



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**Evaluación de las Afectaciones al
Ambiente Relacionadas con el Manejo
de pilas Portátiles Gastadas**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

Q U Í M I C A

P R E S E N T A :

ALEXANDRA LARA CABAÑAS



MÉXICO, D. F.

2008



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.

Jurado Asignado:

Presidente:	Margarita Gutiérrez Ruiz
Vocal	Rafael Moreno Esparza
Secretario	María Isabel Gracia Mora
1er Suplente	Imelda Velásquez Montes
2º Suplente	José Antonio Bautista Martínez

Sitio en donde se desarrolló el tema:

Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México

Asesor del tema:

M. en C. Margarita Gutiérrez Ruiz

Supervisor Técnico

Dr. Francisco Martín Romero

Sustentante.

Alexandra Lara Cabañas



A Dios

A mis padres

A mi hermana y a su nueva familia

Agradecimientos

Les agradezco a mis padres Leonarda Cabañas Albarrán y Alejandro Lara Ríos por haberme apoyado de manera incondicional en todas mis decisiones, aunque hayan conllevado muchos sacrificios; nunca terminaré de pagarles por todo lo que han hecho por mí.

A la M. en C. Margarita Gutiérrez por haberme dado la oportunidad de colaborar en sus proyectos, que me han hecho crecer en el aspecto académico y personal.

Al Dr. Francisco Romero por su apoyo técnico en la realización de este trabajo.

A Heriberto Rosas y Guillermo Pérez por su apoyo en la investigación documental y en la edición de este trabajo.

A la familia Pavón Jiménez por haberme recibido con cariño en su hogar por todos estos años como hija y hermana.

Al Profr. Guillermo Molina Gómez por sus enseñanzas, sus consejos y su paciencia, y a su familia (Sra. Ina y Alex).

A la Profra. Juana Ku Colli y al Q.B.B. Alejandro Euan Canto por haberme inculcado el gusto por la química.

A Sebastián, Néstor, Bernardo, Raúl (Rulo), Nancy, gracias por el esfuerzo de conservar nuestra amistad intacta después de tantos años, pero sobre todo por el afecto que me han brindado.

A los que fueron y aún son integrantes de LAFQA por ser unos excelentes compañeros y amigos: (niño) Daniel, Dora, Memo, Gerardo, Águeda, Noemí, Alex, Rosy, César, Hedgar, Nancy, Arturo.

Oscar, merci pour tout ce qui est vécu, *toujours je t'aimerai*

A mis amigos de la Facultad de Química que han estado conmigo en estos años, tanto dentro como fuera de las aulas, que por ser tantos no los menciono para no olvidarme de alguno.

A mis amigos de la Facultad de Ingeniería y agregados culturales como yo: Hugo, Iván, Marisol, Luis, Fede, Eric, René, Briz, John, Esperanza.

"Alicia se rió: "no tiene sentido intentarlo", dijo: "no se puede creer en cosas imposibles" "Yo mas bien diría que es cuestión de práctica" dijo la reina. "Cuando yo era joven, practicaba todos los días durante media hora. Muchas veces llegue a creer en seis cosa imposibles antes del desayuno"

(Lewis Carroll, Alicia en el País de las Maravillas)

RESUMEN

Se presenta un modelo en el cual se calculó el aporte de metales como zinc, manganeso, níquel, cadmio, mercurio y plomo contenidos en pilas portátiles usadas, en el flujo de los desechos sólidos municipales en México; estos resultados se compararon con datos generados en otros países.

Entre otros resultados se encontró, con base en datos generados en el año 2000 al 2004, que de todas las pilas comercializadas de manera legal el 94 % se consideran no peligrosas (dióxido de manganeso, zinc-carbón, litio, zinc-aire) y el 6 % de pilas peligrosas (níquel-cadmio y óxido de mercurio). Con los cálculos hechos en el modelo, suponiendo una contribución única por las pilas portátiles en el flujo de la basura, se encontró que la concentración total de zinc en este medio es de 2,715 g/ton, 7,941 g/ton de manganeso 72 g/ton de níquel y 1.13 g/ton de mercurio, y el aporte de estos metales por las pilas es de 3.5 %, 1.17 %, 12.5 y 58.4 % respectivamente.

Suponiendo que todas las pilas contenidas en la basura se desintegran al 100 % se calculó la cantidad de metales lixiviados exclusivamente por las pilas y de los metales normados por la NOM-053-SEMARNAT contenidos en estos dispositivos se encontró que la concentración de este lixiviado es de 0.44 ug/mL para cadmio (límite 1 ug/mL), 0.05 ug/mL de mercurio (límite 0.2 ug/mL) y 0.02 ug/mL de plata (límite 5 ug/mL) e indica que estos metales están por debajo de los límites permisibles en el extracto PECT.

INTRODUCCIÓN	IX
1. FUNDAMENTOS	1
1.1. HISTORIA	1
1.2. ORIGEN DE LOS TÉRMINOS PILA Y BATERÍA	6
1.3. FUNCIONAMIENTO	7
1.4. CLASIFICACIÓN DE LAS PILAS	11
1.5. FORMATOS DE LAS PILAS	13
1.6. COMPOSICIÓN Y USOS	14
1.6.1 <i>Pilas primarias</i>	14
a) <i>Pilas de zinc-carbón</i>	14
b) <i>Pila alcalina (zinc-dióxido de manganeso)</i>	16
c) <i>Pilas de zinc-óxido de mercurio</i>	19
d) <i>Pilas de óxido de plata</i>	21
e) <i>Pila de zinc-aire</i>	22
f) <i>Pilas de litio</i>	24
• Sistema litio/dióxido de manganeso	28
• Sistema litio/monofluoruro de carbono	29
• Sistema litio/cloruro de tionilo	30
• Sistema litio/yodo	31
1.6.2 <i>Pilas secundarias</i>	33
a) <i>Pilas níquel-cadmio</i>	33
b) <i>Pila de níquel-hidruro metálico (NiMH)</i>	36
c) <i>Pila de ión-litio</i>	40
d) <i>Pila de litio-polímero</i>	43
2. ASPECTOS ECONÓMICOS Y LEGALES	44
2.1. PAÍSES PRODUCTORES DE PILAS	44
2.2. PRODUCCIÓN Y CONSUMO DE PILAS	45
2.2.1. <i>Pilas primarias</i>	46
2.2.2. <i>Pilas secundarias</i>	50
2.2.3. <i>Pilas de mercurio</i>	56
2.3. VOLÚMENES GENERADOS DE PILAS.	58
2.4. CONSUMO DE PILAS POR HABITANTE	62
2.4.1 <i>Unión Europea (UE)</i>	62
2.4.2 <i>Estados Unidos de América (EEUUA)</i>	62
2.4.3 <i>América Latina</i>	64
2.5. LEGISLACIÓN INTERNACIONAL	66
2.5.1 <i>Europa</i>	66
2.5.2 <i>Estados Unidos de América</i>	70
2.5.3 <i>Japón</i>	74
2.5.4 <i>Otros países</i>	75
2.6. LEGISLACIÓN DE MÉXICO	76
3. ASPECTOS AMBIENTALES	79
3.1. CICLOS DE VIDA DE LOS METALES	79
3.2. FACTORES GENERALES DE IMPACTO Y RIESGO DE LAS PILAS	81

3.3.	PERCEPCIÓN DE RIESGO	86
3.4.	EVALUACIÓN DEL RIESGO ASOCIADO AL MANEJO DE PILAS GASTADAS	89
3.4.1	<i>Documentación disponible</i>	89
3.4.2	<i>Factores de peligro</i>	89
3.4.3	<i>Factores de riesgo</i>	91
3.5.	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DOCUMENTAL.....	96
3.5.1	<i>Manejo de las pilas dentro de la corriente de desechos sólidos municipales.</i>	96
a)	<i>Incineración de basura</i>	96
b)	<i>Disposición a rellenos sanitarios o tiraderos</i>	98
	<i>Composición</i>	98
	<i>Contenido de metales en la fracción total</i>	102
	<i>Concentración de metales en el lixiviado de la basura</i>	105
	<i>Aporte de los metales de las pilas al contenido total en la basura.</i>	110
	<i>Contribución de los metales contenidos en las pilas con respecto a otras fuentes al medio ambiente.</i>	115
3.5.2	<i>Planes de manejo de pilas usadas</i>	120
a)	<i>Reducción y sustitución</i>	121
b)	<i>Reciclado de pilas</i>	122
	<i>Ventajas y desventajas del reciclado de pilas</i>	128
4	SITUACIÓN EN MÉXICO	132
4.1	ANTECEDENTES	132
4.2	PARTE EXPERIMENTAL	136
4.2.1	<i>Metodología</i>	136
4.2.2	<i>Determinación del volumen anual de pilas comercializadas en México</i>	137
a)	<i>Bases de cálculo</i>	137
b)	<i>Cálculo de pilas comercializadas anualmente</i>	142
c)	<i>Mercado de pilas clasificadas como peligrosas</i>	150
	<i>NiCd, AgO y Pb-ácidas</i>	150
	<i>Pilas de HgO</i>	152
	<i>Pilas importadas legalmente</i>	153
	<i>Pilas de contrabando</i>	157
4.2.3	<i>Aporte de metales contenidos en las pilas a los Desechos Sólidos Municipales</i>	162
a)	<i>Bases de cálculo</i>	162
b)	<i>Volúmenes y composición de la basura</i>	164
c)	<i>Resultados de la aplicación de los escenarios para el cálculo de los volúmenes de pilas desechadas a la basura</i>	167
4.4	CONTRIBUCIÓN DE LAS PILAS AL CONTENIDO DE METALES DE LA BASURA	180
4.4.1	CONTENIDO DE METALES EN LAS PILAS DESECHADAS A LA BASURA	180
4.4.2	CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN TOTAL DE METALES EN LA BASURA	183
4.4.3	CONTRIBUCIÓN DE METALES DE LAS PILAS AL CONTENIDO TOTAL DE LA BASURA.....	185
4.4.4	CONCENTRACIÓN MÁXIMA DE METALES DE PILAS QUE PUEDE DISPONIBILIZARSE EN EL LIXIVIADO DE LA BASURA.....	189
5	RESULTADOS GENERALES Y DISCUSIÓN	196
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	208
7	BIBLIOGRAFÍA	212

5	PÁGINAS CONSULTADAS EN LA INTERNET.....	229
----------	--	------------

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. HISTORIA DEL DESARROLLO DE LAS PILAS Y BATERÍAS	5
CUADRO 2. TIPOS, USOS Y APLICACIONES DE LAS PILAS	13
CUADRO 3. FORMATOS Y SISTEMAS DE LAS PILAS PRIMARIAS Y SECUNDARIAS.....	14
CUADRO 4. CLASIFICACIÓN DE LAS PILAS PRIMARIAS DE LITIO DE ACUERDO AL MATERIAL DEL CÁTODO Y ELECTROLITO.....	26
CUADRO 5. CLASIFICACIÓN DE ALEACIONES ABSORBENTES DE HIDRÓGENO Y SUS COMPONENTES.....	39
CUADRO 6. DEMANDA DE PILAS DE MERCURIO DE 1990 A 2010 (MILLONES DÓLARES).....	57
CUADRO 7. CANTIDAD (MILES DE UNIDADES) DE PILAS VENDIDAS EN EL 2004 EN CANADÁ Y EL PORCENTAJE POR TIPO DE PILA	58
CUADRO 8. CANTIDAD (TONELADAS) DE PILAS COMERCIALIZADAS EN EL REINO UNIDO EN EL AÑO 2003.....	60
CUADRO 9. VOLUMEN DE PILAS COMERCIALIZADAS DE 2001 A 2010 EN CANADÁ (MASA, UNIDADES Y %).	61
CUADRO 10. CONSUMO DE PILAS POR PERSONA EN LA UNIÓN EUROPEA EN 2002.....	62
CUADRO 11. NÚMERO DE PILAS POR PERSONA CONSUMIDAS ANUALMENTE EN PAÍSES DE ALTO INGRESO	63
CUADRO 12. NÚMERO DE PILAS POR HABITANTE CONSUMIDAS ANUALMENTE EN PAÍSES DE INGRESOS MEDIOS Y BAJOS	64
CUADRO 13. LEGISLACIONES REFERENTES A LAS PILAS EN ALGUNOS ESTADOS DE ESTADOS UNIDOS.	73
CUADRO 14. PAÍSES QUE HAN ELABORADO LEYES SOBRE EL MANEJO DE PILAS.....	75
CUADRO 15. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LOS CONSTITUYENTES TÓXICOS EN EL EXTRACTO PECT.....	78
CUADRO 16. ELEMENTOS QUÍMICOS EN EL CUERPO HUMANO Y CUALES DE ELLOS ESTÁN PRESENTES EN LAS PILAS	84
CUADRO 17. DISPOSICIÓN E INCINERACIÓN DE DSM (MILES DE TONELADAS) EN EL PERIODO 1995-2002	97
CUADRO 18. COMPOSICIÓN DE LA BASURA EN LA UNIÓN EUROPEA.....	99
CUADRO 19. DATOS DE COMPOSICIÓN DE DESECHOS SÓLIDOS MUNICIPALES EN DISTINTAS REGIONES	100
CUADRO 20. FRACCIÓN DE BATERÍAS (POR TIPO) EN BASURA MUNICIPAL DE PAÍSES EUROPEOS.	101
CUADRO 21. DISTRIBUCIÓN DE TIPOS DE PILAS EN LA BASURA DETERMINADA EN DOS CAMPAÑAS REALIZADAS EN LA UNIÓN EUROPEA.....	102
CUADRO 22. CONCENTRACIÓN TOTAL DE METALES EN LOS DSM DE ESTADOS UNIDOS.....	103
CUADRO 23. CONCENTRACIÓN TOTAL DE METALES EN LOS DSM EN BASE SECA (G/TON) ...	104
CUADRO 24. CALIDAD TÍPICA DEL LIXIVIADO DE DESECHOS SÓLIDOS MUNICIPALES.	107
CUADRO 25. CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL LIXIVIADO DE LOS DESECHOS SÓLIDOS MUNICIPALES DE MINNESOTA (1996)	108
CUADRO 26. CONCENTRACIÓN DE METALES EN EL LIXIVIADO DE LA BASURA DE ESTADOS UNIDOS	109
CUADRO 27. CONCENTRACIÓN DE METALES EN EL LIXIVIADO DE LA BASURA DE LA UNIÓN EUROPEA ..	109
CUADRO 28. PORCENTAJE DEL APORTE DE METALES DE LAS PILAS AL CONSUMO TOTAL DEL METAL EN LA UNIÓN EUROPEA	111
CUADRO 29. CONTENIDO DE METALES EN LAS PILAS Y SU APORTE AL CONSUMO TOTAL DE CADA METAL	112
CUADRO 30. APORTE DE DIFERENTES TIPOS DE BATERÍAS AL CONTENIDO TOTAL DE METALES DE LOS DESECHOS SÓLIDOS MUNICIPALES (DSM).....	113
CUADRO 31. COMPOSICIÓN DE LOS DSM Y LA CONTRIBUCIÓN DE LAS PILAS GASTADAS.....	114
CUADRO 32. CANTIDAD DE METALES PROVENIENTES DE LAS PILAS DESCARGADAS A LA BASURA EN EL 2004	115
CUADRO 33. PROCESOS DE RECICLAJE APLICADOS A DIVERSOS TIPOS DE PILAS.....	126

CUADRO 34. PROCESOS DE RECICLADO DE PILAS REALIZADOS EN LA UNIÓN EUROPEA	126
CUADRO 35. COSTOS DE RECICLADO DE PILAS PORTÁTILES POR TIPO	127
CUADRO 36. CONSUMO DE PILAS ALCALINAS Y DE ZINC CARBÓN Y PILAS SECUNDARIAS DE NÍQUEL-CADMIO (PIEZAS/HAB AÑO)	134
CUADRO 37. CÁLCULO DE EMISIONES DE METALES TÓXICOS EN 1997 (TONELADAS)	135
CUADRO 38. PESO PROMEDIO DE PILAS PRIMARIAS PROFECO (1995)	140
CUADRO 39. PESO PROMEDIO DE PILAS PRIMARIAS	141
CUADRO 40. PESO PROMEDIO DE PILAS SECUNDARIAS	141
CUADRO 41. DATOS DE POBLACIÓN DE MÉXICO EN LOS PERIODOS DE 1994 A 1998 Y 2000 A 2006	142
CUADRO 42. PORCENTAJE PROMEDIO DE CADA TIPO DE PILAS COMERCIALIZADAS EN MÉXICO EN EL PERIODO DE 2000 A 2004 (SECRETARÍA DE ECONOMÍA, 2007)	143
CUADRO 43. ESTADÍSTICA DE LAS PILAS COMERCIALIZADAS EN EL PERIODO 2000 AL 2004 (SECRETARÍA DE ECONOMÍA, 2007)	145
CUADRO 44. COMPARACIÓN DEL NÚMERO DE PILAS VENDIDAS Y UTILIZADAS POR HABITANTE ANUAL EN MÉXICO Y OTROS PAÍSES	146
CUADRO 45. TIPOS, VOLÚMENES Y PORCENTAJES DE LAS PILAS DE LA SUBPARTIDA 850620 "ÓXIDO DE MERCURIO" (2004)	154
CUADRO 46. PRECIOS POR UNIDAD DE LAS PILAS REGISTRADAS EN LA SUBPARTIDA "ÓXIDO DE MERCURIO"	155
CUADRO 47. PILAS IMPORTADAS DE CHINA EN 2004	160
CUADRO 48. CICLOS DE VIDA ÚTIL DE LAS PILAS SECUNDARIAS	163
CUADRO 49. PERIODOS DE USO PROMEDIO DE PILAS DE NiCd	164
CUADRO 50. GENERACIÓN DE BASURA EN MÉXICO	165
CUADRO 51. GENERACIÓN DE BASURA POR HABITANTE EN DIVERSOS PAÍSES (AÑO 2000)	165
CUADRO 52. COMPOSICIÓN DE LA BASURA EN MÉXICO EN LOS AÑOS 2000 A 2004 (MILES DE TONELADAS)	166
CUADRO 53. CANTIDAD TOTAL ANUAL DE PILAS COMERCIALIZADAS EN MÉXICO QUE PUEDEN SER ENVIADAS A DISPOSICIÓN JUNTO CON LA BASURA MUNICIPAL. PT_L	168
CUADRO 54. CANTIDAD TOTAL ANUAL DE PILAS COMERCIALIZADAS EN MÉXICO ADICIONANDO EL PORCENTAJE DE PILAS ILEGALES. $PC_{(L+1)} = PT_L (1+0.11)$	168
CUADRO 55. CANTIDAD TOTAL ANUAL DE PILAS LEGALES E ILEGALES RESTANDO LAS PILAS COMERCIALIZADAS QUE NO ESTÁN EN USO	169
CUADRO 56. TOTAL DE PILAS DESECHADAS A LA BASURA, CONSIDERANDO QUE LOS USUARIOS GUARDAN EL 37% (ESCENARIO 1)	169
CUADRO 57. TOTAL DE PILAS DESECHADAS A LA BASURA, CONSIDERANDO QUE LOS USUARIOS GUARDAN EL 37% Y RESTANDO LA SUBPARTIDA 850680 "LAS DEMÁS PILAS Y BATERÍAS DE PILAS"	170
CUADRO 58. CANTIDAD DE PILAS DESECHADAS ANUALMENTE POR HABITANTE	171
CUADRO 59. CANTIDAD DE PILAS DESECHADAS ANUALMENTE POR HABITANTE CALCULADAS CON BASE EN EL ESCENARIO 1, EXCLUYENDO A LAS PILAS DE LA SUBPARTIDA ARANCELARIA 850680 "LAS DEMÁS PILAS Y BATERÍAS DE PILAS"	171
CUADRO 60. CANTIDAD DE PILAS DESECHADAS ANUALMENTE POR TONELADA DE BASURA HÚMEDA (40%). ESCENARIO 1	172
CUADRO 61. CANTIDAD DE PILAS DESECHADAS ANUALMENTE POR TONELADA DE BASURA HÚMEDA (40% DE HUMEDAD) OBTENIDA APLICANDO EL ESCENARIO 1, SIN CONSIDERAR LAS PILAS DE LA SUBPARTIDA 850680 "LAS DEMÁS PILAS Y BATERÍAS DE PILAS"	173
CUADRO 62. CANTIDAD DE PILAS DESECHADAS A LA BASURA ANUALMENTE POR TONELADA DE BASURA (BASE SECA). ESCENARIO 1	173
CUADRO 63. CANTIDAD DE PILAS DESECHADAS ANUALMENTE POR TONELADA DE BASURA (BASE SECA). ESCENARIO 1, EXCLUYENDO A LAS PILAS DE LA PARTIDA "LAS DEMÁS PILAS Y BATERÍAS DE PILAS"	174
CUADRO 64. CANTIDAD TOTAL DE PILAS DESECHADAS POR AÑO. ESCENARIO 2	175

