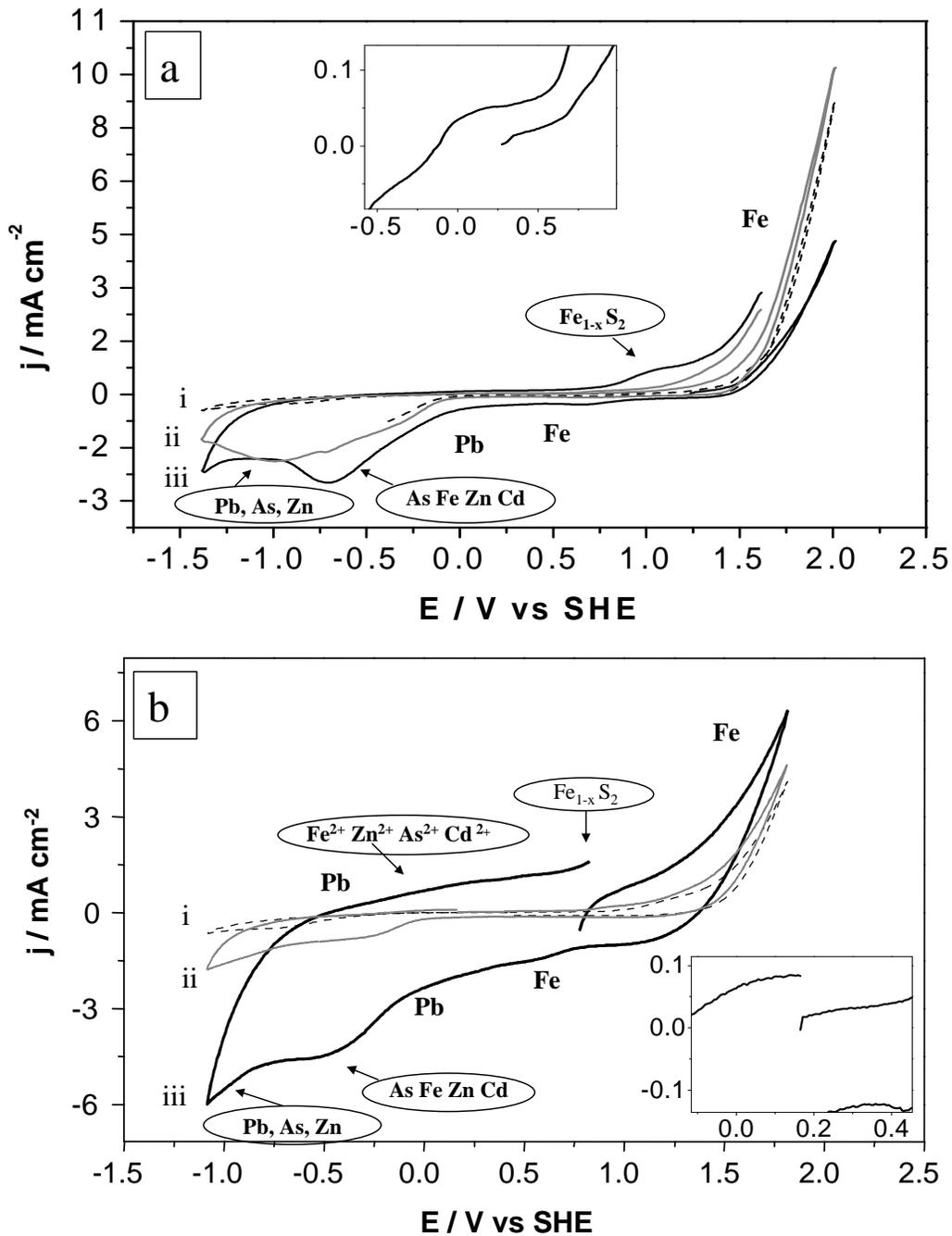


Figura 3.17 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del perfil 4 horizonte 2(a) en un medio lixiviante y (b) en un medio en 0.1 M NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de $0.815 \text{ V} < E < 2.015 \text{ V}$, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4 V .

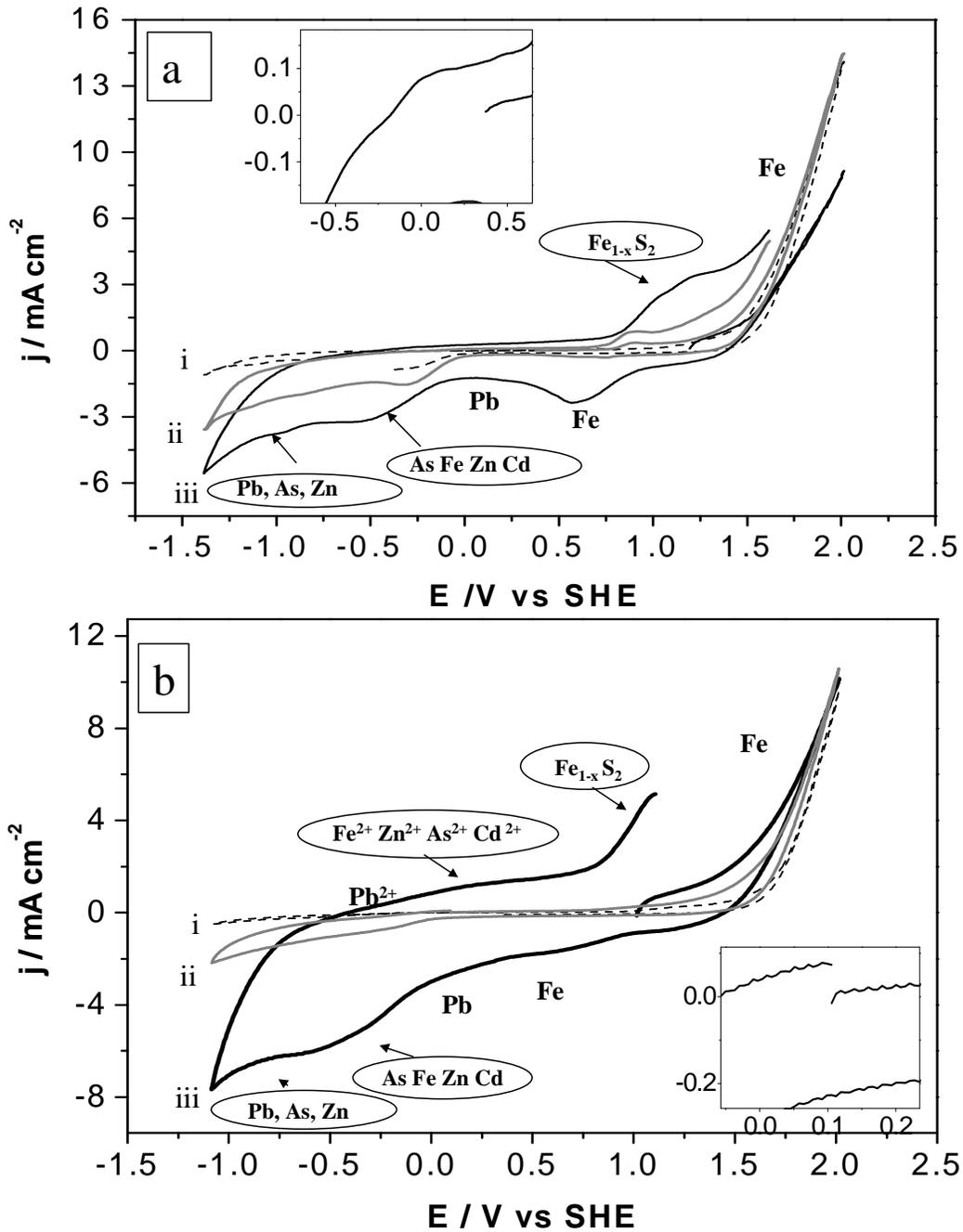


Figura 3.18 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del perfil 4 horizonte 3 (a) en un medio lixiviante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO₃ a una velocidad de barrido de 20 mV s⁻¹. El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de 0.815 V < E < 2.015 V, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4V.