CUADRO 65. CANTIDAD TOTAL DE PILAS DESECHADAS POR AÑO (ESCENARIO 2), RESTANDO LA SUBPARTIDA 850680 “LAS DEMÁS PILAS Y BATERÍAS DE PILAS”	176
CUADRO 66. CANTIDAD TOTAL DE PILAS DESECHADAS ANUALMENTE POR HABITANTE DE ACUERDO AL ESCENARIO 2	176
CUADRO 67. CANTIDAD TOTAL DE PILAS DESECHADAS ANUALMENTE POR HABITANTE DE ACUERDO AL ESCENARIO 2, EXCLUYENDO A LAS PILAS DE LA SUBPARTIDA 850680 "LAS DEMÁS PILAS Y BATERÍAS DE PILAS"	177
CUADRO 68. CANTIDAD DE PILAS DESECHADAS ANUALMENTE POR TONELADA DE BASURA HÚMEDA (40% DE HUMEDAD) DE ACUERDO AL ESCENARIO 2	177
CUADRO 69. CANTIDAD DE PILAS DESECHADAS ANUALMENTE POR TONELADA DE BASURA HÚMEDA (40% DE HUMEDAD) DE ACUERDO AL ESCENARIO 2, EXCLUYENDO A LAS PILAS DE LA SUBPARTIDA 850680 "LAS DEMÁS PILAS Y BATERÍAS DE PILAS"	177
CUADRO 70. CANTIDAD DE PILAS DESECHADAS ANUALMENTE POR TONELADA DE BASURA (BASE SECA) DE ACUERDO AL ESCENARIO 2	178
CUADRO 71. CANTIDAD DE PILAS DESECHADAS ANUALMENTE POR TONELADA DE BASURA (BASE SECA). ESCENARIO 2, EXCLUYENDO A LAS PILAS DE LA PARTIDA "LAS DEMÁS PILAS Y BATERÍAS DE PILAS"	179
CUADRO 72. PORCENTAJE QUE REPRESENTAN LAS PILAS EN EL TOTAL DE LA BASURA GENERADA EN MÉXICO (AÑO 2004)	180
CUADRO 73. CONTENIDO DE METALES (KG) APORTADOS POR LAS PILAS GASTADAS A LA BASURA EN 2004, DE ACUERDO AL ESCENARIO 1, SIN INCLUIR LA SUBPARTIDA 850680 “LAS DEMÁS PILAS Y BATERÍAS DE PILAS”	181
CUADRO 74. CONTENIDO DE METALES (KG) APORTADOS POR LAS PILAS GASTADAS A LA BASURA EN 2004, DE ACUERDO AL ESCENARIO 2, SIN INCLUIR LA SUBPARTIDA 850680 “LAS DEMÁS PILAS Y BATERÍAS DE PILAS”	182
CUADRO 75. CÁLCULO DEL CONSUMO ANUAL DE METALES EN MÉXICO (TONELADAS) EN EL AÑO 2004	183
CUADRO 76. CÁLCULO DEL CONTENIDO DE METALES EN PILAS Y EL PORCENTAJE QUE REPRESENTAN RESPECTO AL TOTAL DE LOS METALES COMERCIALIZADO EN MÉXICO (DATOS DEL AÑO 2004)	184
CUADRO 77. APORTES DE METALES COMERCIALIZADOS ANUALMENTE EN BASURA HÚMEDA CONSIDERANDO QUE SE DESECHAN DIFERENTES PORCENTAJES DEL TOTAL DE METAL COMERCIALIZADO, CON LOS VOLÚMENES DE PILAS OBTENIDAS EN EL ESCENARIO 1	186
CUADRO 78. APORTES DE METALES COMERCIALIZADOS ANUALMENTE A EN BASURA HÚMEDA CONSIDERANDO QUE SE DESECHAN DIFERENTES PORCENTAJES DEL TOTAL Y EL APORTE DE METALES DE LAS PILAS. ESCENARIO 2	187
CUADRO 79. APORTES DE METALES COMERCIALIZADOS ANUALMENTE EN BASURA SECA CONSIDERANDO QUE SE DESECHAN DIFERENTES PORCENTAJES DEL TOTAL Y EL APORTE DE METALES DE LAS PILAS. ESCENARIO 1	187
CUADRO 80. APORTES DE METALES COMERCIALIZADOS ANUALMENTE A EN BASURA SECA CONSIDERANDO QUE SE DESECHAN DIFERENTES PORCENTAJES DEL TOTAL Y EL APORTE DE METALES DE LAS PILAS. ESCENARIO 2	188
CUADRO 81. VALORES MÁXIMOS POSIBLES DE METALES DE LAS PILAS EN EL EXTRACTO PECT DE LA BASE SECA DE LA BASURA	192
CUADRO 82. CUANTIFICACIÓN DE ZN Y Pb EN LIXIVIADO EN DOS SITIOS DE MÉXICO	192
CUADRO 83. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS DEL LIXIVIADO PARA EL BASURERO MUNICIPAL DE MÉRIDA	193
CUADRO 84. RESULTADOS DE TOXICIDAD POR METALES EN LIXIVIADOS	194
CUADRO 85. CONCENTRACIÓN PROMEDIO DE MERCURIO GASEOSO TOTAL (MGT) EN AIRE AMBIENTE EN SITIOS DE DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN DOS ÉPOCAS DE MUESTREO	195

FIGURA 1. IMAGEN A) PILA DE KHUJUT RABUAH, EN EL MUSEO DE BAGDAD. IMAGEN B) ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE ESTA PILA (FUENTE: HTTP://NEWS.BBC.CO.UK/, 2003)	2
FIGURA 2. DIAGRAMA DE UNA PILA DANIELL	9
FIGURA 3. DESCRIPCIÓN ESQUEMÁTICA DE LA PILA DE ZINC-CARBÓN (FUENTE: ¡ERROR! REFERENCIA DE HIPERVÍNCULO NO VÁLIDA.)	15
FIGURA 4. DESCRIPCIÓN ESQUEMÁTICA DE LA PILA ALCALINA (FUENTE: ¡ERROR! REFERENCIA DE HIPERVÍNCULO NO VÁLIDA.)	18
FIGURA 5. ESQUEMA DE LA PILA BOTÓN	20
FIGURA 6. COMPARACIÓN DE VOLTAJES DE PILAS DE MERCURIO CON RESPECTO AL TIEMPO, PARA DOS DISTINTOS CÁTODOS (FUENTE: HTTP://SUPPORT.RADIOHACK.COM/)	20
FIGURA 7. COMPARACIÓN DE VOLTAJES DE PILAS DE ÓXIDO DE PLATA RESPECTO A LA DE ÓXIDO DE MERCURIO (FUENTE: HTTP://SUPPORT.RADIOHACK.COM/)	22
FIGURA 8. DESCRIPCIÓN ESQUEMÁTICA DE LA PILA DE ZINC-AIRE (FUENTE: HTTP://SUPPORT.RADIOHACK.COM/)	23
FIGURA 9. DESCRIPCIÓN ESQUEMATIZADA DE UNA PILA BOTÓN DE LITIO/DIÓXIDO DE MANGANESO (FUENTE: HTTP://SUPPORT.RADIOHACK.COM/)	28
FIGURA 10. PILA PARA MARCAPASOS DE LITIO-YODO (FUENTE: JACOBI EN KIEHNE, 2003)	32
FIGURA 11. DESCRIPCIÓN ESQUEMÁTICA DE UNA PILA CILÍNDRICA DE TECNOLOGÍA DE NÍQUEL (FUENTE: HTTP://SUPPORT.RADIOHACK.COM/)	34
FIGURA 12. ESQUEMA SIMPLIFICADO DEL MECANISMO DE REACCIÓN DE CARGA-DESCARGA DEL ELECTRODO DE HIDRÓXIDO DE NÍQUEL FUENTE: BERDNT EN KIEHNE, 2003	35
FIGURA 13. MECANISMO DE REACCIÓN DEL PROCESO DE CARGA-DESCARGA EN EL ELECTRODO MH (FUENTE: NISHIO Y FURUKAWA EN BESENHARD, 1999)	38
FIGURA 14. MECANISMO DE REACCIÓN DE CARGA-DESCARGA EN UNA PILA DE IÓN-LITIO (FUENTE: BERDNT EN KIEHNE, 2003)	42
FIGURA 15. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE PILAS POR PAÍSES EN EL PERIODO DE 2000 A 2004 (FUENTE: WWW.BATTERYDIGEST.COM)	44
FIGURA 16. DEMANDA DE PILAS EN EEUU (FUENTE: WWW.FREEDONIAGROUP.COM)	45
FIGURA 17. VENTAS AL MENUDEO DE PILAS PRIMARIAS Y SECUNDARIAS EN EEUU EN EL 2003 EN MILLONES DE UNIDADES (FUENTE: A.C. NEILSON EN: ¡ERROR! REFERENCIA DE HIPERVÍNCULO NO VÁLIDA.)	47
FIGURA 18 PROYECCIÓN DE LA DEMANDA EN EEUU DE PILAS PRIMARIAS NO RECARGABLES (CON BASE EN DATOS DE 2002) (FUENTE: ¡ERROR! REFERENCIA DE HIPERVÍNCULO NO VÁLIDA.)	48
FIGURA 19. PORCENTAJE DE PILAS VENDIDAS EN LA UE EN 2003-2004 (FUENTE: EPBAEUROPE.NET)	48
FIGURA 20. EVOLUCIÓN DEL MERCADO DE LAS PILAS PRIMARIAS DEL AÑO 2000 AL 2004 (FUENTE: EPBAEUROPE.NET)	49
FIGURA 21. MERCADO MUNDIAL POR TIPO DE PILAS EN 1999 (FUENTE: NOMURA RESEARCH INSTITUTE EN NOREÚS, 2000)	51
FIGURA 22. NÚMERO TOTAL DE PILAS SECUNDARIAS PRODUCIDAS A NIVEL MUNDIAL DE 1989 A 1999 (FUENTE: RYDH Y SVARD, 2000)	52
FIGURA 23. MERCADO MUNDIAL DE PILAS DE 1985 A 2003	53
FIGURA 24. PRODUCCIÓN DE PILAS SECUNDARIAS JAPONESES Y SU DISTRIBUCIÓN EN EL MERCADO MUNDIAL EN 2000. (FUENTE: MORROW, 2003)	54
FIGURA 25. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE PILAS NiCd DE 1990 A 2010 (FUENTE: INSTITUTE FOR INFORMATION TECHNOLOGY EN MORROW, 2003)	54
FIGURA 26 DEMANDA EN EEUU DE PILAS SECUNDARIAS, INCLUYENDO LAS DE USO INDUSTRIAL Y AUTOMOTRIZ, PROYECTADA HASTA 2015 (CON BASE EN DATOS DE 2002) (FUENTE: WWW.FREEDONIAGROUP.COM)	55
FIGURA 27. SÍMBOLO PROPUESTO PARA EL ETIQUETADO ESPECIAL DE PILAS CONSIDERADAS EN LA DIRECTIVA 91/157/EEC	69

FIGURA 28. SÍMBOLO QUE EXIGE LA BATTERY ACT PARA EL ETIQUETADO DE LAS PILAS DE NiCd Y PLOMO-ÁCIDAS	72
FIGURA 29. ETIQUETADO DE PILAS UTILIZADO EN JAPÓN QUE FUE DESARROLLADO POR LA BATTERY ASSOCIATION (FUENTE: WWW.BAJ.OR.JP)	75
FIGURA 30. CICLO DE VIDA DE LOS METALES	80
FIGURA 31. CICLO DE VIDA DE LAS PILAS	81
FIGURA 32. FACTORES DE PELIGROSIDAD (GUTIÉRREZ, 2000)	90
FIGURA 33. FUENTE DE CONTAMINACIÓN Y RUTAS DE TRANSPORTE DE LOS METALES, SEÑALANDO LOS RECEPTORES Y LAS BARRERAS A SU TRANSPORTE	94
FIGURA 34. FUENTES DE EMISIONES DE PILAS DURANTE SU MANEJO Y TENDENCIAS EN EL RIESGO POTENCIAL	95
FIGURA 35. DISTRIBUCIÓN DEL TIPO DE PILAS EN LA BASURA (VALORES PROMEDIO) (FUENTE: WITZENHAUSEN, 2001 EN VANGHELUWE, 2005)	102
FIGURA 36. PORCENTAJES DE LAS FUENTES DE EMISIÓN DE CADMIO AL AMBIENTE (FUENTE: VANGHELUWE, ET AL., 2005)	116
FIGURA 37. PORCENTAJES DE LAS FUENTES DE EMISIÓN DE ZINC AL AMBIENTE (FUENTE: VANGHELUWE, ET AL., 2005)	117
FIGURA 38(35). PORCENTAJES DE LAS FUENTES DE EMISIÓN DE NÍQUEL AL AMBIENTE (FUENTE: VANGHELUWE, ET AL., 2005)	118
FIGURA 39. PORCENTAJES DE LAS FUENTES DE EMISIÓN DE PLOMO AL AMBIENTE (FUENTE: VANGHELUWE, ET AL., 2005)	119
FIGURA 40. COMPLEJIDAD RELATIVA DEL RECICLADO DE METALES	123
FIGURA 41. PORCENTAJES DE PILAS GASTADAS RECOLECTADAS EN HOGARES DEL MUNICIPIO DE PUEBLA (FUENTE: BOLAÑOS-BERRUecos, 2004)	133
FIGURA 42. TENDENCIA EN EL CONSUMO DE PILAS NO PELIGROSAS EN MÉXICO BASADA EN DATOS DEL PERIODO 2000-2004 (SECRETARÍA DE ECONOMÍA, 2007)	147
FIGURA 43. COMPARACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE PILAS PELIGROSAS Y NO PELIGROSAS COMERCIALIZADAS POR HABITANTE DEL AÑO 2000 AL 2004 (SECRETARÍA DE ECONOMÍA, 2007)	147
FIGURA 44. DISTRIBUCIÓN DEL TIPO DE PILAS COMERCIALIZADAS EN MÉXICO, INCLUYENDO LA SUBPARTIDA 850680 "LAS DEMÁS PILAS Y BATERÍAS DE PILAS" (PORCENTAJE DE LOS VOLÚMENES PROMEDIO DEL PERIODO 2000-2004)	148
FIGURA 45. DISTRIBUCIÓN DE LOS PORCENTAJES PROMEDIO DE VENTA DE PILAS EN LA UNIÓN EUROPEA Y EN MÉXICO EN EL PERIODO 2000-2004.	149
FIGURA 46. TENDENCIA DEL PORCENTAJE DE PILAS DE NiCd, Ag ₂ O Y HgO COMERCIALIZADAS EN MÉXICO DEL AÑO 2000 AL 2004 (FUENTE: SECRETARÍA DE ECONOMÍA)	150
FIGURA 47. TENDENCIA EN EL CONSUMO DE PILAS NiCd (PELIGROSAS) EN MÉXICO BASADAS EN DATOS DEL 2001 AL 2004 (SECRETARÍA DE ECONOMÍA, 2007)	151
FIGURA 48. TIPOS DE PILAS FABRICADAS EN CHINA QUE CONTIENEN MERCURIO ADICIONADO, INDICANDO LAS TONELADAS DE ESTE ELEMENTO UTILIZADAS PARA SU FABRICACIÓN (NRDC, 2004)	156
FIGURA 49. PAÍSES DE ORIGEN DE LAS PILAS IMPORTADAS POR MÉXICO DE 2003 A 2005 REPORTADOS EN LA SUB-PARTIDA "ÓXIDO DE MERCURIO (FUENTE: SIAVI, 2006)	161
FIGURA 50. PILAS DESECHADAS A LA BASURA POR HABITANTE DEL AÑO 2000 AL 2004. ESCENARIO 1	172
FIGURA 51. PROYECCIÓN DEL VOLUMEN DE LAS PILAS DESECHADAS (EXPRESADO COMO MASA) POR TONELADA DE BASURA, PARA EL PERIODO 2005 A 2020 CON BASE EN EL ESCENARIO 2	179
FIGURA 52. VOLÚMENES DE METAL COMERCIALIZADO EN 2004 COMPARADO CONTRA LOS VOLÚMENES DEL METAL EN LAS PILAS QUE SE DISPONE EN LA BASURA.	189
FIGURA 53. DIAGRAMA CON LOS PASOS REQUERIDOS PARA DETERMINAR LA TOXICIDAD DE UNA PILA MEDIANTE LA PRUEBA DE EXTRACCIÓN PECT QUE SIMULA EL EFECTO DEL LIXIVIADO DE LA BASURA	191

INTRODUCCIÓN

Hay vestigios históricos que indican que la electricidad se conoce desde la antigüedad, pero no fue hasta el siglo XVII de nuestra era que este fenómeno fue estudiado científicamente y solamente dos siglos más tarde se logró aplicarla, y es entonces cuando se transformó en uno de los descubrimientos más importantes de la humanidad.