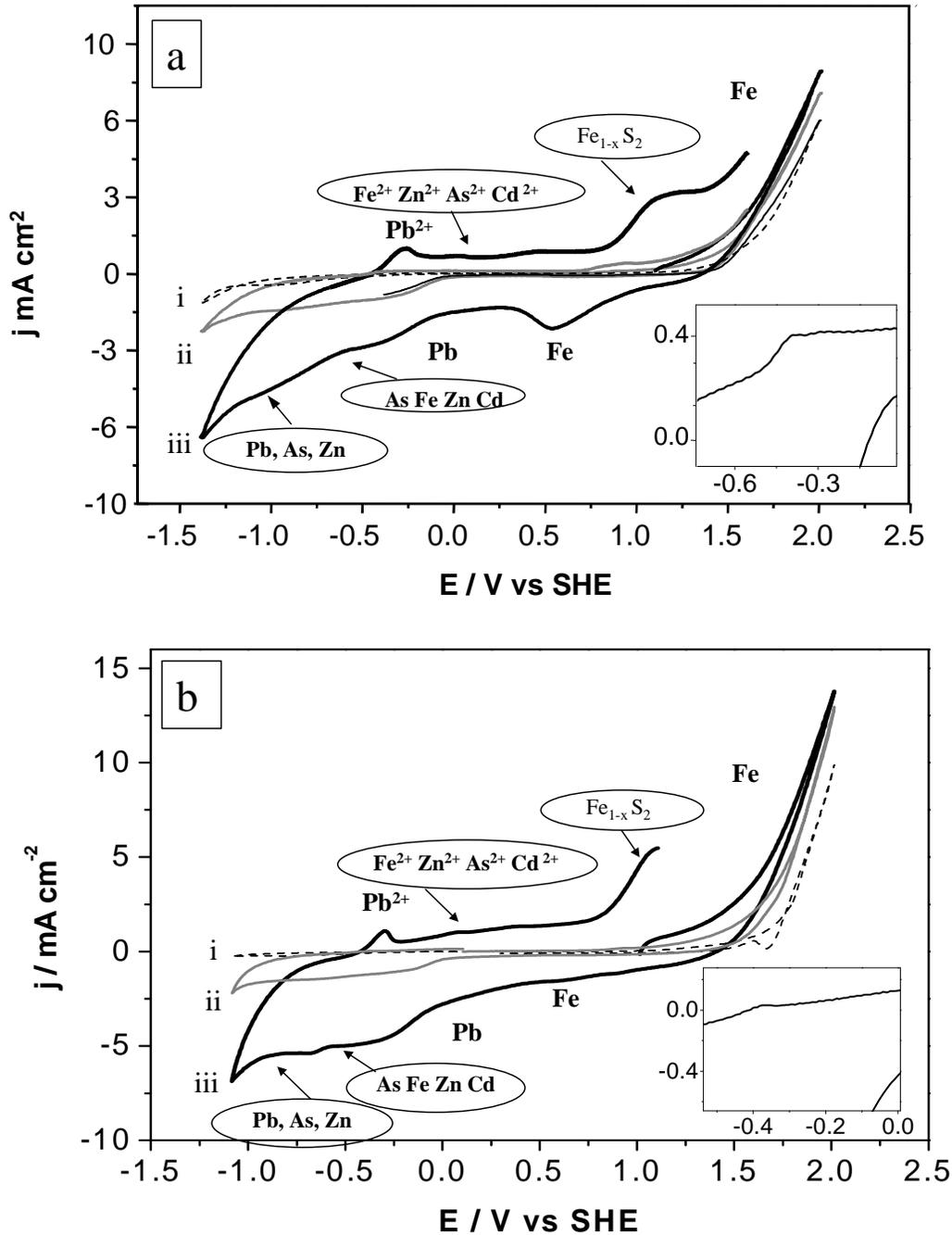


Figura 3.19 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del perfil 5 horizonte 1(a) en un medio lixiviante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de $0.815 \text{ V} < E < 2.015 \text{ V}$, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4 V .

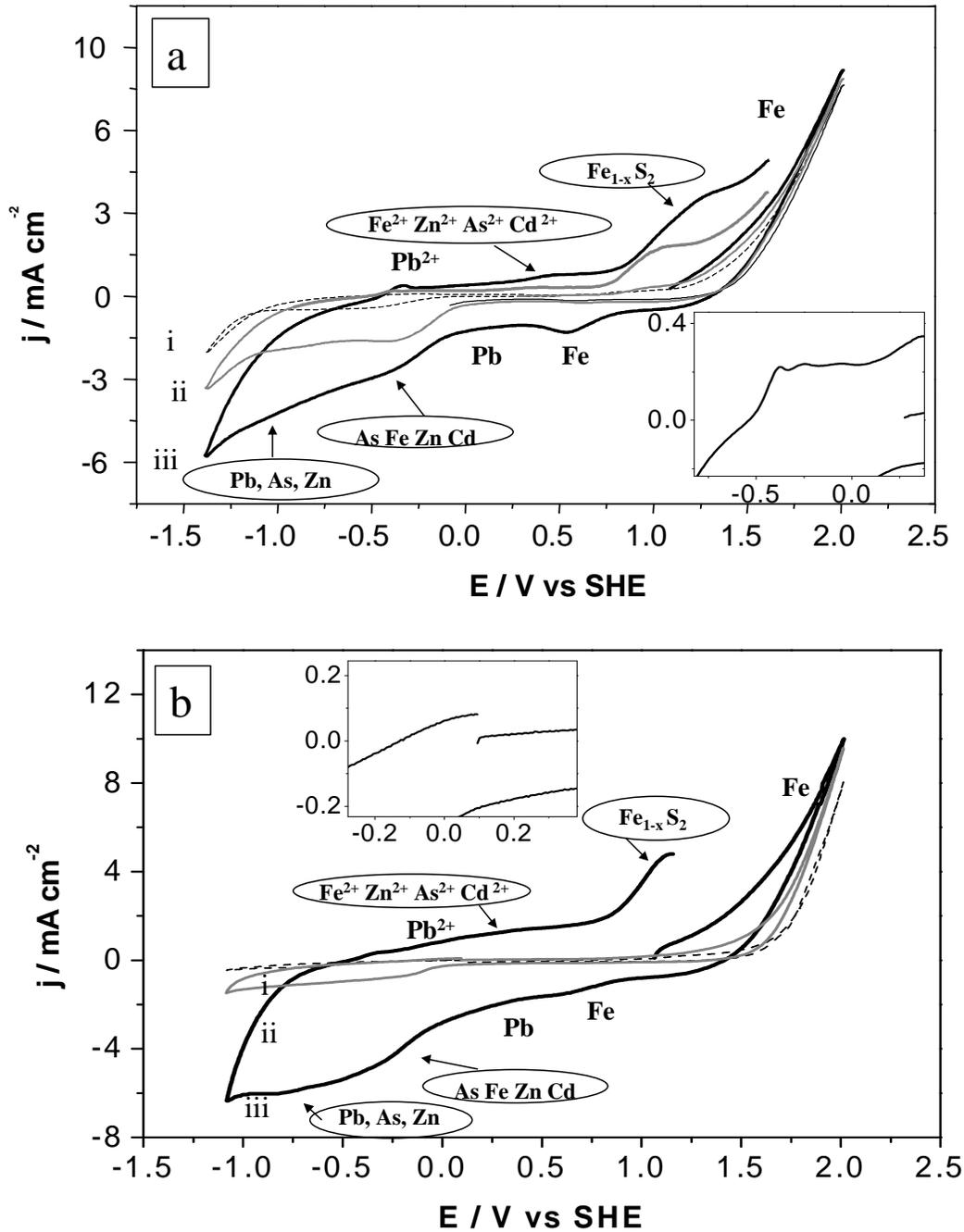


Figura 3.20 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del perfil 5 horizonte 2 (a) en un medio lixiviante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de $0.815 \text{ V} < E < 2.015 \text{ V}$, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4 V .

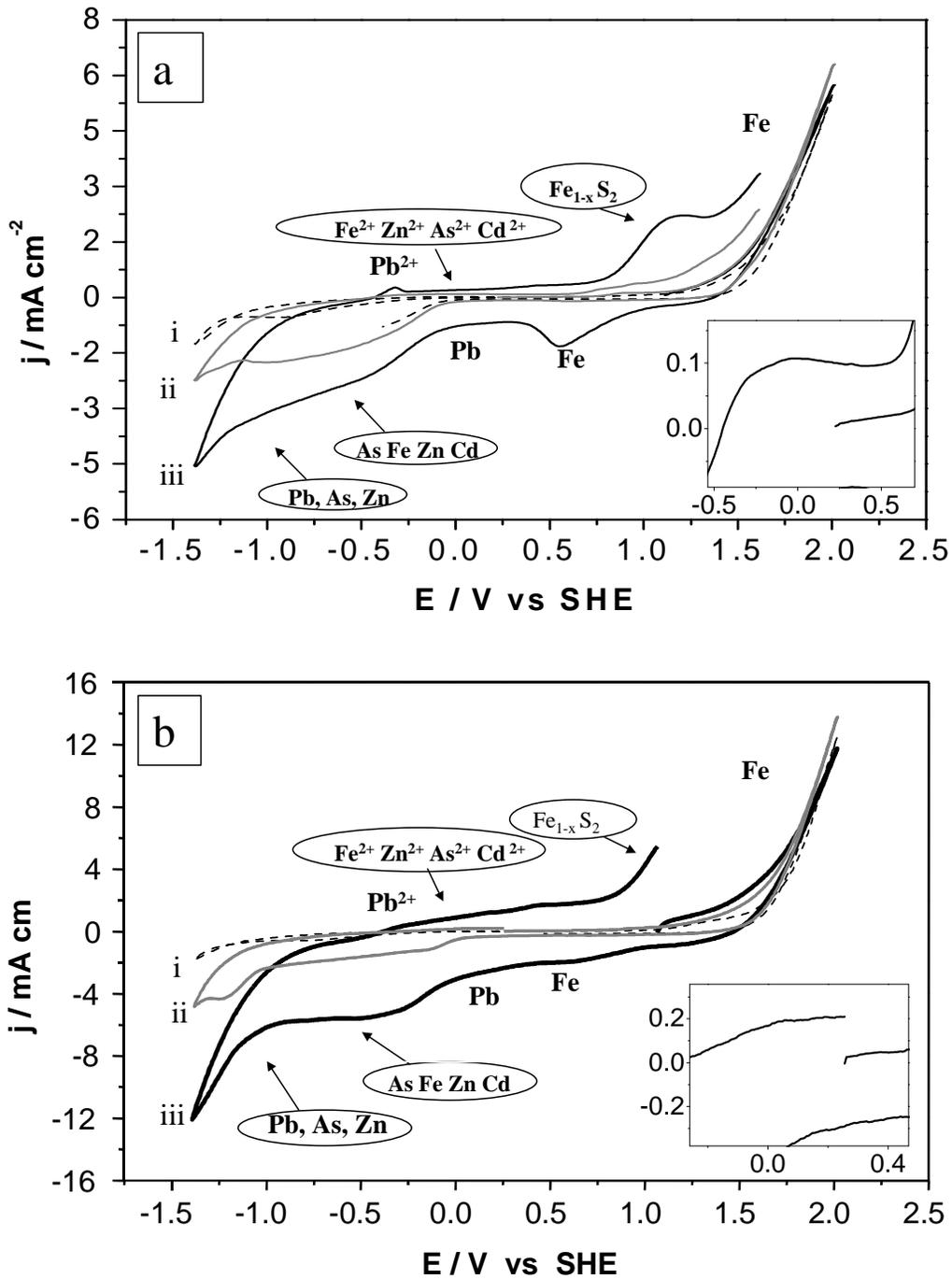


Figura 3.21 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del perfil 5 horizonte 3 (a) en un medio lixiviante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO₃ a una velocidad de barrido de 20 mV s⁻¹. El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de 0.815 V < E < 2.015 V, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4V.

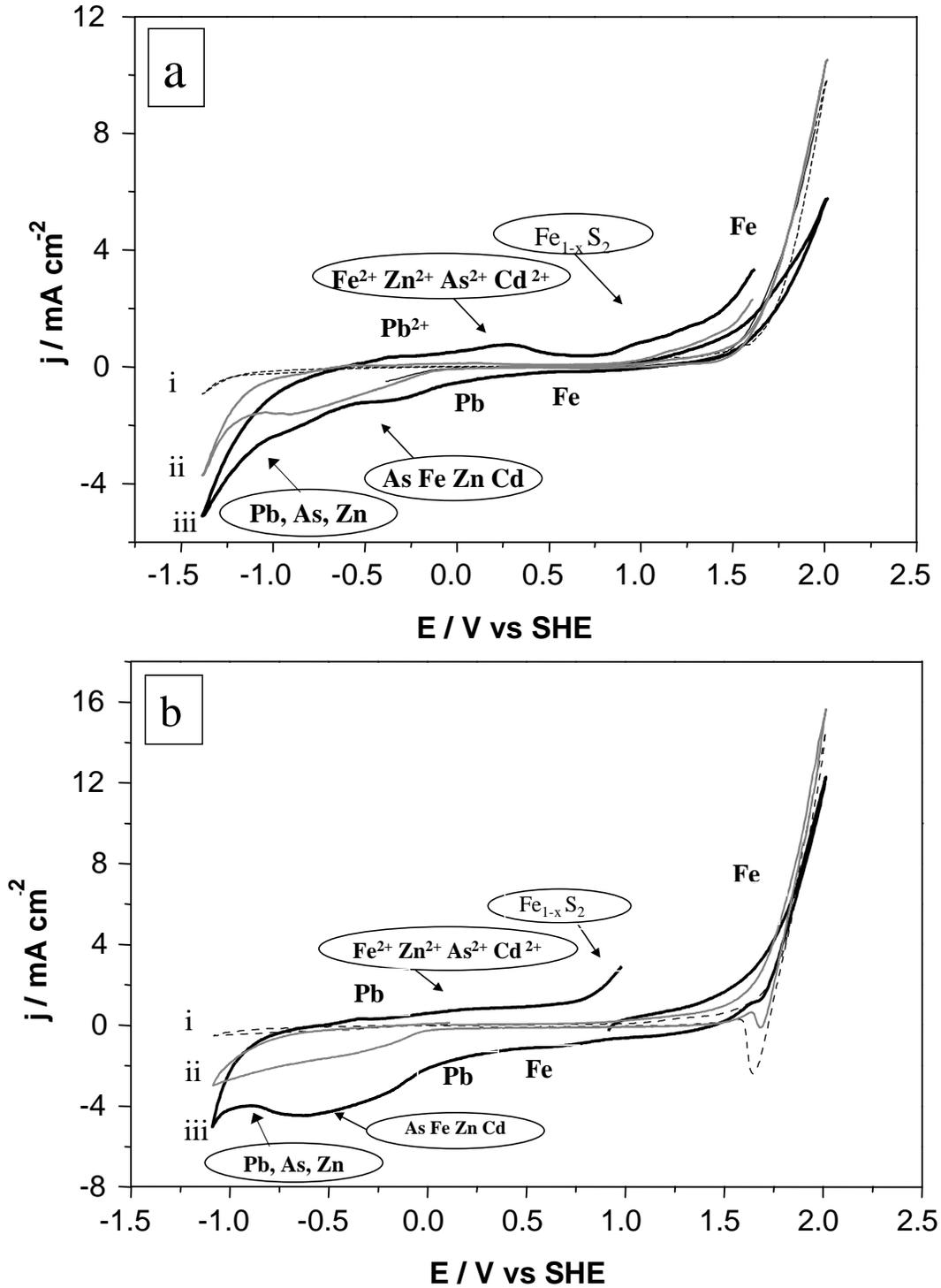


Figura 3.22 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del perfil 6 horizonte 1 (a) en un medio lixiviante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de $0.815 \text{ V} < E < 2.015 \text{ V}$, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4V .