Con el nacimiento del telégrafo a finales del siglo XIX y la posterior aparición de la radio y otros aparatos que requerían de fuentes de energía autónoma, se desarrollaron dispositivos denominados *pilas o baterías* que son capaces de convertir la energía química en energía eléctrica. La demanda empezó a crecer en función del consumo de los diferentes equipos eléctricos y electrónicos que aparecían en el mercado, y desde entonces va en constante aumento, siendo más marcada en los últimos años a partir de la introducción de nuevos aparatos electrónicos portátiles como computadoras y teléfonos celulares, cuyo consumo se ha generalizado en casi todos los países, incluyendo aquellos con economías en desarrollo. Y se prevee que esta tendencia va a ir en aumento pues apenas estamos en los albores de la era de la electrónica.

Los compuestos que componen las pilas y baterías mientras están en uso, no representan riesgo para la población pues son dispositivos prácticamente herméticos¹, pero cuando se envían a un basurero pueden, bajo condiciones extremas, afectar la calidad del aire o de cuerpos de agua vulnerables. La probabilidad de que ocurriera un daño de este tipo era mayor en el pasado a causa del alto contenido

¹ Excepto cuando se fabrican sin cumplir con los mínimos estándares de calidad o por su tamaño (de botón), que pueden ser ingeridas accidentalmente (ver capítulo de Aspectos Ambientales).

de metales tóxicos como mercurio², cadmio y plomo, además de que el empaque no era del todo hermético, siendo frecuentes los derrames. Actualmente la mayor parte de las pilas y baterías consumidas son secas, alcalinas y contienen metales más amigables para el ambiente³ como manganeso, zinc, litio, etc., además de que son más seguras y han mejorado su eficiencia y durabilidad, lo que se ha traducido en periodos de vida mucho más largos, especialmente para las pilas recargables. Estas diferencias en composición de las actuales pilas e inclusive de las que están en desarrollo⁴, de su calidad del empaque y de los periodos de vida útil, se han traducido en una drástica disminución en el nivel potencial de riesgo para salud y el ambiente. No obstante, dada la rapidez del desarrollo tecnológico respecto al tiempo que requiere difundirse información, estos cambios no son del conocimiento de una gran parte de la población, por lo cual se sigue considerando que todos estos dispositivos representan un alto riesgo para la salud humana y el ambiente. Cabe señalar que una gran parte de los documentos sobre este tema que están disponibles en la Internet, -la cual es actualmente el medio más utilizado para buscar información sobre un tema-, carecen de rigurosidad científica o se basan en información caduca y en forma general aseguran que estos dispositivos contaminan al ambiente y conforman un riesgo para la salud.

La opinión pública de México, al igual que la de otros muchos países, ha recibido la influencia de este tipo de información, por lo que las asociaciones civiles o instituciones gubernamentales preocupadas por

² El mercurio solamente se permite utilizar para fabricar pequeñas pilas de botón; y el resto solamente pueden contener vestigios de este elemento que están presentes en sus materias primas.

³ Todos los elementos son tóxicos cuando se supera ciertos niveles límites, incluyendo los clasificados como esenciales para la vida. Sin embargo, en plantas y animales hay más reportes de problemas de deficiencias que de toxicidad.

⁴ Se están desarrollando pilas que utilizan cerveza, Sony tiene pilas basadas en azúcar y Aqua Power System ha desarrollado en Japón unas pilas AA y AAA que se recargan con agua y orina. Están fabricadas con una mezcla de carbón y magnesio y puede generar hasta 500 mA/hora (pilas AA) lo cual es similar a las pilas de zinc-carbón (noticiastech.com)

conservar el ambiente han actuado en consecuencia, organizando diferentes campañas de recolección y acopio de todas las pilas y baterías gastadas. Estos esfuerzos, en la práctica, no han redituado grandes logros para la implementación de sistemas eficientes de manejo que lleven a una reducción del total de metales potencialmente tóxicos en la basura, pero sí han logrado incrementar aún más, la percepción de que todas las pilas representan una amenaza para el ambiente.

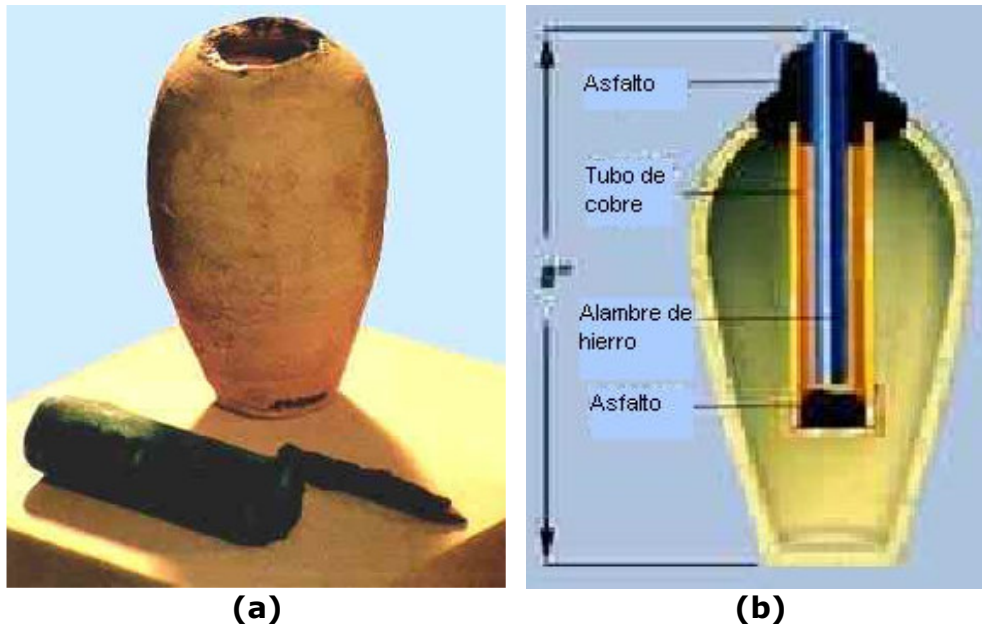
Para mejorar el nivel de información científica sobre el tema y aportar datos suficientes para la toma de decisiones por parte de las autoridades ambientales y grupos ecologistas, se llevó a cabo esta investigación que versa sobre la problemática ambiental de las pilas portátiles en México. Tiene como objetivo realizar una investigación en México y otros países sobre el funcionamiento, composición, número y tipo de pilas que se consumen actualmente y cuales son las tendencias futuras, sus aplicaciones, las legislaciones ambientales y las opciones de manejo de las pilas gastadas. Además, en este documento se analiza el riesgo que representan las pilas portátiles gastadas, en función de la cantidad de metales que se desechan y las potenciales rutas de dispersión existentes en rellenos sanitarios y basureros de México.

Se espera que la información generada en esta tesis, por su lenguaje comprensivo y solidez documental pueda ayudar a los lectores a comprender el nivel real de riesgo a la salud asociado al manejo de las pilas gastadas, y apoye a las autoridades en el establecimiento de planes para un manejo racional, adecuados a las características geográficas y socio económicas de cada región de México.

1. FUNDAMENTOS

1.1. Historia

La invención y aplicaciones de las pilas en nuestra vida diaria se encuentran documentadas desde principios del siglo XIX; sin embargo, existen evidencias de que las pilas pudieron haberse conocido desde hace 2,000 años. Esto lo demuestra un hallazgo arqueológico hecho en 1936 en el Oriente Medio, en un territorio de la actual Irak que fue ocupado por la tribu de los partianos llamado Khujut Rabuah, donde se encontró un dispositivo fechado entre los años 248 a.C y 226 d.C., que se presume fue una fuente de energía eléctrica (Figura 1) (<http://news.bbc.co.uk/>, 2003). El hallazgo consiste en un recipiente elaborado con arcilla en cuyo interior hay un tubo cilíndrico de cobre que contiene un ácido orgánico y dentro de éste, un alambre de hierro corroído aislado con asfalto; que puede producir al menos 5 voltios (*ibidem*). Algunos científicos sugieren que estas celdas "primitivas" se utilizaron para recubrir diversos objetos con metales, ya que han encontrado piezas de diferentes materiales recubiertos con plata. Otros científicos sugieren que este dispositivo era ocupado con fines religiosos y no como un aditamento con fines prácticos. (Kiehne, 2003 y www.encyclopedia.com)



(a) (b)
Figura 1. (a) pila de Khujut Rabuah, en el Museo de Bagdad¹. (b) esquema de funcionamiento de esta pila (Fuente: <http://news.bbc.co.uk/>, 2003)

Sin embargo, las primeras evidencias documentadas de la invención de la pila y sus fundamentos científicos son mucho más recientes, pues datan de los primeros años del siglo XIX, cuando el italiano Alessandro Volta (1745-1827) dedujo a partir de las observaciones de Luigi Galvani (1737-1798) y de sus propios experimentos, que existen materiales que, cuando reaccionan químicamente, intercambian electrones que pueden ser utilizados para producir corrientes eléctricas; es decir, su energía química interna se transforma en energía eléctrica. A partir de este principio diseñó, en 1800, la primera celda eléctrica, que consta de un conjunto de discos de zinc y cobre alternados y sumergidos en una solución ácida denominada electrolito. También encontró que cuando estas celdas independientes se interconectaban aumentaba el voltaje.

¹ La fuente documental que informa que "la pila" se encuentra en el museo de Bagdad es anterior a la invasión de ese país por tropas norteamericanas, que ha causado la destrucción de muchas piezas y ruinas de la antigüedad

Esta celda, denominada voltaica en honor a su descubridor, se aplicó en el telégrafo; pero su uso estuvo limitado pues durante su funcionamiento producía hidrógeno, fenómeno que disminuía su eficiencia (Kiehne, 2003). Muchos científicos trataron de eliminar este problema cambiando la composición química de la celda. Un importante avance lo logró George Leclanché, quien en 1868 desarrolló una pila que usaba como electrodo negativo una amalgama de zinc, como electrodo positivo una mezcla de dióxido de manganeso y carbón, y como electrolito una disolución de cloruro de amonio. Sin embargo, el uso de este tipo de pilas también fue limitado, pues aún cuando no se presentaba este fenómeno aún resultaba muy complicado manejar un electrolito líquido.

En 1802, el Dr. William Cruickshank diseñó la primera batería capaz de ser producida a nivel industrial. Conectó láminas de igual tamaño de cobre a otras de zinc, mediante terminales. Estas hojas metálicas, que se conocen como electrodos, se colocaron en cajas selladas con cemento que previamente se habían llenado con una disolución salina o ligeramente ácida (electrolito). Esas baterías no podían ser recargadas, pero en 1859, el físico francés Gastón Planté diseñó la primer batería recargable, que consistía en placas de plomo metálico sumergidas en ácido sulfúrico; a esta batería se le denominó de plomo-ácido; esta tecnología se encuentra aún en uso, principalmente en vehículos automotrices y en aplicaciones estacionarias como plantas eléctricas de emergencia (www.batteryuniversity.com, y www.cienciateca.com).

Carl Gassner, en 1888, desarrolló una pila basada en la de Leclanché, a la cual le sustituyó el electrolito líquido por una pasta preparada con una disolución de cloruro de amonio embebida en una mezcla de óxido

de zinc y yeso. Esta pila que se le denominó seca, fue la primera que tuvo aplicaciones comerciales y que, con mínimas modificaciones, sigue actualmente en uso; al igual que la llamada pila alcalina de dióxido de manganeso que también es una pila Leclanché mejorada y que fue introducida al mercado en 1945 (www.batteryuniversity.com)

Thomas Alva Edison inventó en 1900 otro tipo de acumulador con electrodos de hierro y níquel, cuyo electrolito es de hidróxido de potasio (KOH), denominado de "níquel-hierro" (www.wikipedia.com). Este dispositivo se empezó a comercializar en 1908 y sigue utilizándose para fines industriales. También hacia 1900 en Suecia Waldemar Junger y Karl Berg desarrollaron el acumulador de níquel cadmio (NiCd) que utiliza ánodos de cadmio en vez de hierro y cuyas características son muy parecidas a las del acumulador de Edison.

Aparte de las pilas y baterías cuyo desarrollo fue ya mencionado, hubo muchos otros avances en este campo en los últimos tres siglos, los cuales se describen cronológicamente en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Historia del desarrollo de las pilas y baterías

Año	Descubrimiento/evento	Tema
1600	Gilbert (Reino Unido)	Inicia la electroquímica
1800	Volta (Italia)	Inventa la pila voltaica
1802	Cruikshank (Reino Unido)	Primera pila posible de ser producida en masa
1836	John Daniell (Reino Unido)	Mejora la pila voltaica y desarrolla la pila Daniell
1839	Grove (Reino Unido)	Inventa la pila de zinc-aire
1859	Gaston Planté (Francia)	Inventa la pila de plomo-ácido, primera pila recargable
1868	George Leclanché (Francia)	Inventa la pila de Leclanché
1888	Gassner (EEUUA)	Desarrolla la pila seca
1890	Thomas Alva Edison (EEUU)	Inventa la pila de níquel-hierro
1896		Se inventa la pila de tamaño "D"
1899	Waldmar Jungner y Karl Berg (Suecia)	Inventa la pila de níquel-cadmio
1901	Carbon Company.	Introduce al mercado la pila seca de Columbia, que es la primera que se produce en masa
1910		Se produce comercialmente la pila recargable de níquel-hierro
1914	Thomas Edison (EEUU)	Desarrolla la primera pila alcalina
1932	Shlecht y Ackermann (Alemania)	Inventa el polo de placa sinterizada para pila níquel-cadmio
1947	Neuman (Francia)	Sella con éxito la batería de níquel cadmio
1949	Lew Urry (Energizer®)	Desarrolla la pila alcalina pequeña
1954	Gerald Pearson, Calvin Fuller and Daryl Chapin	Desarrollan la primera pila solar
1956	Energizer®	Produce la primera pila de 9 V
Década 1960	Union Carbide (EEUUA)	Desarrolla la batería primaria alcalina
Década 1970		Se inicia el desarrollo de válvula regulada para la batería de plomo-ácido Se introduce al mercado la pila no recargable de litio
1976	Científicos de Philips® Research	Inventan la pila de níquel-hidruro metálico (NiMH)
Década 1990		Se introduce al mercado la pila prismática

Cuadro 1 (cont.). Historia del desarrollo de las pilas y baterías

Año	Descubrimiento/evento	Tema
1990		Se inicia la comercialización de la batería de níquel-hidruro metálico
1991	Sony (Japón)	Comercializa la batería de ión litio
1992	Karl Kordesch, Josef Gsellmann y Klaus Tomantschger	Patenta la pila alcalina recargable
1999		Se inicia la producción comercial de la pila de ión litio-polímero

Fuente: www.batteryuniversity.com, support.radioshack.com

1.2. Origen de los términos pila y batería

Los términos de pila y batería surgieron en los primeros años del desarrollo de estos dispositivos y provienen de la forma en que se colocaban los ánodos y cátodos (placas generalmente metálicas), ya fuera unas encima de otras (apilados o formando una pila), o acomodados lateralmente (en batería). De la anterior explicación se desprende que los dos términos se pueden aplicar indistintamente, aunque como es más común que batería se utilice para designar a los acumuladores de autos o dispositivos estacionarios que generan electricidad para equipos industriales; por lo que en este documento se utiliza el término pila para referirse a los dispositivos portátiles que son el tema de estudio, los cuales tienen un peso máximo de 100 g y sus aplicaciones se enfocan al funcionamiento equipos eléctricos y electrónicos portátiles como son lámparas, herramientas eléctricas, cámaras, relojes, teléfonos inalámbricos y celulares, computadoras y otros aditamentos de uso doméstico (Rydh, 2003).

1.3. Funcionamiento

Todos alguna vez en su vida se han preguntado *¿qué es la electricidad?*, y seguramente cuando han visto una pila o batería también se han cuestionado sobre *¿cómo se almacena la electricidad en su interior?*

La electricidad es el movimiento de electrones a través de un material conductor. De acuerdo a la Primera Ley de la Termodinámica "*La energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma*", es posible la generación de electricidad a través de alguna fuente de energía; en el caso de las pilas, la fuente es la energía asociada a una reacción química. De acuerdo a la literatura científica, una pila o batería es un dispositivo que convierte la energía química en energía eléctrica (Ménard M., Chevalier C., 1991; Daniels, Alberty, 1970, Monk, 2004, Novoa, 2000) mediante reacciones simultáneas de oxidación-reducción, y está formada por un conjunto de varias celdas unidas en serie, cuyo voltaje es igual a la suma de los voltajes individuales de cada una (Daniels, 1970).

Los elementos químicos presentan diferente afinidad por los electrones. Cuando un elemento pierde electrones se dice que se oxida y cuando los gana que se reduce. En general los metales tienden a perderlos, pero unos lo hacen con mayor facilidad que otros. Cuando un elemento, generalmente metálico, se sumerge en una disolución de sus iones (por ejemplo, cobre en disolución de sulfato de cobre) y se pone en contacto a través de un conductor con otro elemento que comúnmente es metal y también está sumergido en una disolución de sus iones (por ejemplo,

zinc en disolución de sulfato de zinc), y ambos tienen diferentes capacidades de perder electrones, sucede que uno de ellos los pierde y el otro los gana. Esta tendencia se puede predecir con la Serie Electroquímica, una lista ordenada de elementos según el potencial estándar de oxidación E^{02} de cada especie. En la Figura 2 se muestra esta serie con algunas especies metálicas y sus potenciales estándares, observándose una mayor tendencia a perder electrones al ser más negativo el valor de este potencial.