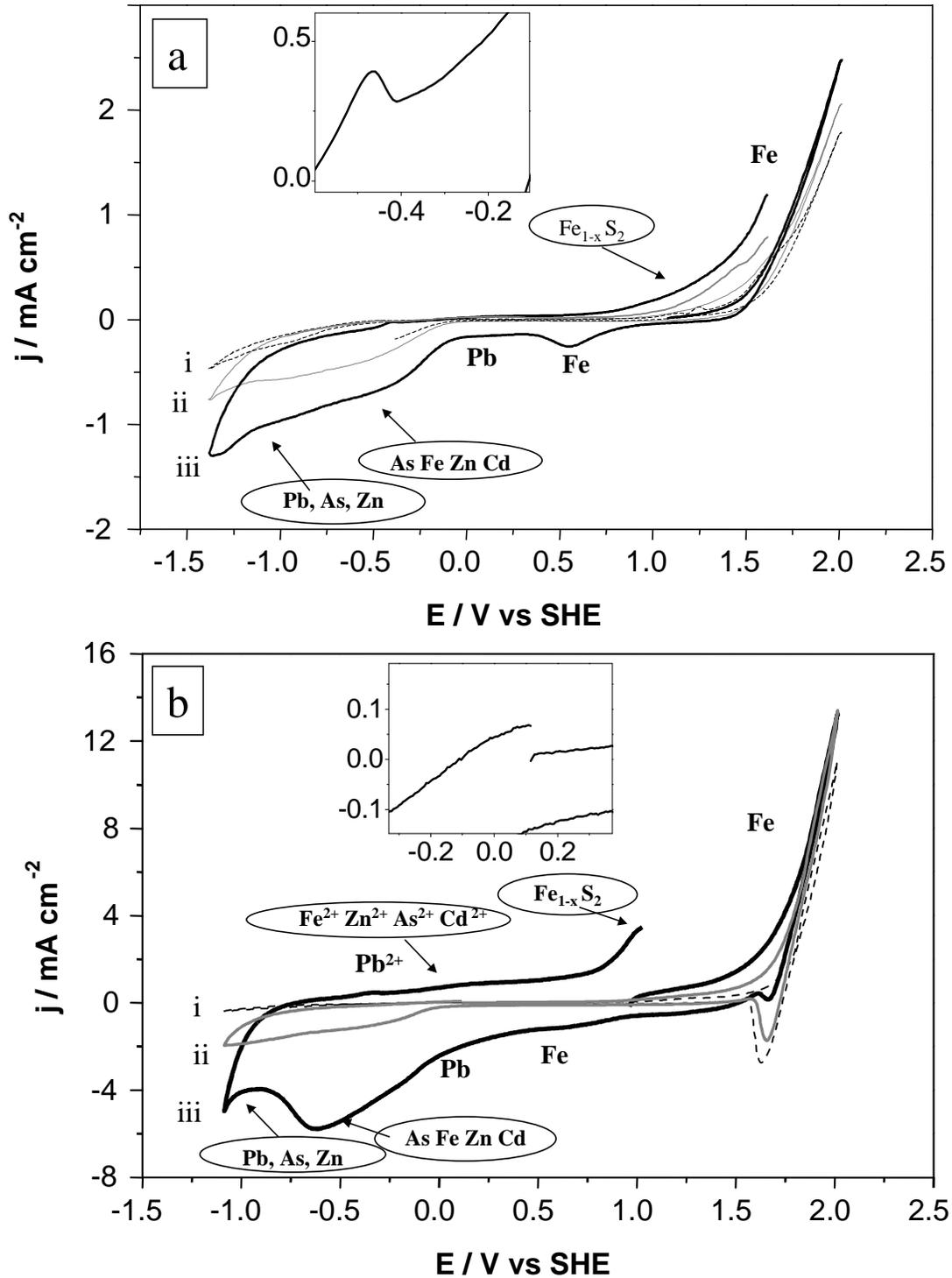


Figura 3.23 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC del perfil 6 horizonte 2 (a) en un medio lixiviante y (b) en un medio en 0.1 M de NaNO_3 a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de $0.815 \text{ V} < E < 2.015 \text{ V}$, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4V .



Con el fin de corroborar esta hipótesis se realiza un estudio de la relación de concentración entre el Pb y el As ($R = [Pb]/[As]$) con respecto a la densidad de corriente del pico de plomo en ambos medios para los horizontes A, 2, 3, 4 y 5, del perfil 3, para el horizonte 1 del perfil 4, para los horizontes 1 y 2 del perfil 2 y para los horizontes 1, 2 y 3, del perfil 5.

3.1.3. Estudio de la relación de $[Pb]/[As]$.

En la figura 3.24 se muestra la relación $[Pb]/[As]$ contra la densidad de corriente del pico de disolución de Pb proveniente de la lixiviación de la galena contenida en los suelos de Zimapán.

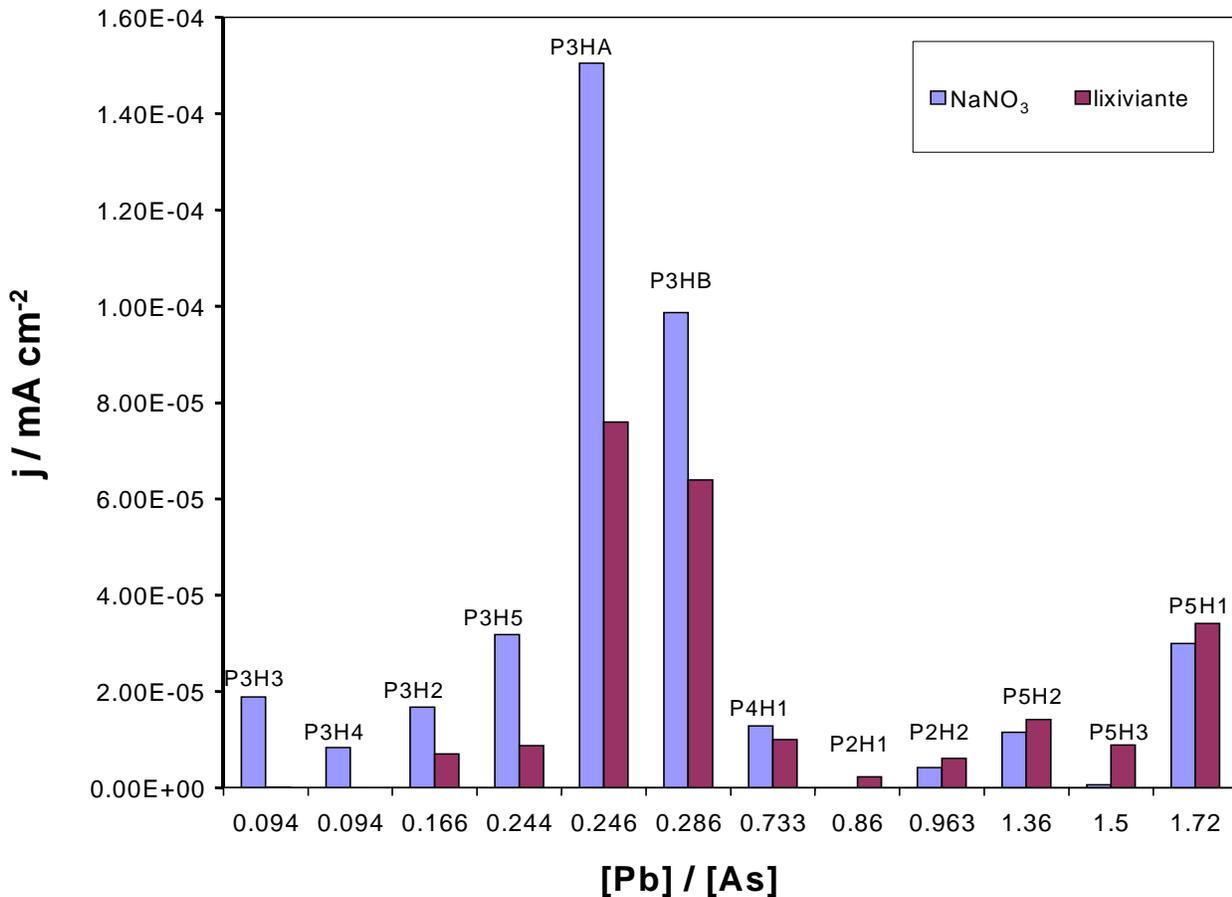


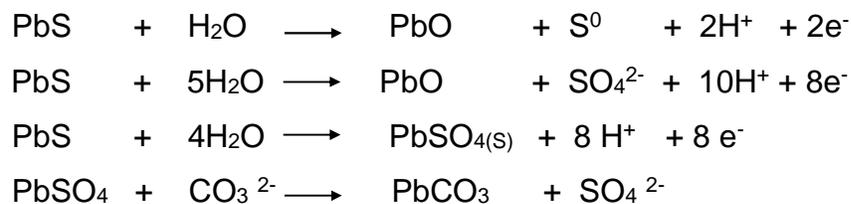
Figura 3.24 relación $[Pb]/[As]$ vs densidad de corriente del pico de disolución de Pb proveniente de la lixiviación de la galena contenida en los suelos de Zimapán.