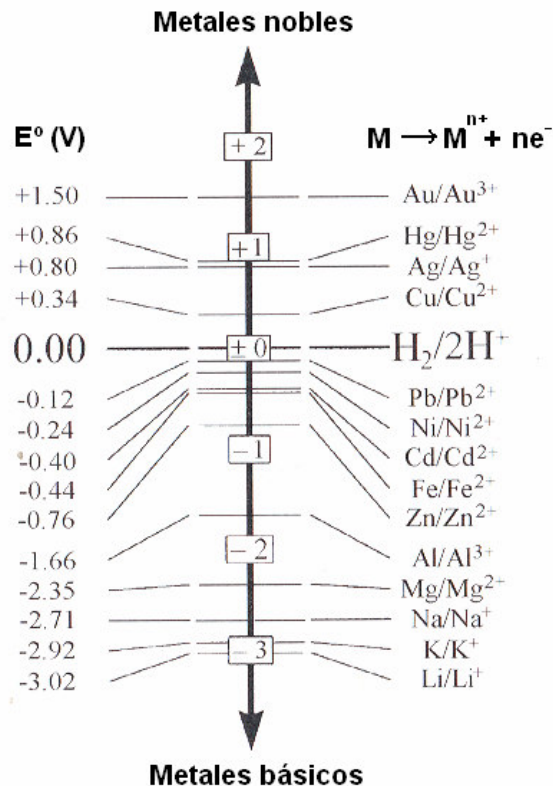


Figura 2. Serie Electroquímica de algunos metales y su potencial estándar en volts (Fuente: Besenhard, 1999)

² Este potencial estándar es obtenido experimentalmente al medir el voltaje generado en una celda galvánica, construida con un electrodo del metal problema sumergido en una solución 1 M de sus iones, juntándolo con un electrodo de hidrógeno, que consta de un electrodo de platino, sumergido en una solución ácida 1 M, en donde se le burbujea hidrógeno gaseoso. A este último electrodo se le define arbitrariamente, en condiciones estándar (temperatura de 25 °C y presión de 101.3 KPa) un potencial de 0 V.

Al llevarse a cabo esta reacción de óxido-reducción, la energía química generada en este proceso (flujo de electrones) puede ser utilizada para generar trabajo. Los electrones producidos durante la reacción de oxidación del metal que más fácilmente se oxida, denominado ánodo (+), viajan por el conductor eléctrico hacia el otro metal, denominado cátodo (-), donde se unen a los iones positivos (cationes) de la disolución, reduciéndolos a átomos neutros que precipitan. En consecuencia, se genera una deficiencia de cargas positivas en el electrolito en que está inmerso el cátodo y sobran cargas negativas de los contra-iones. Para alcanzar la neutralidad, los iones negativos fluyen hacia el ánodo donde se están liberando cargas positivas a la disolución. Las soluciones electrolíticas de ambos elementos están separadas para evitar su difusión y se conectan a través de puentes salinos (www.mpoweruk.com). Un caso claro de este sistema es la pila Daniell (Figura 3)

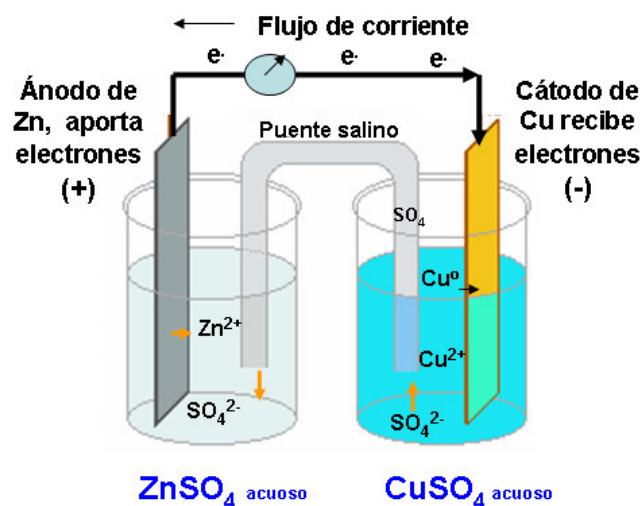
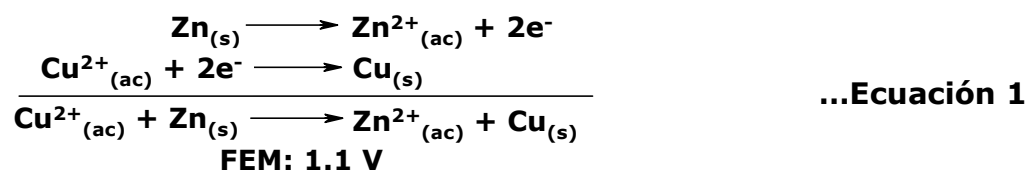


Figura 3. Diagrama de funcionamiento de una Pila Daniell³

³ El flujo de corriente se considera en sentido opuesto al de los electrones

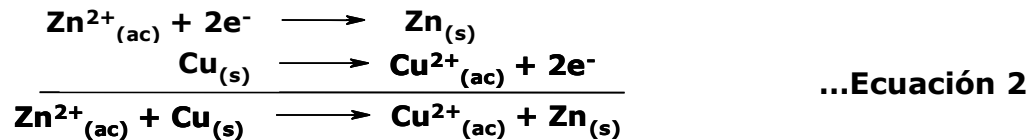
Este sistema consta de dos electrodos: una lámina de zinc sumergida en una disolución acuosa de sulfato de zinc (ZnSO_4) y otra de cobre sumergida en una de sulfato de cobre (CuSO_4). Ambos electrolitos están separados por una membrana o puente salino que permite el paso de los iones pero que minimiza su difusión.

De acuerdo a la Serie Electroquímica, el zinc ($E^{\circ}_{\text{Zn}/\text{Zn}^{2+}} = 0.76 \text{ V}$) pierde electrones más fácilmente que el cobre ($E^{\circ}_{\text{Cu}/\text{Cu}^{2+}} = -0.337 \text{ V}$), por lo que al unir ambos sistemas con un conductor eléctrico el zinc metálico funge como el ánodo oxidándose a Zn^{2+} , los electrones liberados viajan a través del conductor eléctrico hacia el electrodo de cobre que funciona como cátodo, en donde se reducen los iones Cu^{2+} de la disolución electrolítica a Cu^0 , depositándose en el mismo electrodo. Al haber un exceso de cargas negativas en el cátodo (iones SO_4^{2-}), éstas viajan al ánodo a través del puente salino balanceando el exceso de cargas positivas (iones Zn^{2+}) formadas por la oxidación del zinc. Las semirreacciones que suceden en este sistema son las siguientes (Ecuación 1):



Si se opone una resistencia eléctrica, como un foco o un motor entre los electrodos, el flujo de electrones del ánodo al cátodo es capaz de producir trabajo. Este fenómeno ha hecho que las pilas tengan una aplicación práctica, pues hacen funcionar a todos los equipos portátiles que requieren de una corriente eléctrica.

Estas reacciones espontáneas se pueden llevar a cabo en el sentido opuesto, pero se requiere aplicar una fuente externa de energía. Por ejemplo, en el caso del zinc y cobre, si se aplica una corriente puede lograrse que el zinc se reduzca y el cobre se oxide (Ec. 2).



La fuente de electricidad se conecta a través del polo negativo al electrodo de Zn y el polo positivo al electrodo de Cu, en donde el exceso de electrones, que llegan inducen a un proceso de reducción del Zn^{2+} del electrolito a Zn^0 , mientras que en el electrodo de Cu se induce la reacción opuesta (pérdida de electrones). Este sistema simplemente invierte el proceso químico que tiene lugar en la pila, renovándola; aunque el proceso para este tipo de artefacto requiere de un gasto excesivo de energía por lo cual en la práctica no se lleva a cabo; pero si se utiliza en otro tipo de pilas.

Aunque los principios básicos de las actuales pilas son similares a las más primitivas, como es la pila de Daniell, han ido cambiando para responder a las nuevas necesidades de los equipos eléctricos y electrónicos; por lo que su aspecto exterior y su composición son completamente diferentes.

1.4. Clasificación de las pilas

Existen varios criterios de clasificación de las pilas. Por ejemplo, de acuerdo al estado de agregación del electrolito pueden ser húmedas o

secas⁴. Las primeras contienen un electrolito líquido (disolución) y en la actualidad, se utilizan principalmente en los autos (plomo-ácido) o en las pilas no recargables de litio, mientras que en las segundas el electrolito está absorbido en otras sustancias, generalmente formando un gel, que evita que se derrame (Castro y Díaz, 2004, Arredondo, 2001).

Otro criterio de clasificación tiene que ver con la reversibilidad de la reacción de descarga al conectar la pila a una corriente eléctrica externa (proceso de recarga); en este caso las pilas se clasifican en dos grupos principales:

- **Pilas primarias.** Están diseñadas para convertir su energía química en eléctrica sólo una vez, ya que sus componentes llevan a cabo una reacción prácticamente irreversible (Kiehne, 2003). Ejemplos de este tipo de pilas son las de zinc-carbón (Leclanché), alcalinas (zinc-manganeso), zinc-aire, óxido de mercurio y óxido de plata. También pertenecen a esta categoría las pilas no recargables de litio.
- **Pilas secundarias.** Son pilas que una vez descargadas se le puede aplicar energía eléctrica externa para que los reactivos regresen a su forma original y que sea usado nuevamente por el usuario. Se basan en una reacción química reversible; es decir, los reactivos forman productos y viceversa (www.ahkecuador.org). Estas pilas están constituidas principalmente por duplas como níquel-cadmio, níquel-hidruro

⁴ También hay las llamadas pilas de electrolito sólido en que éste es una sal conductora

metálico, o bien por ión-litio. Otras pilas de este tipo son las ácidas de plomo, níquel-zinc, litio, sulfuro de sodio, de flujo, etc.

Las pilas por el tipo de uso (Comisión Europea, Dirección General del Ambiente, 2003) se clasifican como:

- **pilas portátiles** (uso profesional y casero)
- **pilas de ignición** (vehículos)
- **pilas industriales** (sector productivo)

En el Cuadro 2 se presenta en forma sintética los tipos, usos, aplicaciones típicas y tecnologías de las pilas que están el mercado. En primer término se subdividen en dos grandes grupos (por su uso): doméstico/ profesional, e industrial. A su vez, cada grupo se subdivide por el tipo de tecnologías de las pilas que también se denominan sistemas: zinc-manganeso (Zn-Mn) que se conocen como alcalinas, zinc-carbón (Zn-C), litio (Li), Zn-aire, óxido de plata (AgO), óxido de manganeso y litio (Mn-Li), níquel cadmio (NiCd), níquel metal hidruro (Ni-MH), ión Li y Li-polímero. Finalmente los subgrupos de cada tecnología se dividen en portátiles y grandes, señalando si no son recargables (primarias) o si lo son (secundarias).

Cuadro 2. Tipos, usos y aplicaciones de las pilas

Uso	Tecnología	Aplicaciones típicas	Tipo de pila
Doméstico y profesional	Usos generales: alcalinas (Zn-Mn), Zn-C	Relojes, audio, juguetes, lámparas, cámaras, etc.	Portátiles (< 1 kg)
	Litio (Li)	Equipos fotográficos, controles remotos y electrónicos	
	Botón: Zn-aire, óxido de plata, alcalinas, litio	Relojes, equipos para sordera, calculadoras	Grandes (> 1 kg)
	Níquel-cadmio(NiCd)	Teléfonos inalámbricos, herramientas eléctricas portátiles	
	Níquel-hidruro metálico (NiMH)	Teléfonos celulares e inalámbricos	
	Ión litio (Li-ion), Li-polímero	Teléfonos celulares, computadoras portátiles y agendas electrónicas	
	Plomo-ácido	Aparatos de entretenimiento	
Industrial		Autos, motocicletas	Recargables (secundarias)
		Sistemas de alarmas, plantas eléctricas de emergencia	
	Níquel-cadmio(NiCd)	vehículos eléctricos	
	Níquel-hidruro metálico (NiMH)	Vehículos híbridos	

Fuente: Labouze (2003)

1.5. Formatos de las pilas

Las pilas eléctricas se presentan generalmente en tres tipos de formato: botón, cilíndricas y prismáticas. En el Cuadro 3 se presentan los formatos para cada sistema y tipo de carga. Cada formato presenta diferentes tamaños que conforman formas normalizadas. Las más frecuentes comprenden la serie A (A, AA, AAA, AAAA), B, C, D, F, G, J y N, 3R12, 4R25 y sus variantes, PP3, PP9 y las baterías de linterna 996 y PC926.

Las características principales de todas ellas y de otros tipos menos habituales se describen en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Formatos normalizados de las pilas

Tipo de formato			Observaciones	Forma	FEM/ V
EEUUA	IEC ⁽¹⁾	ANSI ²			
BOTON					
	LR44		Alcalina	botón, H 5.4mm, D 11.6mm	1,5V
PX28			Oxido de mercurio	botón, H 25.2mm, D 13mm	6V
PX28S			Oxido de plata; sustituto de PX28	botón, H 25.2mm, D 13mm	6,2V
PX28L	L544		Ion litio; sustituto de PX28	botón, H 25.2mm, D 13mm	6V
BOTON GRANDE					
CR 1616				botón, H 1.6mm, D 16mm	3V
CR 1620				botón, H 2.0mm, D 16mm	3V
CR 2016				botón, H 1.6mm, D 20mm	3V
CR 2025				botón, H 2.5mm, D 20mm	3V
CR 2032				botón, H 3.2mm, D 20mm	3V
CR 2430				botón, H 3mm, D 24.5mm	3V
CR 2450				botón, H 5mm, D 24.5mm	3V

Cuadro 3 (cont.). Formatos normalizados de las pilas

CILÍNDRICAS					
AAAA		25 ^a	MN2500	Cilindro, L 42 mm, D 8 mm	1.5 V
AAA	LR03	24 ^a	R03, MN2400, AM4, UM4, HP16, Micro	cilindro L 44.5 mm, D 10.5 mm	1.5 V
1/3 AAA				cilindro, L 20.5mm, D 10.5mm	1.5 V
2/3 AAA				cilindro, L 30mm, D 10.5mm	1.5 V
4/3 AAA				cilindro, L 60mm, D 10.5mm	1.5 V
5/3 AAA				cilindro, L 67mm, D 10.5mm	1.5 V
1/4 AAA				cilindro, L 14mm, D 10.5mm	1.5 V
5/4 AAA				cilindro, L 50mm, D 10.5mm	1.5 V
AA	LR06	15 ^a	R06, MN1500, AM3, UM3, HP7, Mignon	cilindro L 50mm, D 14.2 mm	1.5 V
1/3 AA				cilindro, L 17.5mm, D 14.2mm	1.5 V
2/3 AA				cilindro, L 28.7mm, D 14.2mm	1.5 V
4/3 AA				cilindro, L 65.2mm, D 14.2mm	1.5 V
4/5 AA				cilindro, L 43mm, D 14.2mm	1.5 V
A				cilindro L 50 mm, D 17 mm	1.5 V
1/3 A				cilindro, L 21mm, D 17mm	1.5 V
2/3 A				cilindro, L 28.5mm, D 17mm	1.5 V
4/5 A				cilindro, L 43mm, D 17mm	1.5 V
C	LR14	14 ^a	R14, UM2, MN1400, HP11, Baby	cilindro L 46 mm, D 26 mm	1.5 V
2/3 C				cilindro, L 31mm, D 26mm	1.5 V
Sub C				cilindro, L 43 mm, D 23 mm	1.5 V
2/3 Sub C				cilindro, L 28mm, D 23mm	1.5 V
4/3 Sub C				cilindro, L 50mm, D 23mm	1.5 V
4/5 Sub C				cilindro, L 34mm, D 23mm	1.5 V

Cuadro 3 (cont.). Formatos normalizados de las pilas

CILÍNDRICAS					
D	LR20	13 ^a	R20, MN1300, UM1, HP2, Mono	cilindro L 58 mm, D 33 mm	1.5 V
1/2 D				cilindro, L 37mm, D 33mm	1.5 V
4/3 D				cilindro, L 89mm, D 33mm	1.5 V
F				cilindro, L 87 mm, D 32 mm	1.5 V
G				cilindro, L 105 mm, D 32 mm	1.5 V
J				cilindro L 150 mm, D 32 mm	1.5 V
N	LR1	910 ^a	Lady y las de la calculadora HP_41	cilindro L 30.2 mm, D 12 mm	1.5 V
123				cilindro L 34.5 mm, D 16 mm	3 V
PRISMA RECTAGULAR					
			linterna, 996	Prisma 68 mm × 68 mm × 115 mm	6 V (3)
			radio, linterna, PC926	prisma 127 mm × 136,5 mm × 73 mm alto, terminales rosca	12 V (3)
	3R12		GP312S	prisma 67 mm × 62 mm × 22 mm	4.5 V
	4R25 X	908	radio, MN908	prisma 67,7 mm × 67,7 mm × 110 mm, terminales de muelle	6 V (3)
	4R25	915	radio	prisma 67,7 mm × 67,7 mm × 110 mm, terminales rosca	6 V (3)
	4LR2 5-2	918 ^a	MN918	prisma 127 mm × 136,5 mm × 73 mm, terminales rosca	6 V (3)
PP3	6LR6 1	1604 ^a	6F22, 6R61, MN1604, 9V	prisma 48 mm × 25 mm × 15mm	9 V (3)
PP6	6F22	1602	6F50-2, Energizer 246	prisma 69,9mm × 34,5mm × 34,5mm	9 V (3)
PP9	6F10 0	1603		prisma 51,6mm × 65,1 mm × 80,2 mm	9 V (3)

Cuadro 3 (cont.). Formatos normalizados de las pilas

PRISMA RECTAGULAR			
A	alimentación de filamentos de receptores de radio antiguos	prisma de varios tamaños	6 V
B	alimentación de placa de receptores de radio antiguos	prisma de varios tamaños, a veces con tomas intermedias	45 V, 60 V, 90 V, etc.
C	polarización de rejilla de receptores de radio antiguos	prisma de varios tamaños, a veces con tomas intermedias	4.5 V, 6 V, 9 V, etc.

Fuentes:

(1) IEC= Internacional Electrotechnical Comisión

(2) ANSI=American National Standards Institute

(3) Las pilas de 6 V, 9 V y 12 V suelen fabricarse mediante múltiplos de elementos de 1.5 V en serie. Cuando se utilizan acumuladores (NiMH o INCD), el voltaje total ha de multiplicarse por 0.83, ya que cada elemento suministra 1,24 V en vez de 1,5 V. Hay acumuladores alcalinos que suministran 1,5 V.

La norma europea aplicable es [IEC 60086-1 Primary batteries - Part 1: General](#) (Norma inglesa: [BS397](#)).

La serie LR-xx indica que son pilas alcalinas. Las de zinc-carbón no llevan "L": R-6, R-20, etc.

La norma norteamericana aplicable es [ANSI C18.1 American National Standard for Dry Cells and Batteries-Specifications](#).

1.6. Composición y usos

1.6.1 Pilas primarias

a) *Pilas de zinc-carbón*

Fueron las primeras pilas comercializadas (1880) y hasta la fecha se siguen empleando (Monk, 2004). Están formadas por tres cilindros concéntricos, en que el más externo es de zinc (ánodo), seguido por uno de pasta de dióxido de manganeso (cátodo) y, el del centro es una barra de grafito que sirve como conductor de los electrones. Los iones se mueven a través de una disolución acuosa de cloruro de zinc ($ZnCl_2$) y cloruro de amonio (NH_4Cl) que se encuentra entre el cátodo y el

ánodo (Ménard, M., Chevalier, C., 1991; Santiago, E., 2001) En la Figura 4 se muestra el esquema de este dispositivo.

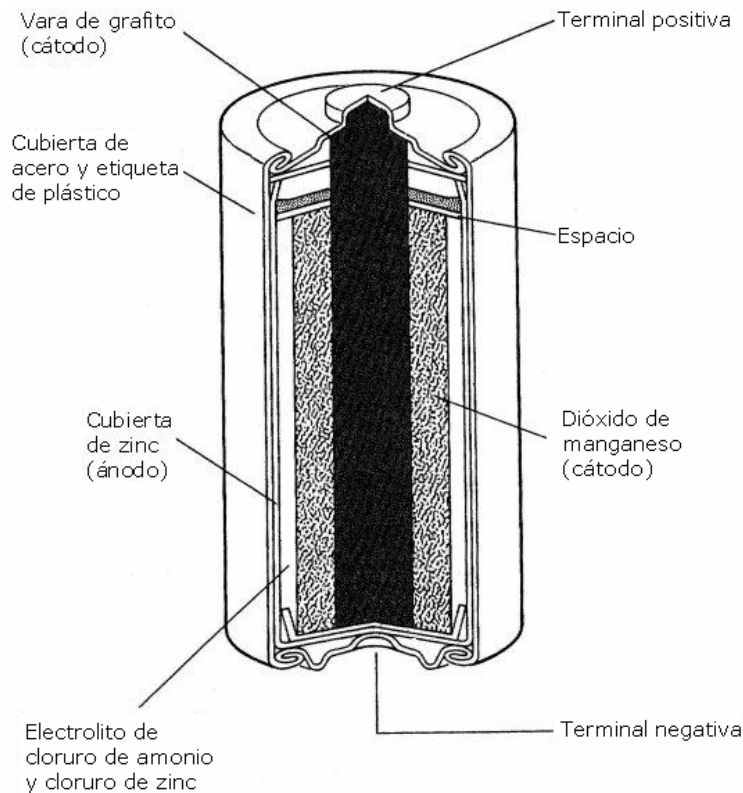
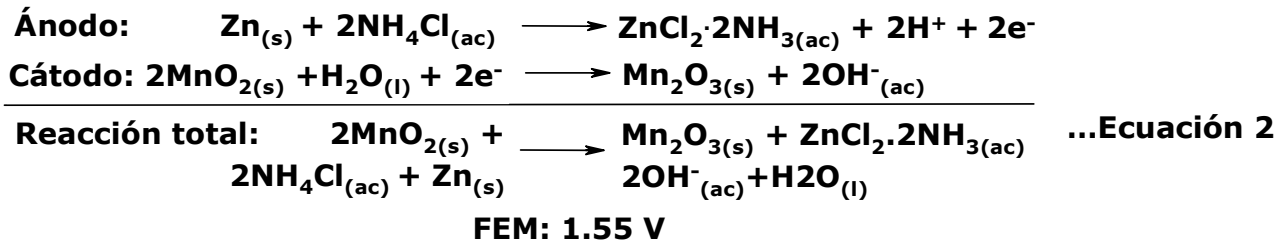


Figura 4. Diagrama de la pila de zinc-carbono (Fuente: http://support.radioshack.com/support_tutorials/batteries/bt-cazi-main.htm)

La reacción química que se lleva a cabo en la pila es la siguiente: el zinc metálico en la superficie del ánodo se oxida a iones Zn^{2+} que pasan al electrolito. Los electrones fluyen a través de la barra de carbón hacia el cátodo, donde se reduce el MnO_2 . Se incorpora una sal de amonio en forma de pasta para inmovilizar el ión Zn^{2+} cerca del ánodo, formando un complejo parcialmente soluble. En la Ecuación 2 se representan las semirreacciones que suceden en cada electrodo, y la reacción general de descarga. (Monk, 2004, Brett, 1994)



La fuerza electromotriz (fem) de este sistema es de 1.55-1.6 V, pero con el tiempo decrece. Esta pila trabaja mejor en aparatos con requerimientos de energía de bajo a moderado. Su temperatura de operación oscila entre los -17°C a 71.1°C; son ineficientes a bajas temperaturas por lo que a -10°C solamente opera al 30 % de su capacidad (Kiehne, 2003).

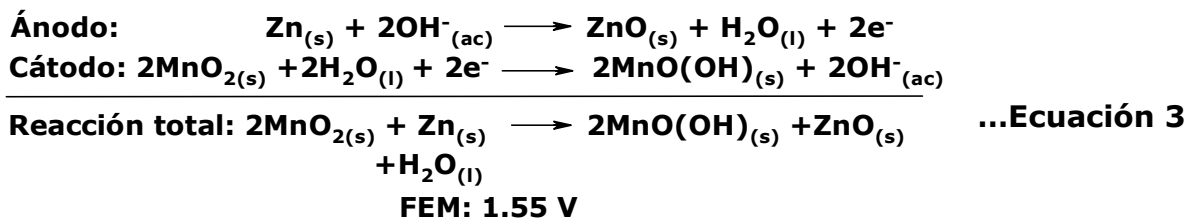
Los materiales con los que está hecha la pila no se clasifican como peligrosos (ver Aspectos Ambientales), además de que su producción es muy barata por lo que se pueden vender a bajos precios, y existen muchos formatos comerciales. Sin embargo, su vida útil es limitada y el tiempo que se pueden almacenar es corto (un poco más de 18 meses), por lo cual han surgido otros sistemas mejores (Monk, 2004 y Kiehne, 2003).

b) Pila alcalina (zinc-dióxido de manganeso)

La pila alcalina es más eficiente que la de zinc-carbón ya que su vida útil es mayor y se pueden almacenar por periodos más largos. Estas pilas pueden estar almacenadas por dos años a temperatura ambiente conservando un 90 % de su capacidad original y si se almacenan cuatro años, el 80 %. Además, el intervalo de temperatura de trabajo también es más amplio pues puede trabajar al 30% de su capacidad a -20°C.

Este sistema al igual que el de Zn-C contiene cilindros concéntricos (Figura 4): un ánodo de amalgama de zinc, un cátodo que es una mezcla de dióxido de manganeso de alta pureza y carbón, un electrolito de hidróxido de potasio, un separador que previene la migración de partículas sólidas entre los electrodos y una hoja de latón que sirve como conductor eléctrico (Figura 5) (http://support.radioshack.com/support_tutorials/batteries/bt-alk-main.htm).

La reacción química que ocurre es muy similar a la de la pila de zinc-carbón: el zinc metálico funciona como ánodo y reacciona con el electrolito (OH^-) formando un óxido y liberando electrones (reacción de oxidación). Los electrones viajan a través de la hoja de latón hacia el cátodo, en donde reducen al dióxido de manganeso (IV) a un oxi-hidróxido de Mn (III) de fórmula MnO(OH) (Brett, 1994).



Las ventajas de este tipo de pilas respecto a las de Zn-C, especialmente el hecho de que el voltaje no decrece significativamente con el tiempo, se relaciona principalmente a que el ánodo está construido con polvo fino de zinc, el cual presenta una gran área superficial que permite mayor densidad de corriente, lo cual a su vez es un atributo que las hace aptas para utilizarse en aparatos eléctricos portátiles con alta demanda de corriente, como grabadoras, cámaras,

etc. (http://support.radioshack.com/support_tutorials/batteries/bt-alk-main.htm).

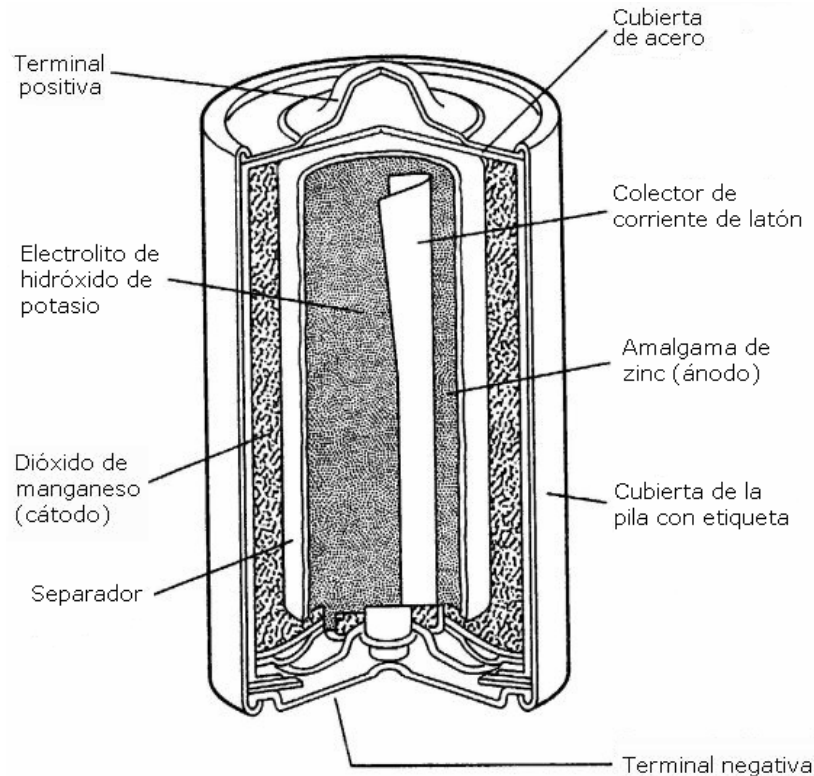


Figura 5. Diagrama de la pila alcalina (Fuente: http://support.radioshack.com/support_tutorials/batteries/bt-alk-main.htm)

Anteriormente, tanto las pilas de zinc-carbón y alcalinas contenían altas cantidades de mercurio (1 % en pilas alcalinas y 0.1 % en pilas de Zn-C), ya que la presencia de este elemento inhibía la formación de gases alrededor de los electrodos que podían producir una explosión (www.wasteonline.org.uk, y NRDC, 2006). A causa de la preocupación ambiental aunada a la presencia de mercurio en estos dispositivos, las autoridades erigieron leyes que regularon el contenido de este elemento en las pilas con las cuales, estableciendo límites máximos de

hasta un 0.0005 % de contenido de mercurio en peso, con los cuales se garantiza que las pilas de Zn-C y alcalinas comercializadas en la actualidad están libres de este metal.

c) Pilas de zinc-óxido de mercurio

Estas pilas se utilizan cuando los equipos requieren de alta densidad de energía y son manejables en el intervalo de temperatura de -10 a 60 °C. Como desde finales de la década de 1990 muchos países han prohibido la fabricación y venta de pilas con mercurio (ver capítulo 2), y solamente permiten la comercialización de las de tipo botón, actualmente este es el formato principal de las pilas de mercurio. Sus usos típicos son relojes, calculadoras, cámaras digitales e instrumentos eléctricos de medición y equipos de sordera. (http://support.radioshack.com/support_tutorials/batteries/bt-hgox-main.htm, Kiehne y Raudszus en Kiehne, 2003).

Las pilas de botón de óxido de mercurio están formadas por capas apiladas que consisten de un ánodo de amalgama de zinc en forma de gel mezclado con un electrolito de hidróxido de potasio (KOH) o de sodio (NaOH), un separador hecho de varias capas para evitar la migración de partículas entre los electrodos, y un cátodo que consta de una pasta de óxido de mercurio ya sea sola o mezclada con dióxido de manganeso. En la Figura 6 se describen los componentes de una pila de botón típica, en el cual el cátodo puede ser de mercurio o de plata. El cátodo de óxido mercúrico tiene una FEM de 1.35 V con una corriente de salida constante en largos periodos, aunque llega un momento en el que la caída de voltaje es muy pronunciada (Figura 7). La mezcla de

óxido mercúrico/dióxido de manganeso tiene una fem de 1.4 V y aunque el voltaje de salida con respecto al tiempo no es constante, decrece a un ritmo prácticamente imperceptible (http://support.radioshack.com/support_tutorials/batteries/bt-hgox-main.htm).

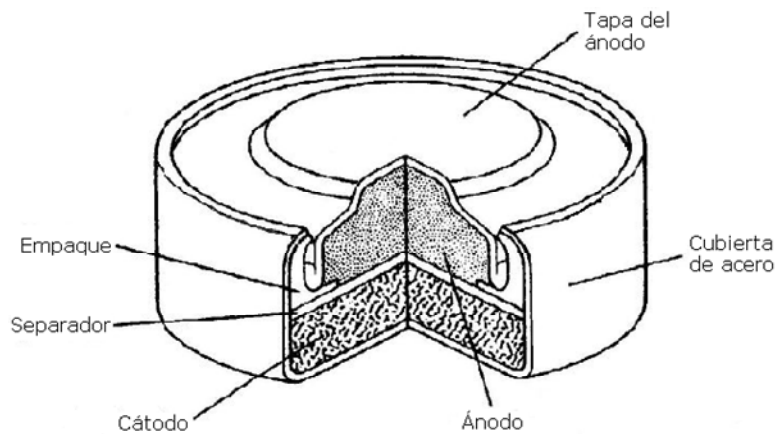


Figura 6. Esquema de la pila botón (Fuente: http://support.radioshack.com/support_tutorials/batteries/bt-hgox-main.htm)

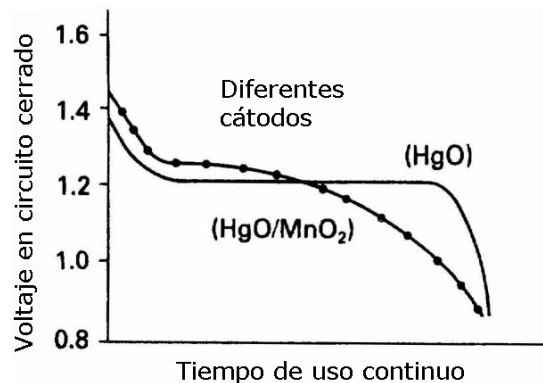
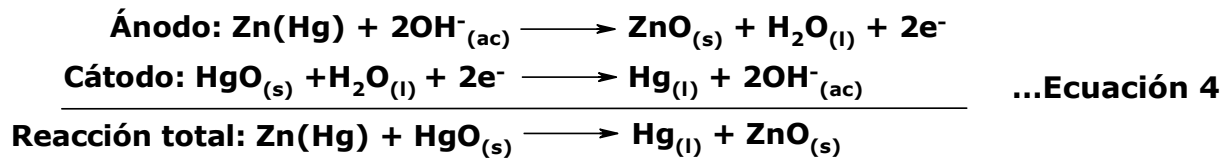


Figura 7. Comparación de voltajes de pilas de mercurio con respecto al tiempo, para dos distintos cátodos (Fuente: http://support.radioshack.com/support_tutorials/batteries/bt-hgox-main.htm)

Para ambos cátodos, la reacción de descarga es la siguiente (Brett, 1994):



d) Pilas de óxido de plata

Este tipo de pila es muy similar a las pilas de óxido de mercurio, tiene la misma forma de botón y los mismos componentes (Figura 5), a diferencia del cátodo que está hecho de una mezcla de óxido de plata con trazas de dióxido de manganeso (Ménard, M., Chevalier, C., 1991) El intervalo de temperatura de trabajo es de entre -10 a 60 °C, tiene un tiempo de almacenamiento con efectividad constante, perdiendo menos del 10 % de efectividad después de 5 años. (H. A. Kiehne en Kiehne, 2003). Este tipo de pilas se utilizan en relojes, calculadoras, audífonos para sordera, instrumentos electrónicos de medición, juguetes, etc. En cuanto a su operación, la pila de óxido de plata tiene diferencias significativas con la pila de mercurio, como por ejemplo en la magnitud del voltaje (es mayor) y su tiempo de vida en operación o circuito cerrado (que puede ser menor). Tal como se muestra en la Figura 8, la pila de óxido de plata tiene una FEM de 1.6 V, mayor al de la pila de mercurio, aunque tiene menor durabilidad con uso continuo en comparación.

La reacción de descarga es la que se describe en la siguiente ecuación (Brett, 1994):

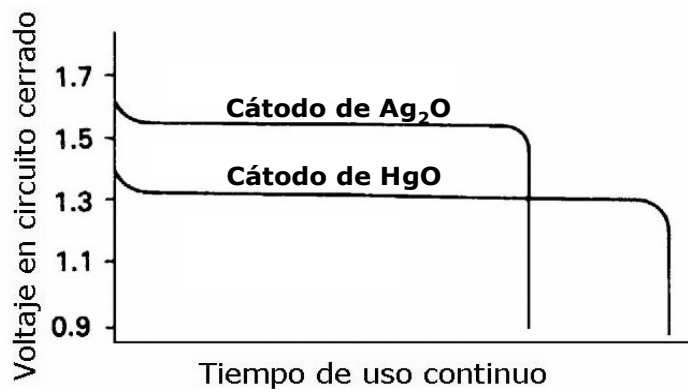
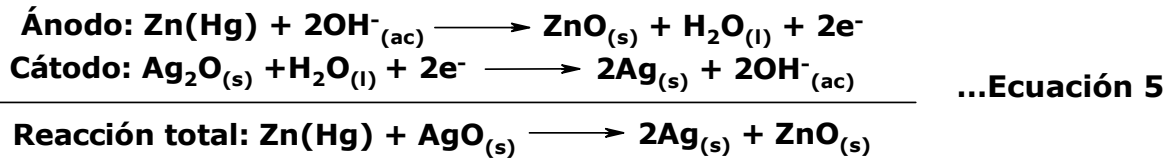


Figura 8. Comparación de voltajes de pilas de óxido de plata respecto a la de mercurio (Fuente: http://support.radioshack.com/support_tutorials/batteries/bt-siox-main.htm)

e) Pila de zinc-aire

Su operación es muy similar a otras pilas botón; pero a diferencia de los otros sistemas, la pila de zinc-aire requiere del oxígeno de la atmósfera para poder operar. Para su elaboración no se utilizan metales clasificados como peligrosos (Hg y Ag) y en su fabricación tampoco se utilizan materiales reactivos o inflamables. La temperatura de operación de esta pila oscila entre -10° C a 60° C (Berdnt en Kiehne, 2003).