En la figura 3.24 se observa que en una relación de [Pb]/ [As] de 0.0937 a 0.733 se tiene una mayor concentración de Pb en el medio estándar debido a que se presenta una mayor densidad de corriente del pico de disolución del Pb^0 a Pb^{+2} . Después de una relación de [Pb]/ [As] mayor a 0.733 se tiene que la concentración de Pb es mayor en el medio lixivante. Además se observa que para el medio lixivante la densidad de corriente de la disolución de Pb está relacionada con la concentración de plomo presente en los diferentes horizontes, debido a que la densidad aumenta o disminuye conforme aumenta la concentración de plomo en los suelos, tal como se reporta en la tabla 1 de los antecedentes de este trabajo.

Por otra parte, se observa que a pesar de que se tiene una relación de [Pb]/ [As] similar en el perfil 3 de los horizontes A y 5 (0.244 y 0.246), la densidad de corriente relacionada con la concentración de Pb es menor en el horizonte 5 en ambos medios. Este comportamiento es atribuido a que se tiene una menor concentración de Pb en este horizonte respecto al horizonte A, (1100 ppm para el horizonte 5 y 4500 ppm para el horizonte A).

Los resultados de la relación [Pb]/ [As] indican por una parte que la concentración de As interfiere en la lixiviación de Pb proveniente de los sulfuros minerales en ambos medios electrolíticos y por otra que se tiene diferentes mecanismos de reacción de la lixiviación de la galena, tal como lo determinó Urbano G., [3], presentándose una especie de PbO en el medio estándar y en el medio lixivante un especie de $PbCO_3$, de acuerdo con las siguientes reacciones





Como se comentó en los antecedentes, la bioaccesibilidad de As de 8901-10000 ppm. Fig.1 4 a) y para Pb de 7501-10000 ppm. (Fig.1.4 b) en los 6 perfiles del muestreo exploratorio indican que el Pb es el principal metal bioaccesible en estos suelos contaminados de Zimapán [11]. Los porcentajes de bioaccesibilidad pueden corresponder a la presencia de cerusita (PbCO_3) como principal portador de Pb proveniente de la lixiviación de la galena. Esta atribución se hace debido a que los estudios sobre los jales históricos dan como resultado la fase mineralógica de cerusita y los estudios electroquímicos de Urbano G., [3] confirma la presencia de ésta, cuando la galena es alterada por las condiciones de lixiviación del sitio minero.

Los resultados voltamperométricos en el medio lixivante de este trabajo indican que los principales EPT's (Pb y As) se encuentran bioaccesibles en los 6 perfiles del muestreo exploratorio en los suelos de Zimapán. Esta atribución se realiza al observar que en todos los horizontes de los 6 perfiles se tienen una respuesta de reducción de los EPT's.

Ante lo expuesto en el párrafo anterior se hace necesario realizar un estudio voltamperométrico de un muestreo sistemático, que abarque los suelos con y sin impactos de los jales histórico de esta región en horizontes superficiales, con la finalidad de determinar electroquímicamente si el Pb se encuentra bioaccesible en los suelos del distrito minero de Zimapán

3.2. Estudio voltamperométrico de los EPT's presentes en los suelos del distrito minero de Zimapán del muestreo sistemático.

En este trabajo se presentan sólo algunos de los horizontes del muestreo sistemático de malla cerrada (MC). Estos horizontes están denominados como MC-P6, MC-P14, MC-P2, MC-P16, MC-P17, MC-P21, MC-P22, MC-P26, MC-P31, MC-P38, MC-P39 Y MC-P43. En las figuras 3.25, 3.26, 3.27, 3.28 se muestran las



respuestas voltamperométricas después de concentrar los productos de oxidación de estos perfiles.

En las figuras 3.25 a 3.28, MC-P6, MC-P14, MC-P16, MC-P17, MC-P21, MC-P26, MC-P31, MC-P38, y MC-P39 se observan los picos de oxidación atribuidos a la disolución del Pb proveniente de la lixiviación de la galena. Además se observa que la densidad de corriente se incrementa conforme se tiene una mayor concentración de Pb proveniente de la galena en los suelos. Por otra parte, en las figuras 3.25 a 3.28 (MC-P2, MC-P22, MC-P43), no se observa el pico característico de la disolución del plomo metálico reducido en barrido catódico. Este comportamiento es debido a que en estos perfiles la concentración de Pb proveniente de la galena es menor y no es detectado por el electrodo de pasta de carbono.

Los resultados voltamperométricos del muestreo sistemático indican la presencia de la especie de PbCO_3 como principal compuesto dando lugar al plomo como principal elemento bioaccesible en los suelos del distrito minero de Zimapán. Estos resultados concuerdan con los mapas de dispersión obtenidos de los principales EPT's que se encuentran bioaccesibles a la población expuesta [11] (ver figura 4).

La información del estudio voltamperométrico de los suelos del muestreo sistemático cerrado indican la viabilidad de utilizar la técnica de electrodos de pasta de carbono para determinar la presencia de especies bioaccesibles como el plomo. Por otra parte, la densidad de corriente de oxidación o reducción característica de los EPT's puede ser utilizada para generar mapas de dispersión de EPT's de forma eficiente y económica.