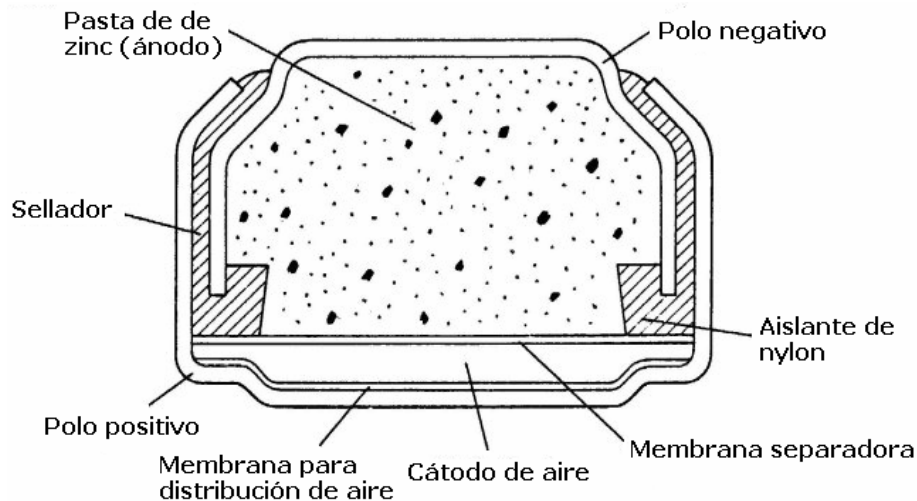
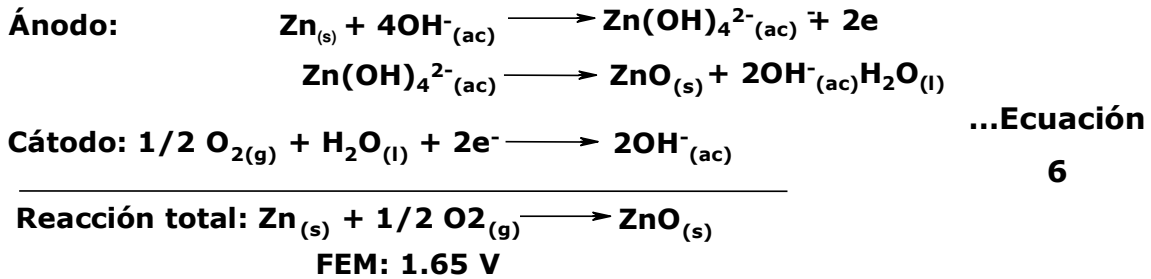


Figura 9. Descripción esquemática de la pila de zinc-aire (Fuente: http://support.radioshack.com/support_tutorials/batteries/bt-zair-main.htm)

El ánodo está hecho de una pasta de zinc metálico con electrolito (usualmente una disolución de hidróxido de potasio), y el cátodo contiene aire atmosférico. Entre los electrodos se encuentra una serie de membranas, conformada por una membrana con catalizador de carbón y dióxido de manganeso que sirve de conductor eléctrico, una membrana de difusión de aire y una membrana separadora que impide la migración de partículas sólidas hacia el cátodo.

La reacción se lleva a cabo en la superficie de las membranas. Se desencadena con la oxidación del zinc metálico con el hidróxido del electrolito para formar $Zn(OH)_4^{2-}$ y liberando electrones que viajan al cátodo. El $Zn(OH)_4^{2-}$ se descompone a ZnO , iones hidróxido y agua, y esta última especie emigra a la membrana para reaccionar con el

oxígeno del cátodo y reducirlo (Malone *et al.* 2004, www.wikipedia.com). Las reacciones que ocurren se muestran a continuación:



Una de las principales ventajas de estas pilas es su bajo peso y, al poder reemplazar el aire del cátodo, su vida útil es alta. Este sistema es fabricado con el polo positivo sellado con un sello removible y al no tener contacto con aire, la pila pierde sólo un 1 % de efectividad por año (Berdnt en Kiehne, 2003)

f) Pilas de litio

Las pilas de litio abarcan una gran familia de diferentes dispositivos cuyo común denominador es el ánodo de litio metálico. El electrodo de Li/Li⁺ está posicionado en el extremo negativo de la Serie Electroquímica (-3.040 V); y si se combina con un cátodo localizado en el extremo positivo de la misma serie, se produce a fuerza electromotriz alta. Esto es, el litio se oxida fácilmente por lo que si se combina con una especie química que se reduce se genera una corriente importante de electrones.

El litio de las pilas está como metal puro o como una aleación con otro metal. El cátodo se fabrica con diferentes materiales dependiendo de que características se requieran, de acuerdo a sus diferentes aplicaciones (Jacobi en Kiehne, 2003). En el Cuadro 4 se clasifican los materiales del cátodo, se describen sus propiedades y sus aplicaciones.

Como el litio metálico es muy reactivo en presencia de casi todos los componentes del aire (humedad, N₂, O₂ y CO₂), la fabricación y manejo de estas pilas requieren de técnicas especiales. Sin embargo, y a pesar del riesgo que implica el uso del litio, estas pilas presentan muchas ventajas en comparación con las tradicionales. A continuación se mencionan las más importantes:

- Alto voltaje. Las pilas de litio muestran un voltaje de 1.5 a 4.0 V e incluso más.
- Alto contenido de energía por peso. Las pilas de litio contienen alrededor de 100-500 Wh/kg de pila, incluso mayor que las pilas de plomo-ácido (35-55 Wh/kg) o de níquel-cadmio (50-70 Wh/kg)

Cuadro 4. Clasificación de las pilas primarias de litio de acuerdo al material del cátodo y electrolito

Clasificación	Electrolito	Poder	Capacidad (Ah)	Temperatura de operación (°C)	Vida útil (años)	Cátodo	Voltaje	Características
Cátodo disuelto (fluido, gas)	Orgánico o inorgánico	Medio a alto (W)	0.5-20,000	-55-70	8-10	SO ₂	3.0	Alta energía, alta potencia, operación a bajas temperaturas, larga vida útil
						SOCl ₂	3.6	
						SO ₂ Cl ₂	3.9	
						CrO ₂	3.6	
Cátodo sólido	Orgánico	Bajo a medio (mW)	0.01-10	-40-55	5-8	V ₂ O ₅	3.3-2.3	Alta energía, potencia media a baja, no se genera presión interna
						Ag ₂ CrO ₄	3.1	
						MnO ₂	3.0	
						(CF) _x	2.6	
						S	2.2	
						Cu ₄ O(PO ₄) ₂	2.2	
						CuS	1.7	
						FeS ₂	1.6	
						FeS	1.5	
						CuO	1.5	
						Bi ₂ Pb ₂ O ₃	1.5	
Bi ₂ O ₃	1.5							
Electrolito sólido	Sólido	Muy bajo (μW)	0.003-5	0-100	10-25	I ₂	2.8	Muy larga vida útil, muy seguro, baja potencia
						PbI ₂	1.8	
						PbS	1.8	

Fuente: Jacobi en Kiehne, 2003

- Voltaje de salida constante con respecto al tiempo, en casi todo su periodo de vida útil.
- El intervalo de temperatura de trabajo es mayor que las convencionales, puede trabajar a menores temperaturas con una alta eficiencia.
- Mayor tiempo de vida útil: Gran parte de las pilas de litio pueden ser almacenados por 10 o 20 años sin una descarga significativa. A una temperatura normal de almacenamiento se puede percibir una pérdida del 5 a 10 % de efectividad.
- Materiales inocuos al ambiente. En comparación con el mercurio, cadmio o plomo ocupado en otros sistemas, el litio es menos dañino al ambiente; sin embargo, no se conoce mucho al respecto de la posible afectación del litio al ambiente (Jacobi en Kiehne, 2003)

A continuación se mencionan algunos ejemplos del funcionamiento y aplicación de las pilas de litio:

- **Sistema litio/dióxido de manganeso**

Está conformado por un ánodo de litio metálico, un cátodo poroso de dióxido de manganeso mezclado con carbón, y en muchos casos el electrolito es una mezcla de carbonato de propileno y dimetoxi metano con perclorato de litio o trifluorometano-sulfonato de litio.

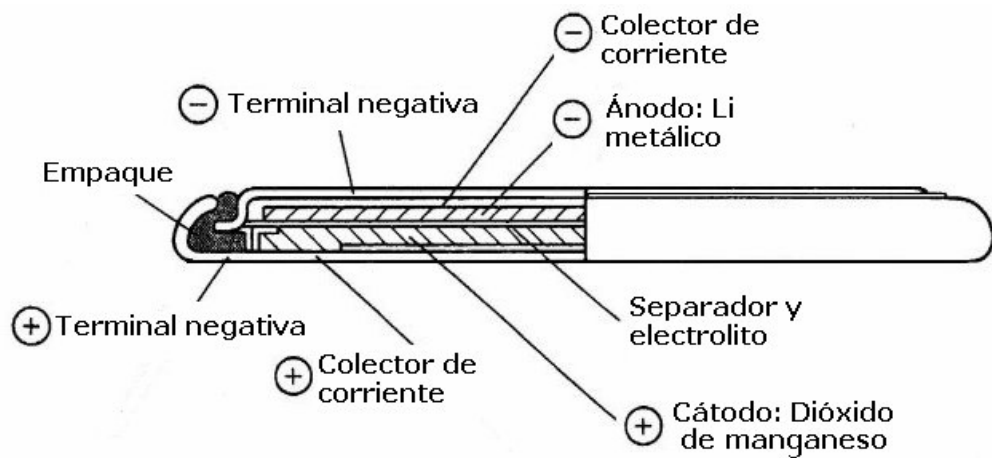
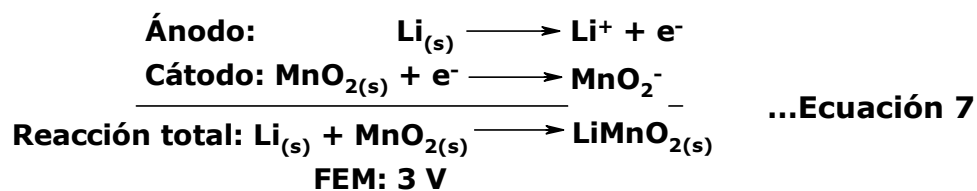


Figura 10. Descripción esquematizada de una pila botón de litio/dióxido de manganeso (Fuente: http://support.radioshack.com/support_tutorials/batteries/bt-lithium-main.htm)

Durante la descarga los iones de litio formados se liberan del ánodo y se incorporan a la red cristalina del dióxido de manganeso, en donde el manganeso cambia formalmente su estado de oxidación de Mn^{4+} a Mn^{3+} (Jacobi en Kiehne, 2003):

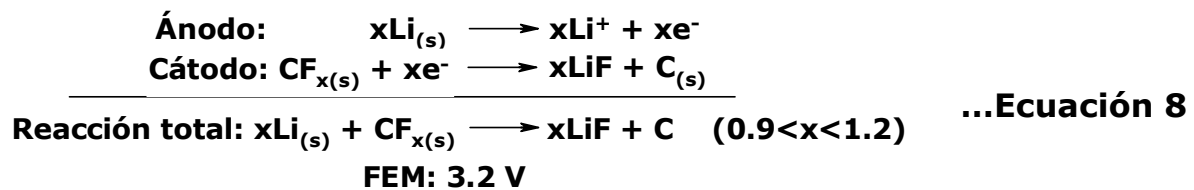


Estas pilas son manufacturadas como pilas botón, circulares (más grandes que las de botón) con rosca o de tipo bobina. Estas pilas se emplean en relojes, calculadoras, memorias, sensores, audífonos para sordera, cámaras, radios, lámparas, máquinas de afeitar y equipos de seguridad y rescate (Jacobi en Kiehne, 2003).

- **Sistema litio/monofluoruro de carbono**

El principio del diseño de las pilas de litio/monofluoruro de carbono es comparable al de las pilas de Li/MnO₂. El material activo del cátodo es el monofluoruro de carbono, elaborado con grafito, coque o carbón activado y llevado a fluoración a 200-800 °C, con una proporción C:F de 1:0.5 a 1:1, y que produce CF_{0.5} negro o CF_{1.0} blanco. El esquema de reacción muestra que durante la descarga el ión litio proveniente del ánodo reacciona formalmente con el monofluoruro de carbono para formar fluoruro de litio y carbón. Se usa una mezcla 1:1 de carbonato de propileno y dimetoxietano con la sal conductora de tetrafluoroborato de litio, que actúa como electrolito. Este último compuesto puede ser sustituido por hexafluoroarsenato de litio en γ -butirolactona.

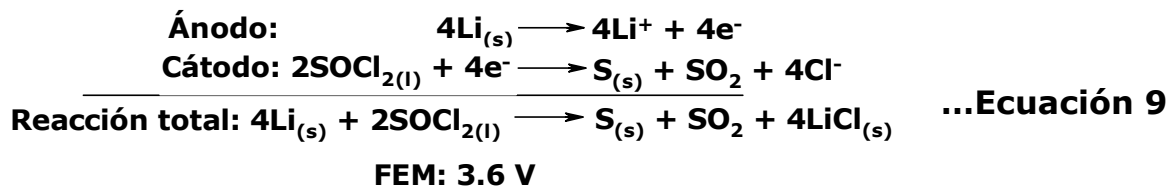
Las semirreacciones y la reacción total se muestran a continuación:



Los formatos de estas pilas son del tipo botón: como discos ultradelgados, circulares o como pequeños *pins*. Por su lenta velocidad de descarga, se les utiliza en memorias de equipos electrónicos (Jacobi en Kiehne, 2003).

- **Sistema litio/cloruro de tionilo**

Este sistema es de los más importantes, ya que ofrece uno de los más altos voltajes (3.6 V) y una densidad de energía similar a cualquier otra pila. Las reacciones son las que siguen:



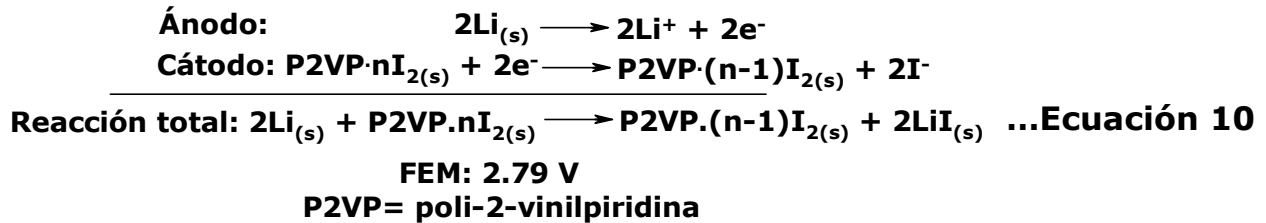
El azufre como producto le confiere al sistema mayor seguridad para su manejo. El cloruro de tionilo funciona tanto como el material del cátodo como electrolito, en combinación con la sal de tetracloroaluminato de litio 1.0-1.8 M para una mejor conductividad iónica. Tiene un colector de corriente de carbón.

Hasta la fecha sólo se producen en forma de pilas circulares y prismáticas. Son usadas con fines militares, memorias y plantas de emergencia. Por su contenido, se debe tener un cuidado especial con estas pilas ya que contienen materiales venenosos, no se debe recargar, no se debe tratar de abrir, incinerar o hacer otros malos usos ya que pueden explotar (Jacobi en Kiehne, 2003).

- **Sistema litio/yodo**

Este sistema fue ocupado por primera vez en 1972 en un marcapasos; su rasgo principal es su extremadamente alta densidad de energía, su duración y su seguridad. Este sistema está basado en el diseño del par

electrónico litio-yodo, un sistema de alta energía. La reacción de descarga se describe a continuación:



El producto de reacción es yoduro de litio que funciona como electrolito y separador de los electrodos. El cátodo es una mezcla de yodo con poli-2-vinilpiridina con proporciones $\text{I}_2:\text{P2VP}$ de 20:1 a 30:1, formando un complejo. El P2VP que funciona como un estabilizante para el yodo, ya que reduce su presión de vapor y además es un conductor.

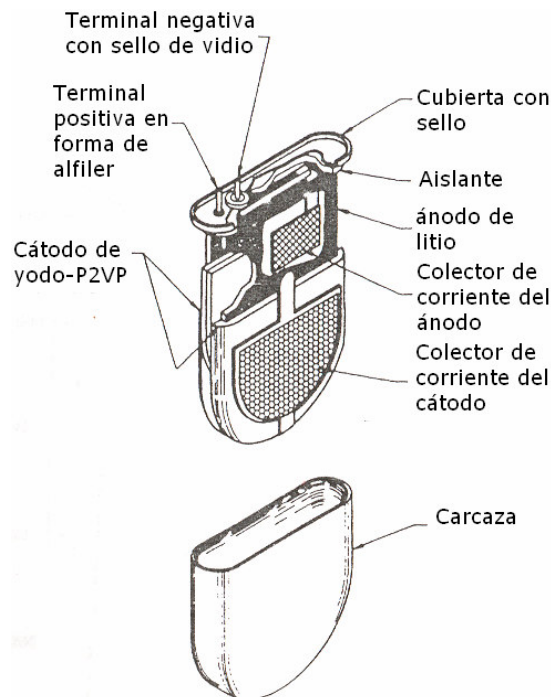


Figura 11. Pila para marcapasos de litio-yodo (Fuente: Jacobi en Kiehne, 2003)

Este sistema está disponible para marcapasos, en una geometría semicircular de 5 x 30 x 40 mm y un peso de 10 a 30 g (Figura 11) Para aplicaciones industriales está disponible en la forma rectangular.

También se ha manufacturado en el formato de botón. Es aplicado en memorias, sensores y aparatos de monitoreo, pero principalmente en marcapasos, los cuales pueden durar implantados de 5 a 10 años e incluso más (Jacobi en Kiehne, 2003)

1.6.2 Pilas secundarias

a) Pilas níquel-cadmio

El desarrollo de este sistema se llevó a cabo a principios del siglo XX en paralelo con la pila de níquel-hierro; hasta la fecha permanecen en el mercado en aplicaciones estacionarias (plantas de emergencia, herramientas portátiles, celulares, teléfonos inalámbricos y demás aparatos electrónicos) o de tracción (de ignición para vehículos).

En el caso del formato cilíndrico (Figura 12), los electrodos están separados por un separador poroso. Ambos electrodos y el separador están enrollados; tiene un mecanismo de ventilación, ya que al sobrecargar la pila se puede producir oxígeno en el electrodo de níquel. Éste se puede abrir automáticamente para liberar presión en caso de presentarse producción de gases (http://support.radioshack.com/support_tutorials/batteries/bt-nicd-main.htm, Nishio y Furukawa en Besenhard, 1999).