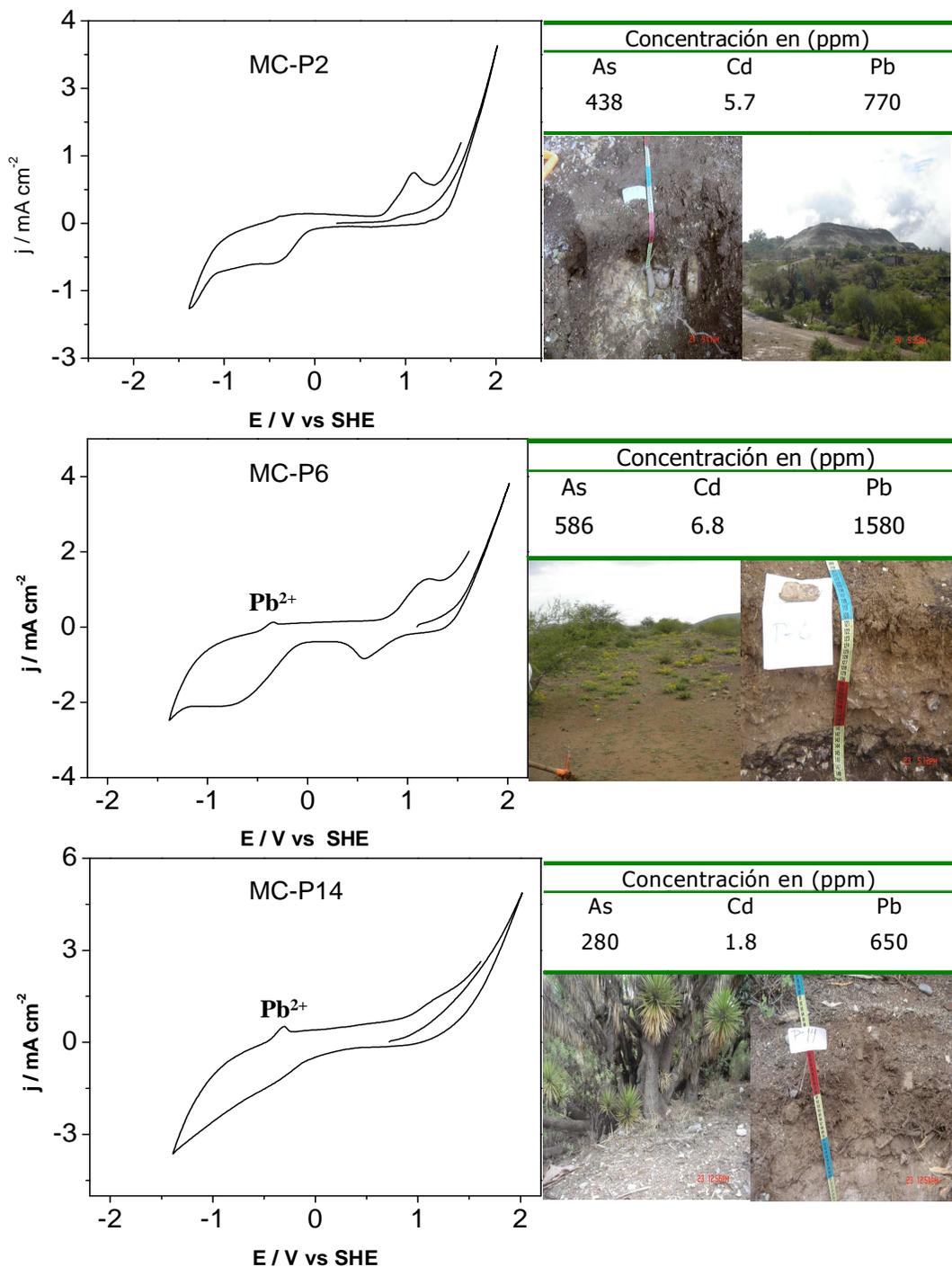


Figura 3.25 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC de los Perfiles MC-P2, MC-1P6, MC-P14 en un medio lixivante a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de $0.815 \text{ V} < E < 2.015 \text{ V}$, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4 V .

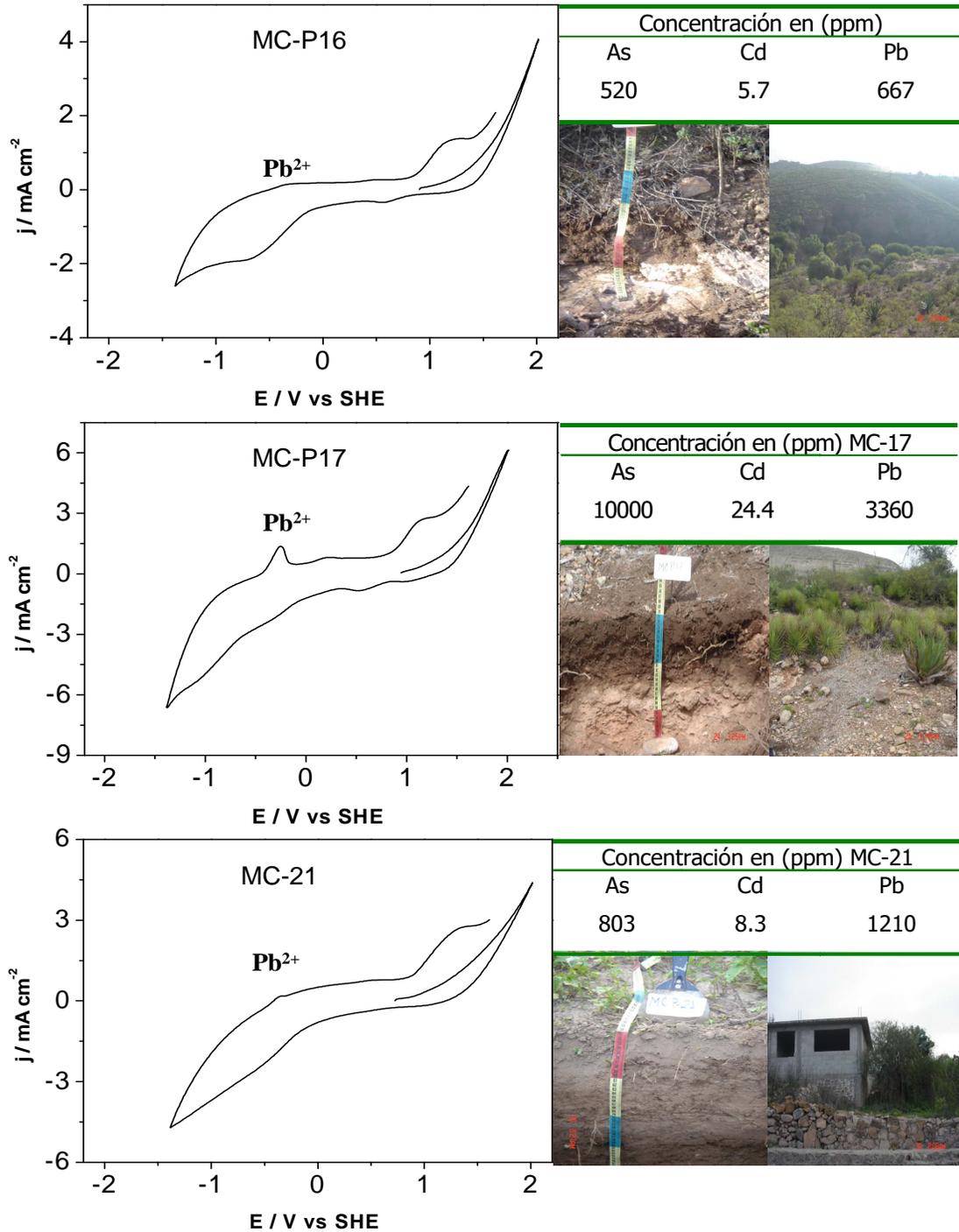


Figura 3.26 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC de los perfiles MC-16, MC-17, y MC-21, en un medio lixiviante a una velocidad de barrido de 20 mV s⁻¹. El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de 0.815 V < E < 2.15 V, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -2.015 V / SHE.