Cuando la pila está cargada, el ánodo está hecho de cadmio metálico y el cátodo de oxihidróxido de níquel (NiOOH). Cuando se descarga la pila, los iones Ni^{3+} se reducen a Ni^{2+} , y el Cd metálico se oxida a Cd^{2+} formando un hidróxido con ayuda del electrolito de acuerdo a la ecuación 11 (Berdnt en Kiehne, 2003):

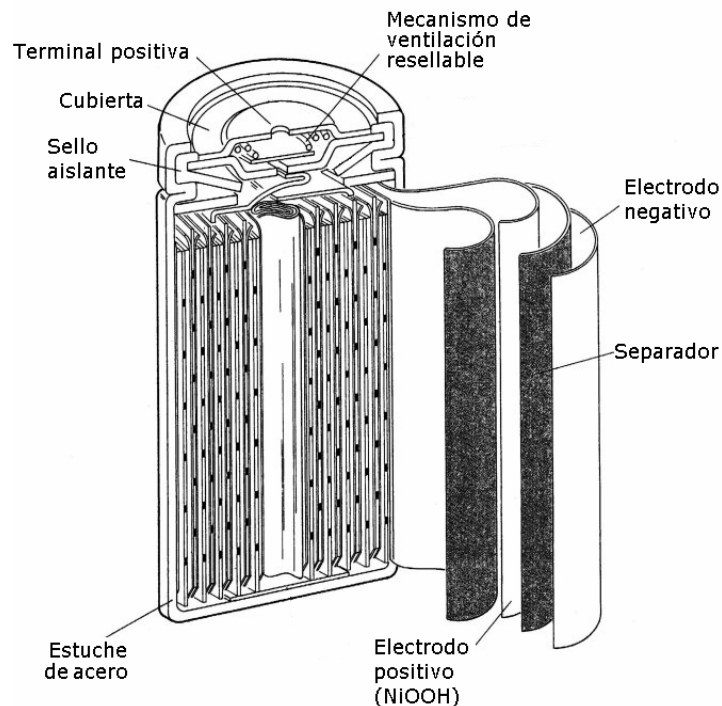
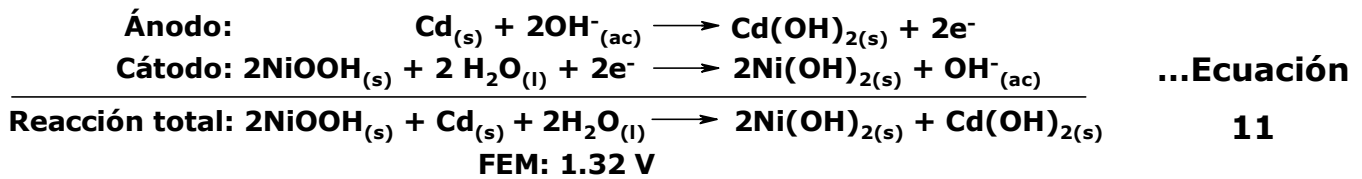


Figura 12. Diagrama de una pila cilíndrica de tecnología de níquel (Fuente: http://support.radioshack.com/support_tutorials/batteries/bt-nicd-main.htm)

En el caso del cátodo, la reducción del oxihidróxido se lleva a cabo con agua, que fue producida por la reacción de carga de la pila. Cabe señalar que la reacción de recarga no es exactamente inversa a la reacción de descarga, ya que se forma una mezcla de las especies de Ni^{2+} , Ni^{3+} y Ni^{4+} . En la Figura 13 se muestra un esquema del mecanismo de reacción del electrodo de hidróxido de níquel en el proceso de carga y descarga de la pila; este mecanismo también se presenta en las demás tecnologías que contienen níquel:

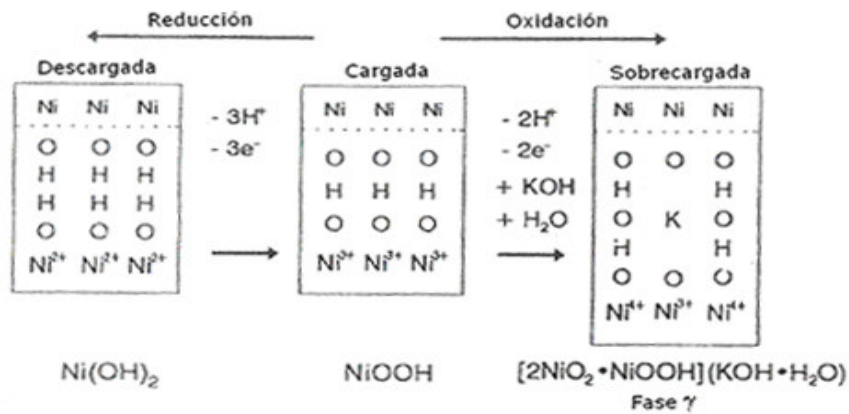


Figura 13. Esquema simplificado del mecanismo de reacción de carga-descarga del electrodo de hidróxido de níquel Fuente: Berndt en Kiehne, 2003

Las pilas de níquel-cadmio poseen una serie de características que le otorgan ventajas respecto a otras, por ejemplo, presentan alta descarga de corriente y se ha observado que la disminución de su eficiencia es mínima después de 1,000 ciclos de descarga; tiene baja resistencia eléctrica y un voltaje de descarga constante en toda su vida útil, puede trabajar en un intervalo largo de temperatura y, además, pueden almacenarse durante largos periodos de tiempo sin que se observen daños en su funcionamiento. La principal desventaja es la toxicidad del

cadmio, el cual se ha tratado de suprimir desarrollando tecnologías alternativas con componentes inocuos y tratando de mejorar su eficiencia (Nishio y Furukawa en Besenhard, 1999)

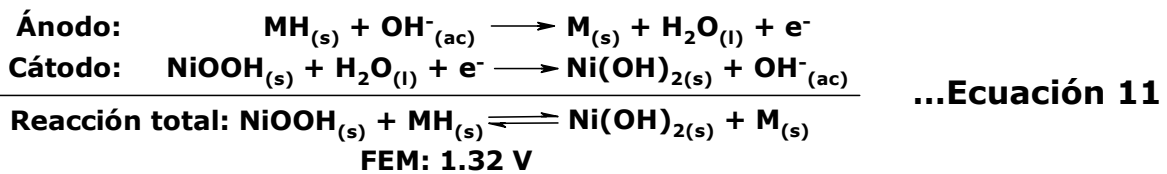
La cantidad de carga de una pila puede disminuir gradualmente debido al uso y a la edad. En el caso de las pilas que contienen níquel (NiCd y Ni-MH), se presenta un fenómeno interesante: cuando se recarga una pila sin cuidar que esté totalmente descargada, se observa una formación de cristales que impiden la descarga completa en ciclos posteriores o puede causar una rápida auto-descarga de la pila. A este fenómeno se le denomina comúnmente efecto memoria, pero es más correcto decir que es un decremento en el voltaje. Este problema se evita descargando la pila completamente en cada ciclo antes de recargarla (http://support.radioshack.com/support_tutorials/batteries/bt-nicd-main.htm, www.batteryuniversity.com).

b) Pila de níquel-hidruro metálico (NiMH)

Las pilas de níquel-hidruro metálico fueron introducidas en 1990 al mercado como una opción de sustitución de las pilas de níquel-cadmio. En estructura son similares a las pilas de níquel-cadmio, incluso en la composición del electrolito y el cátodo. La diferencia reside en el ánodo, donde la especie activa es hidrógeno elemental, y al ser éste una especie gaseosa, se utiliza una aleación hidrógeno-absorbente para almacenarlo.

Durante la descarga, el hidrógeno absorbido como hidruro en la aleación reacciona con los iones oxhidrilo en la superficie de ésta para formar

agua. En esta reacción se producen electrones que viajan al cátodo, en donde el agua formada en el ánodo reacciona con el oxihidróxido de níquel para formar hidróxido de níquel, como lo muestra la Ecuación 11 (Berdnt en Kiehne, 2003):



Durante la carga, se lleva a cabo el proceso contrario, y el agua formada se rompe para desprende hidrógeno y absorberse en su forma elemental en la aleación del ánodo (Nishio y Furukawa en Besenhard, 1999). En la Figura 14 se muestra un esquema del mecanismo de reacción en los procesos de descarga y de carga, en donde se muestra lo que sucede en ambos electrodos.

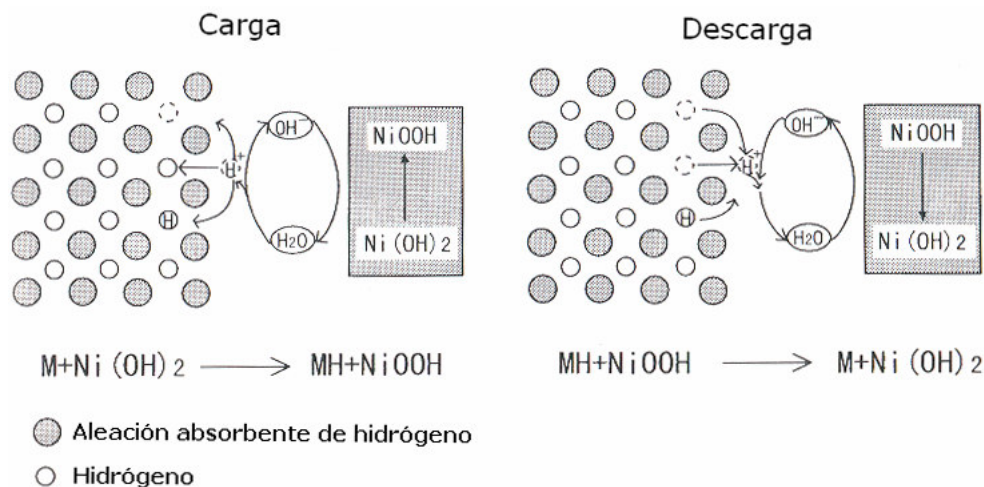


Figura 14. Mecanismo de reacción del proceso de carga-descarga en el electrodo MH (Fuente: Nishio y Furukawa en Besenhard, 1999)

Las aleaciones hidrógeno-absorbentes ocupadas en este tipo de pilas fueron descubiertas en la década de 1960. Son principalmente aleaciones de tierras raras y otros elementos de transición (Cuadro 5) Tienen la capacidad de absorber grandes cantidades de hidrógeno en un medio alcalino y la velocidad de absorción-desorción es alta; incluso tienen mejores atributos que otros metales absorbentes de hidrógeno como el paladio, que es un metal utilizado como catalizador, pero no ofrece un equilibrio de absorción de hidrógeno razonable a temperatura y presión ambientales como los anteriores.

Cuadro 5. Clasificación de aleaciones absorbentes de hidrógeno y sus componentes

Clasificación A_uB_v	Componentes actuales	Capacidad de almacenamiento	Observaciones
AB ₅ (LaNi ₅)	A: Misch metal*, La, Ce, Ti B: Ni, Co, Mn, Al	~ 300	Actualmente, la aleación más usada
AB ₂ (TiNi ₂)	A: V, Ti B: Zr, Ni (+ Cr, Co, Fe, Mn	~ 400	Base de aleaciones multicomponentes
AB (ZrNi)	A: Zr, Ti B: Ni, Fe, Cr, V		Usadas inicialmente para almacenamiento de hidrógeno en coches y en electrodos
A ₂ B (Ti ₂ Ni)	A: Mg, Ti B: Ni		

(*) El componente misch metal (Mm) es una mezcla de tierras raras (La, Ce, Pr, Nd). Su composición depende del mineral de donde se extrajo. Muchas veces se le utiliza en vez del lantano puro por su costo.

Fuente: Berdnt en Kiehne, 2003

En la actualidad se han desarrollado aleaciones hidrógeno-absorbentes en donde los elementos componentes tienen diferente capacidad de absorber hidrógeno, al formar hidruros de distinta fuerza de enlace (ya sea fuerte o débil) Dependiendo de la aplicación que se le vaya a dar, será la proporción de estos componentes.

Existe una amplia variedad de aleaciones, pero se pueden clasificar de acuerdo a la proporción de sus componentes, $AuBv$, en donde A representa el elemento que forma el metal que forma el hidruro fuerte y B el metal que forma el hidruro débil. Con el fin de reducir precios, los componentes A y B pueden ser la mezcla de varios elementos.

Las principales características de operación de las pilas de níquel-hidruro metálico de acuerdo a Berdnt en Kiehne (2003), son:

- Su capacidad de almacenamiento de energía es 80 % mayor que las pilas de níquel-cadmio⁵
- Una resistencia interna baja, lo que permite una alta velocidad de descarga
- Puede tener más de 1,000 ciclos de carga y descarga
- Sus materiales son menos dañinos al ambiente

Se pueden mencionar tres desventajas del uso de la tecnología NiMH en comparación del sistema NiCd (Berdnt en Kiehne, 2003):

- A bajas temperaturas y en aparatos con baja resistencia se limita la velocidad de desorción del hidrógeno, lo que se refleja en la eficiencia de la pila. Esta es la razón de que en algunas aplicaciones se prefiere ocupar las pilas de NiCd en vez de las de NiMH.

⁵ Esto es posible por la aleación absorbente de hidrógeno utilizada como ánodo; como ya se ha mencionado anteriormente, estas aleaciones absorben una gran cantidad de hidrógeno y la reacción de absorción-desorción es reversible; las características de las pilas hechas con esta tecnología pueden cambiar de acuerdo al tipo de aleación utilizado.

- El proceso de absorción-desorción del hidrógeno en la aleación no es completamente reversible y genera calor. Esto resulta un problema para los equipos de alta demanda de energía; como por ejemplo taladros portátiles, por lo que se prefiere usar pilas de NiCd.
- Al igual que las pilas de níquel-cadmio, las pilas de níquel-hidruro metálico también presentan efecto memoria, pero es menos notable que en la primera tecnología.

De cualquier manera, la popularidad del sistema Ni-MH sigue creciendo, especialmente desde que se empezó a utilizar como fuente de poder para computadoras, teléfonos móviles y otros aparatos similares.

c) Pila de ión-litio

Las pilas de ión-litio están disponibles desde principios de la década de 1990 y Sony® es la compañía pionera en el diseño de esta tecnología.

Los electrodos del sistema ión-litio tienen una estructura de red, los iones litio están adsorbidos en estas estructuras y cuando la pila está en uso los iones emigran de un electrodo a otro.

El ánodo del sistema ión-litio es de grafito, y la composición del cátodo y el electrolito puede variar de acuerdo a la aplicación, ya que el cátodo puede ser de óxido de litio y cobalto (LiCoO_2) u óxido de litio y manganeso (LiMn_2O_4), que son los cátodos más comunes; el electrolito es líquido, regularmente son mezclas de disolventes orgánicos (por ejemplo: carbonatos de alquilo, dimetoxietano, tetrahidrofurano, etc.)

con sales de litio de aniones voluminosos (LiClO_4 , LiBF_4 , LiAsF_6 , LiPF_6 , LiAlCl_4 , últimamente $\text{Li}(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2\text{N}$, $\text{Li}(\text{C}_2\text{F}_5\text{SO}_2)_2\text{N}$ y $\text{Li}(\text{CF}_3\text{SO}_2)_3\text{C}$), confiriéndole al electrolito diferentes propiedades que influyen en la conductividad eléctrica y iónica (http://support.radioshack.com/support_tutorials/batteries/bt-nimh-main.htm, Berdnt en Kiehne, 2003)

En la Figura 15 se muestra un esquema del mecanismo de reacción de las pilas de ión-litio durante los procesos de descarga y carga. En el proceso de descarga de la pila los iones litio, que se encuentran intercalados en la estructura del grafito, emigran al cátodo de óxido metálico y al mismo tiempo los electrones liberados emigran por el conductor eléctrico. En el proceso de recarga sucede la reacción contraria. (Nishio y Furukawa en Besenhard, 1999).

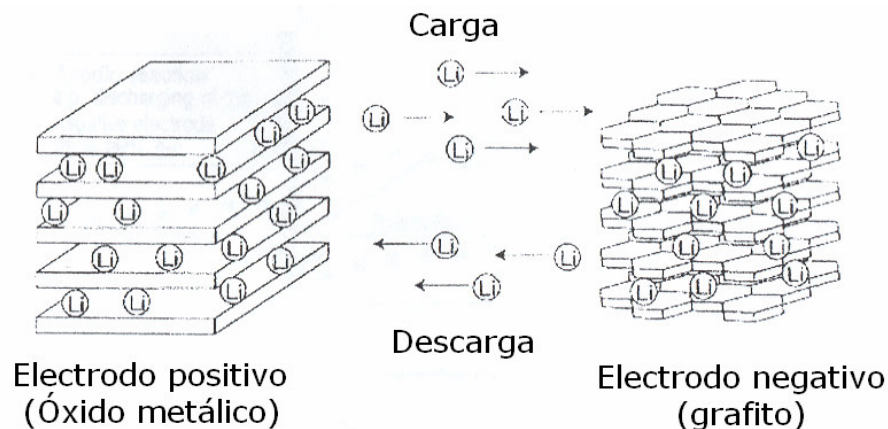
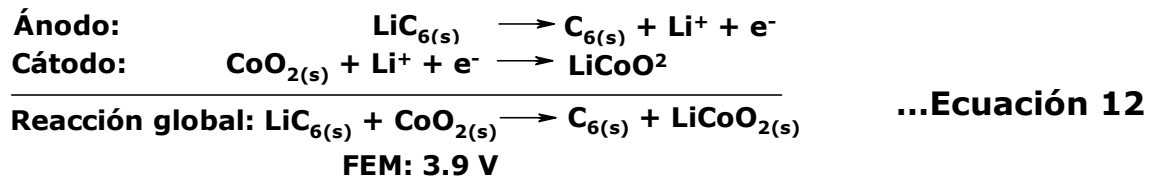


Figura 15. Mecanismo de reacción de carga-descarga en una pila de ión-litio (Fuente: Berdnt en Kiehne, 2003)

En la Ecuación 12 se muestra la reacción de descarga de una pila de ión litio con cátodo de óxido de cobalto y litio (Berdnt en Kiehne, 2003):



La estructura de una pila cilíndrica de ión-litio es similar a la de NiCd y de NiMH como se puede ver en la Figura 12. Entre las principales ventajas de este sistema se puede mencionar que en general son más ligeras y presentan mayor densidad de energía que las pilas de níquel-cadmio y níquel-hidruro metálico (NiCd: 40-50 Wh/kg, NiMH: 70-80 Wh/kg, Ión Li: 110-130 Wh/kg) Pueden recargarse más de 1,000 ciclos sin requerir que se descarguen totalmente, pues no presentan efecto memoria como las de níquel (NiCd y NiMH); y además pueden operar en un amplio intervalo de temperatura. Al ocupar un electrolito en estado líquido, el formato de las pilas de ión-litio se limita a la forma prismática y cilíndrica.