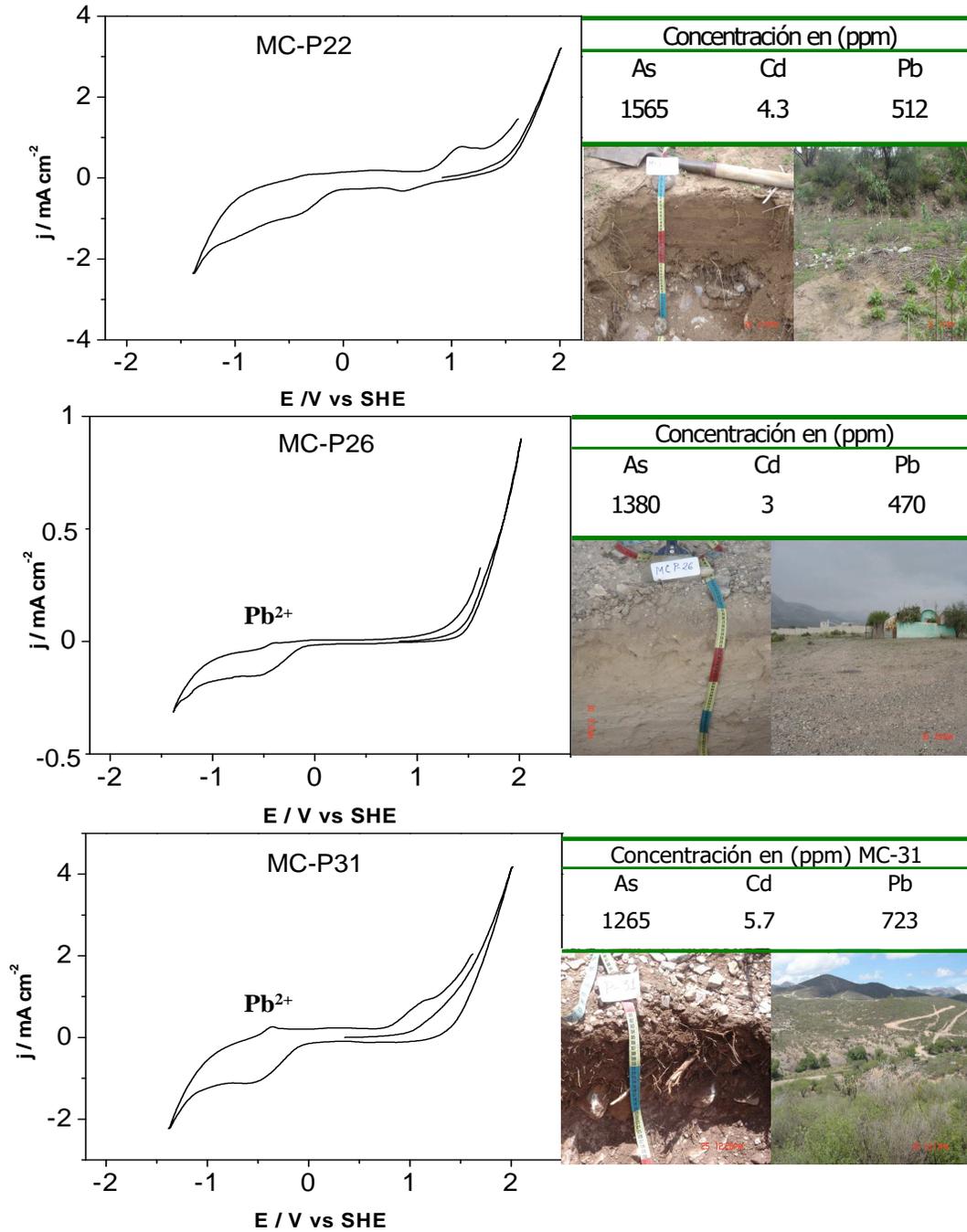


Figura 3.27 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC de los perfiles MC-22, MC-26, y MC-31 en un medio lixivante a una velocidad de barrido de 20 mV s⁻¹. El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de 0.815 V < E < 2.015 V, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4V.

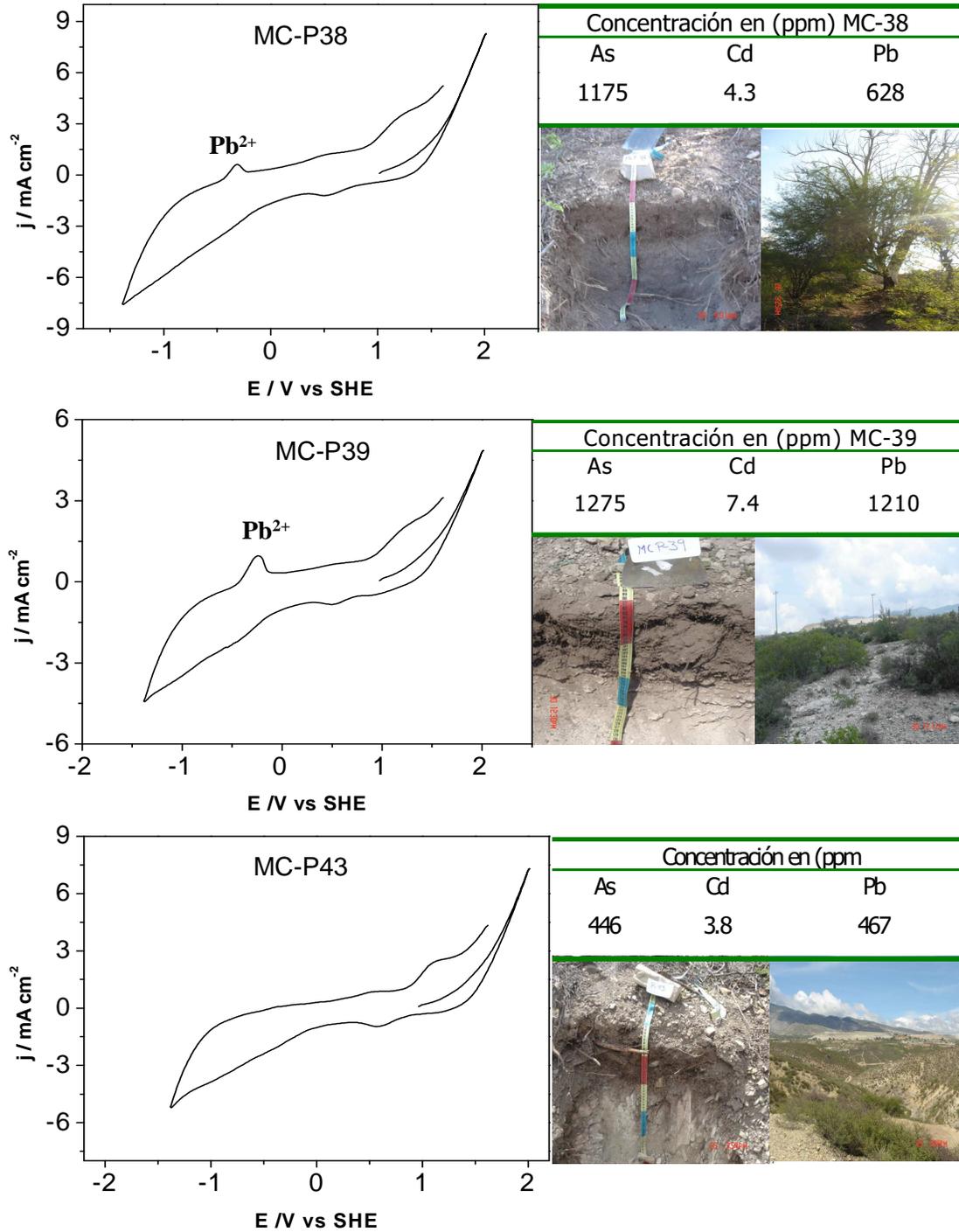


Figura 3.28 Voltamperogramas obtenidos sobre EPC de los perfiles MC-38, MC-39 y MC-43, en un medio lixivante a una velocidad de barrido de 20 mV s^{-1} . El barrido de potencial fue iniciado en dirección positiva, variando los potenciales anódicos de inversión en un intervalo de $0.815 \text{ V} < E < 2.015 \text{ V}$, manteniendo fijo el potencial de inversión negativo en -1.4 V .



CONCLUSIONES GENERALES

En este trabajo de investigación, se siguió la metodología propuesta por Canales C.,[1] en la caracterización de la reactividad en suelos con la finalidad de determinar la movilidad de los EPT's presentes en suelos contaminados por jales históricos del Distrito Minero de Zimapán, estableciéndose las siguientes conclusiones:

1. para mantener la consistencia adecuada de los electrodos de pasta de carbono es necesario agregar la cantidad suficiente de silicón durante su preparación la cual fluctúa entre 0.25ml y 0.3ml. Es importante mencionar que el electrolito debe ser preparado en el momento de su uso para mantener las mismas condiciones de trabajo. Así como mantener el PH del electrolito en 7.9.
2. El estudio Voltamperométrico de inversión iniciado en dirección anódica de los perfiles 3 y 4 permitió comprobar que es posible utilizar electrodos de Pasta de Carbono para evaluar la movilidad de EPT's en suelos con concentraciones altas y bajas de estos contaminantes.
3. El estudio Voltamperométrico con EPC iniciado en dirección anódica permitió determinar la movilidad de los EPT's en los 6 perfiles del muestreo exploratorio de los suelos de Zimapán.
4. El análisis de la densidad de corriente de los procesos de reducción y los picos de oxidación de Pb proveniente de la lixiviación de la galena de los 6 perfiles del muestreo exploratorio y la relación $[Pb]/[As]$ indican, por una parte que la concentración de As interfiere en la lixiviación de Pb proveniente de los sulfuros minerales en ambos medios electrolíticos y por otra parte que la especie que se encuentra bioaccesible en los suelos del distrito minero de Zimapán es la cerusita ($PbCO_3$).



5. El estudio voltamperométrico del muestreo sistemático de 12 perfiles de una malla cerrada muestran la viabilidad de emplear electrodos de pasta de carbono para determinar la presencia de especies bioaccesibles como el Pb. Además de que estos resultados pueden ser utilizados para generar mapas de dispersión de EPT's de forma rápida y económica, altamente rentable.

Los resultados de este trabajo dan la pauta para proponer alternativas de suelos contaminados por jales históricos en Zimapán, que resuelvan la problemática de los altos riesgos ecológicos y en la salud de la comunidad expuesta.

Los resultados de este trabajo de investigación nos dan la pauta para realizar estudios electroquímicos sistemáticos que permitan determinar la reactividad y movilidad de los EPT's, y así mismo proponer alternativas de electroremediación y restauración de suelos contaminados por residuos mineros.



GLOSARIO.

EPT's	Elementos que pueden provocar daños a la salud debido a una acumulación en la cadena trófica y/o exposición directa a medios contaminados, incluso estando en concentraciones muy pequeñas
Electro remediación	Tipo de remediación que consiste en la imposición de corriente en dos electrodos sumergidos previamente humedecidos.
Residuos mineros	Desechos generados por la industria minera (terrero y escombreras).
EPC	Eléctrodos de pasta de carbono.
Cerusita	Es un mineral consistente en carbonato de plomo ($PbCO_3$).
Muestreo sistemático	Es un muestreo que se basa en el mallado del terreno a partir de mapas GPS, ya sea abierto o cerrado.
Bioaccesibilidad	Indicador de biodisponibilidad en humanos a través del diagnóstico de la extracción de elementos tóxicos solubles en condiciones que semejan el tracto gastrointestinal".
Horizontes superficiales	Es la capa superficial del suelo expuesta al medio ambiente.
Mapas de dispersión	Es la distribución de concentración de los elementos en la muestra.
Erosión	Proceso de sustracción o desgaste por acción de procesos geológicos exógenos como las corrientes superficiales de agua o hielo glaciar, el viento, los cambios de temperatura o la acción de los seres vivos
Intemperismo	Proceso de descomposición que sufre un metal al estar expuesto a las condiciones del medio ambiente
Metaloides	Es la parte límite entre los metales y los no metales, los cuales presentan características de metal y no metal



Movilidad	Procesos químicos que incluyen interacciones químicas con el ambiente superficial o cercano a la superficie y la capacidad de movimiento dentro de los fluidos después de la disolución.
Interacciones Electroquímica	Transferencia (química electrónica o electrónica) entre iones. Parte de la química que trata de la relación entre las corrientes eléctricas y las reacciones químicas, y de la conversión de la energía química en eléctrica y viceversa.
Reactividad	La capacidad de reaccionar de un compuesto
Skarn	Formaciones geológicas típica de la zona de Zimapán
Pirita	Mineral del grupo de los sulfuros cuya fórmula química es FeS_2 . Tiene un 53,4% de azufre y un 46,4% de hierro
Magnetita	Mineral y mena común del hierro, cuya composición es Fe_3O_4 .
Calcopirita	Mineral de cobre más ampliamente distribuido y una de las principales fuentes del mismo. Se compone de sulfuro de cobre-hierro ($CuFeS_2$).
Esfalerita	Mineral compuesto en su mayor parte por sulfuro de cinc (ZnS).
DAR	Drenaje generado por la oxidación natural de sulfuros minerales contenidos en rocas o productos minerales, cuando estos son expuestos a la acción combinada de agua y oxígeno atmosférico.
ABA	Métodos de conteo ácido-base
Galena	Mineral que consiste en sulfuro de plomo (PbS)
Electrodisolución	Solubilidad causada por algún compuesto cuando se impone una corriente
Reproducibilidad	Capacidad que tenga una prueba o experimento de ser reproducido o replicado.



Malla	Procedimiento que se realiza en la determinación o intervalo del partícula
Electrolito	Sustancia que contiene iones libres, los que se comportan como un medio conductor eléctrico.
Densidad de corriente	Es la corriente que pasa a través de un área unitaria perpendicular a la dirección de la corriente
Voltamperometría	Es una técnica que aportan información acerca de los procesos de oxidación y reducción, que ocurren en la interfase (electrodo-solución), y permiten conocer, tanto la reversibilidad, como las etapas en donde se llevan a cabo dichos procesos.
Cronoamperometría	Es una técnica potencioestática, en la cual se establece un pulso de potencial controlado durante cierto tiempo y se registra el cambio de la corriente con respecto al tiempo.
Disolución	Mezclas homogéneas de dos o más sustancias.
geodisponibilidad	Porción del contenido total de un elemento que puede ser liberada al ambiente por efecto de procesos mecánicos, químicos y/o biológicos.
Dispersión	Procesos físicos que determinan el transporte y depósito de las partículas portadoras de los EPT's a través del aire y/o agua, provocando su sedimentación
Biodisponibilidad	Cantidad menor que el 100% del total de un elemento químico o compuesto al cual un organismo esté expuesto.



REFERENCIAS

1. Canales. C. C., Tesis de Licenciatura caracterización electroquímica de la reactividad de elementos potencialmente tóxicos (EPT's) presentes en suelos contaminados del distrito minero de Zimapán UAEH (2007).
2. Ahlberg, E, and Àsbjörnsson, J., 1993. Carbon paste electrodes in mineral processing an electrochemical study of galena. *Hydrometallurgy* 34, 171-185.
3. Urbano R. G., Galvanic interactions between galena-sphalerite and their reactivity. *J.minpro.2006.09.004*. (2006).
4. [www. elcomercio.com.pe](http://www.elcomercio.com.pe). 2008
5. Moreno T. R, Téllez H. J., Monroy F. M. Caracterización de Jales Sulfurosos del Estado de Hidalgo como apoyo a la identificación de Modelos Geoambientales. Memoria XXV Convención internacional de Minería de la AIMMG en CD_ROM. Acapulco (2003)
6. Marcus J. Mining Environmental handbook, Effects of mining on the environment and America Environmental controls on mining, Imperial College Press, San Mateo U.S.A. (1997).
7. Nriagu, J. O. and Pacyna J. M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metal. *Nature*, 333: (1988),134-139.
8. Knox A. S. (formerly A. Chlopecka), Gamerainger, A. P., Adriano, D. C., Kolka, R.K., and Kaplan, D.I., Sources and practices contributing to soil contamination, in *Bioremediation of Contaminated Soils*, Am. Soc. Agron., Madison,WI, 53, 1999
9. Echarri P. L., 2005.,Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente. Libro electrónico,
[http://www.esi.unav.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/09ProdQui/120MetTox htm](http://www.esi.unav.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/09ProdQui/120MetTox.htm).
10. Jiménez A. Evaluación de la dispersión y movilidad de elementos potencialmente tóxicos (arsénico, plomo y cadmio) en suelos de Zimapán, Hgo. Protocolo de Maestría de la UASLP (2005).



11. Moreno T. R., Tesis de doctorado Evaluación Geoquímico ambiental de residuos (jales) de mineralizaciones polimetálicas del estado de Hidalgo, México UASLP (2005).
12. Nava J. L., Oropeza M. T. and Gonzalez I. Oxidation of Mineral Species as a Function of the Anodic Potential of Zinc Concentrate in Sulfuric Acid. *Electrochim. Society.* 151(7), (2004),B387-B393.
13. Cisneros I., Oropeza M., González I.. An electrochemical study of galena concentrate in perchlorate medium at pH 2.0: the influence of chloride ions. *Electrochim. Acta*, 45 (2000), 2729-2741.
14. Ahlberg E., and Åsbjörnsson J. Carbon paste electrodes in mineral processing: an electrochemical study of sphalerite. *Hydrometallurgy* 36, (1994), 19-37.
15. Monroy R and Gonzalez I. Surface characterization of arsenopyrite in acidic medium by triangular scan voltammetry on carbon paste electrodes. *Hydrometallurgy* 46 (1997) 303 – 319
16. G. Urbano R. G., Protocolo de Doctorado en Ciencia de los Materiales caracterización electroquímica de los jales históricos del distrito minero de Zimapán UEAH (2008).