Esta tecnología presenta diversas desventajas como el hecho que el costo de producción y el precio de venta de las pilas son altos pues es una tecnología relativamente nueva (http://support.radioshack.com/support_tutorials/batteries/bt-nimh-main.htm). Otra desventaja es el peligro de explosión de estas pilas al exponerse a ambientes con altas temperaturas, como una computadora portátil sin ventilación o al estar expuestas por periodos prolongados a la luz del sol. Al ser el litio un metal muy reactivo, con las altas temperaturas puede llegar a reaccionar con el material del cátodo liberando altas cantidades de calor e incluso se puede aumentar la presión interna a causa de los componentes volátiles del electrolito y como consecuencia llegar a

explotar. Las compañías han hecho el esfuerzo de mejorar el diseño del sistema para evitar este percance (Berdnt en Kiehne, 2003). Las pilas de ión-litio son comúnmente usadas en celulares, computadoras portátiles y otros aparatos electrónicos.

d) Pila de litio-polímero

Las pilas de litio-polímero tienen el mismo fundamento de las pilas de ión-litio (Ecuación 12); la modificación principal de esta tecnología es el electrolito, que es un electrolito líquido de LiPF_3 u otra sal conductora embebido en un polímero sólido (óxido de polietileno, PEO) y otros aditivos (como SiO_2), que además de hacerla más segura se pueden hacer pilas más delgadas.

La pila de litio-polímero tiene muchos atributos, como mayor densidad de energía, el formato de estos dispositivos es más variado que en el caso de las pilas de ión-litio, pueden ser más delgadas, más ligeros, son más seguros y más baratos que otras pilas recargables. El voltaje de una pila de litio-polímero varía de 2.7 V (descargada) a 4.23 V (cargada completamente) (www.dv-power.com). A pesar de ser más segura que las pilas de ión-litio, la pila de ión-polímero al ser sobrecargada puede causar problemas, ya que el metal litio puede depositarse en la superficie del ánodo de grafito y causar una explosión o incendiarse.

2. ASPECTOS ECONÓMICOS Y LEGALES

2.1. Países productores de pilas

Actualmente los países asiáticos dominan el mercado de las pilas, ya que ofrecen los precios más bajos y han mejorado la calidad de sus productos en forma constante. Sin embargo, las empresas europeas y estadounidenses continúan siendo las principales productoras de pilas para usos especiales de la industria y del sector militar.

En la Figura 16 se presenta el porcentaje de participación en la producción de todo tipo de pilas de los países más importantes de este sector (www.batteryuniversity.com; www.batterydigest.com), en la cual queda evidente el crecimiento de China en este sector productivo (Morrow, 2003).

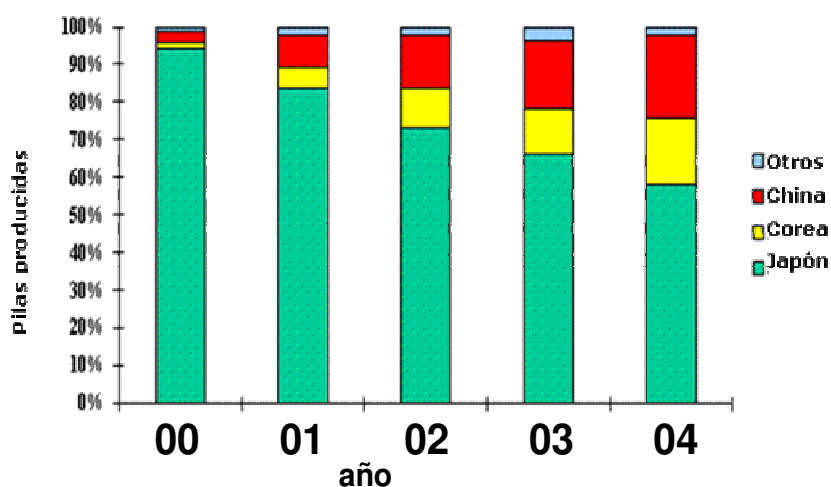


Figura 16. Producción mundial de pilas por países en el periodo de 2000 a 2004 (Fuente: www.batterydigest.com)

2.2. Producción y consumo de pilas

El mercado de las pilas a nivel mundial en 1984, fue de 19,000 millones de dólares (Ménard M & Chevalier C, 1991), mientras que para el 2006 aumentó a aproximadamente 50,000 millones de dólares (www.batteriesdigest.com), de los cuales el 11 % corresponde a la venta de pilas secundarias. De acuerdo a estos datos se calcula un crecimiento anual en promedio de 5.6 %, que es una cifra similar a la estimada por los investigadores del Grupo Freedomia para Estados Unidos, la cual varía de un 6 a un 6.8 % anual, con un valor promedio de 6.5 % (www.freedomiagroup.com). En 2007 las ventas en ese país se calculan en 14,000 millones de dólares y para 2012 se espera que rebasen los 17,000 millones (Figura 17).

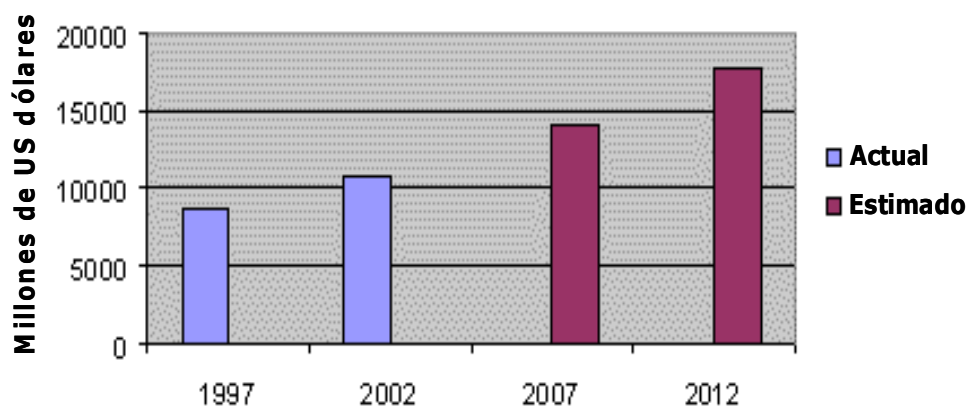


Figura 17. Demanda de pilas en EEUU (Fuente: www.freedomiagroup.com)

2.2.1. Pilas primarias

El mercado mundial de pilas en 2006 fue de \$50,000 millones de dólares, de los cuales \$44,500 millones correspondieron al mercado de pilas primarias y el resto a las secundarias (<http://batteriesdigest.com/>). Para 2008, se espera un mercado de \$65,000 millones de dólares en el que sigue dominando las pilas primarias.

En el Reino Unido se vendieron en 1998, aproximadamente 634 millones de unidades de pilas primarias, de las cuales las alcalinas (Zn-Mn) y Zn-C representaron el 89% y las pilas de NiCd y NiMH el 2% del mercado en 1997 (www.wasteonline.org.uk).

El número de pilas no recargables vendidas en EEUUA en el año 2003 fue de 615.6 millones de unidades de pilas, de las cuales 604 millones correspondieron a las primarias (Figura 18). De acuerdo a los datos del Grupo Freedonia, este tipo de pilas se mantendrán en los siguientes años en la cúspide de las ventas hasta que los costos de las pilas secundarias disminuyan y puedan sustituir a las primarias. Actualmente se están convirtiendo en una gran competencia; por ejemplo, ya en en 2003 las ventas totales de las pilas primarias disminuyeron un 8.21% mientras que las recargables aumentaron un 20%.

En Canadá el porcentaje promedio de pilas primarias estimados del 2000 al 2010 es del 95.2% de las cuales la mayor parte son alcalinas y de Zn-C, ya que en forma conjunta representan el 86.7% del total. Para 2004 el porcentaje de pilas primarias vendidas fue de 95.6 %, y en el caso de las

pilas alcalinas y de zinc-carbón representan el 86.8% del total (Cuadros 8 y 9).



Figura 18. Ventas al menudeo de pilas primarias y secundarias en EEUU en el 2003 en millones de unidades
Fuente: Neilson, A.C. en: www.batterydigest.com

De las pilas primarias, las alcalinas son las de mayor demanda y dominan el mercado (www.the-infoshop.com). La ventaja que determina su consumo sobre el resto de las tecnologías es que pueden ser almacenadas hasta 10 años y tienen mayores densidades de energía que las secundarias, como se comentó en el capítulo anterior.

En la Figura 19 se muestra la proyección de la demanda de pilas primarias en EEUU hasta 2015, realizadas con datos del año 2002, la cual pone en evidencia la preponderancia actual y futura de las pilas alcalinas primarias.

En Europa la tendencia es la misma, ya que de acuerdo a Asociación Europea de Baterías Portátiles (EPBA, 2006), las pilas alcalinas en 2003 ocuparon en Europa el 62% del mercado y el 65% en 2004. El segundo

lugar en importancia lo ocupan las pilas de zinc carbón (Zn-C) con porcentajes de 27 y 25% respectivamente (Figura 20).

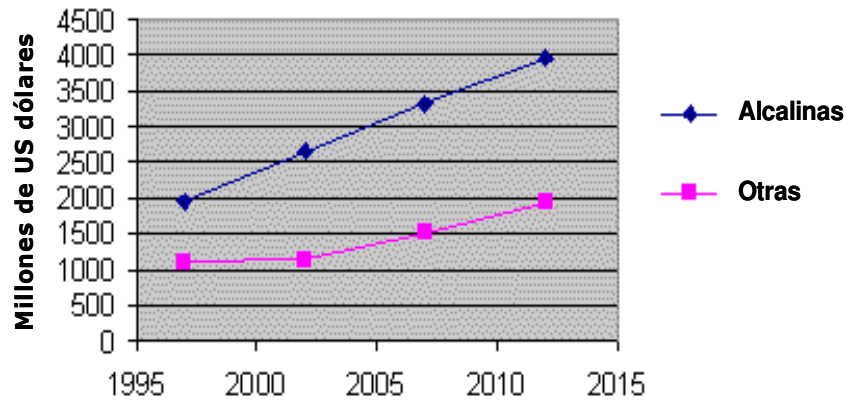


Figura 19. Proyección de la demanda en EEUU de pilas primarias no recargables con base en datos de año 2002
Fuente: www.freedonia group.com

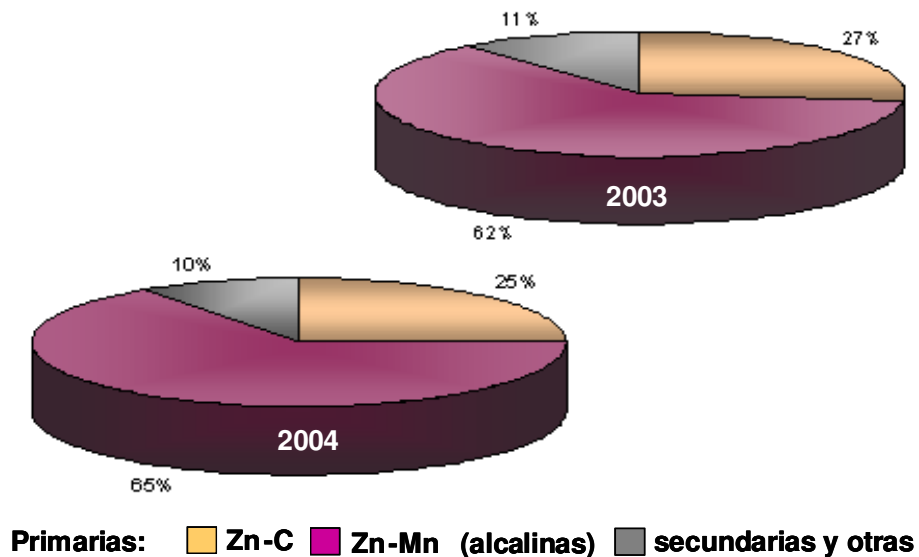


Figura 20. Porcentaje de pilas vendidas en la UE en 2003-2004
(Fuente: EPBAEurope.net)

En el periodo del año 2000 al 2004 las pilas alcalinas y de Zn-C representaron en Europa entre el 80 y 88 % del total de pilas primarias (EPBA, 2006) y el resto correspondió principalmente a pilas de botón y, en menor cantidad a pilas de litio-dióxido de manganeso (Li-MnO₂) (Figura 21).

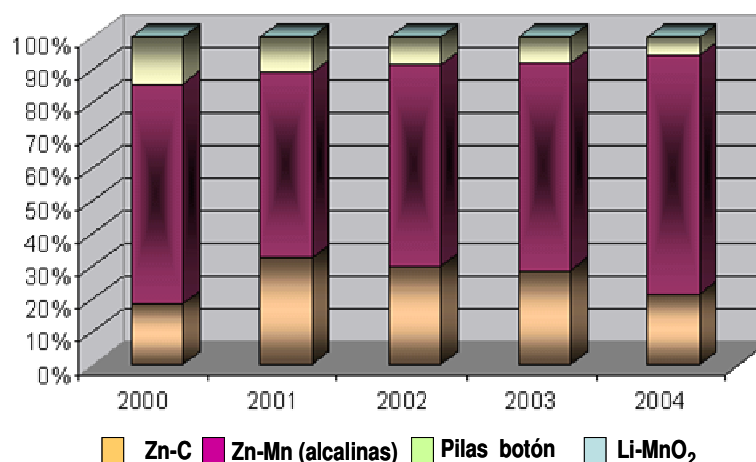


Figura 21. Evolución del mercado de las pilas primarias del año 2000 al 2004 (Fuente: EPBAEurope.net)

Datos muy similares sobre la preponderancia de las pilas alcalinas y de Zn-C, fueron reportados por Euromonitor Internacional en www.batteriesdigest.com. El total de pilas alcalinas en 2003 incluyendo las secundarias de tecnología muy reciente, representaron el 54.3% del mercado mundial y el valor proyectado para 2008 fue de 53.7%. En 2003 el 75% de la venta de las pilas correspondió a primarias (alcalinas, Zn-C, litio y de botón) y de ella, las más vendidas fueron las alcalinas y de Zn-C.

2.2.2. Pilas secundarias

A pesar de que la mayor demanda de pilas corresponde a las primarias, la venta de las secundarias crece más rápidamente, debido en gran parte a la fuerte demanda de productos electrónicos portátiles y a los requerimientos de pilas con más alta energía.

Los teléfonos celulares representan la mayor demanda para este tipo de pilas (solamente en el Reino Unido, en el 2002, se utilizaron aproximadamente 25 millones). Además, la constante reducción de los tiempos de recarga de estas pilas está favoreciendo su venta, la cual en el futuro se verá aún más estimulada por la demanda de los nuevos mercados de vehículos híbridos y eléctricos, y de las nuevas tecnologías para los sistemas de telecomunicación.

Cuando se analizan las tendencias por tipo de pila secundaria que se muestran en la Figura 22, se observa que las de mayor consumo en los años anteriores a 1999, expresado en yenes, fueron de plomo-ácido, las cuales básicamente se utilizan en la industria y en equipos de transporte y no son tema de este estudio. De las pilas portátiles el mayor volumen de ventas en yenes corresponde a NiCd e ion-Li, pero dado que el precio de estas últimas es mayor que las de NiCd, en número de unidades el consumo es menor.

Las proyecciones para 2009 publicadas en www.the-infoshop.com, señalan que las pilas de plomo-ácido seguirán dominando, por la alta demanda en la industria y transporte, y representarán el 60% de las ventas de ese año. El principal atractivo de las pilas de plomo-ácido es el bajo costo del

metal, lo que permite que cada watt-hora se logre a un costo muy bajo. Sin embargo dada la toxicidad del plomo, en prácticamente en todos los países, se obliga a reciclarlas, responsabilizando a los productores de las baterías y a las industrias que las consumen de su acopio y envío a reciclar.

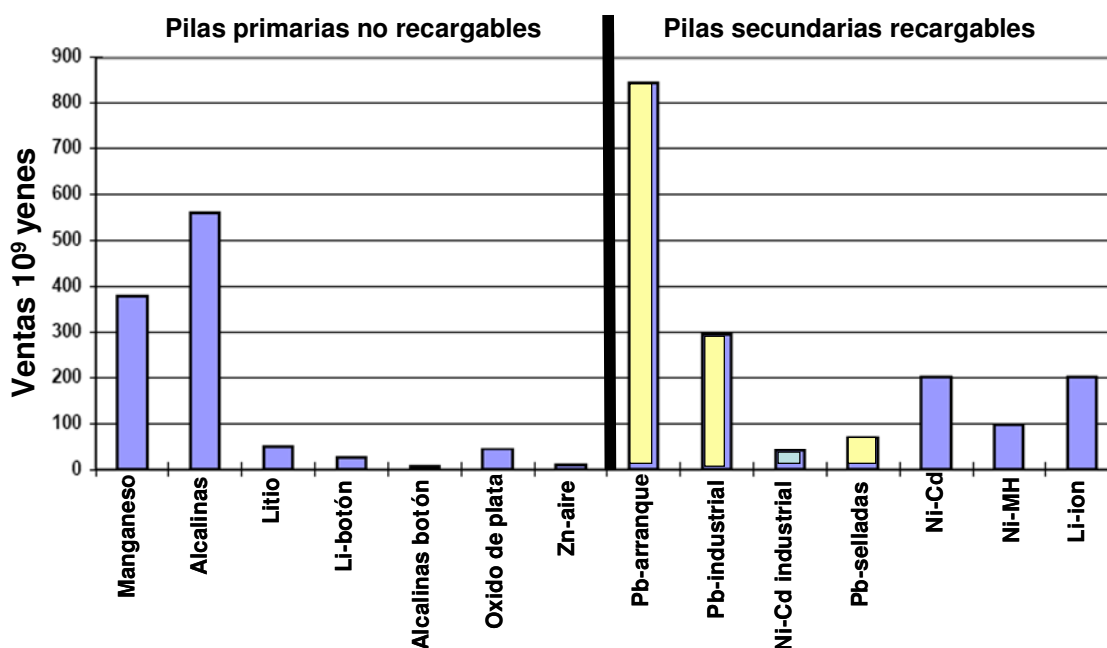


Figura 22. Mercado Mundial por tipo de pilas en 1999 (Fuente: Nomura Research Institute en Noreús, 2000)

En las pilas secundarias de uso doméstico, hasta la década de 1990 dominaron las de NiCd, pero en los años siguientes la tendencia empezó a cambiar y las pilas NiMH y ion-Li empezaron a ganarle parte del mercado. Las tendencias futuras (Figuras 23 y 24), aunque muestran ciertas diferencias, indican claramente que las pilas de litio dominan el mercado. Las pilas de NiMH y ion-Li se introdujeron en los primeros años de la

década de 1990 y desde entonces sus precios han estado disminuyendo⁶, lo cual junto con el hecho de que sus características técnicas son ideales para su uso en teléfonos celulares y computadoras portátiles, explica su posicionamiento actual (ver capítulo 1).

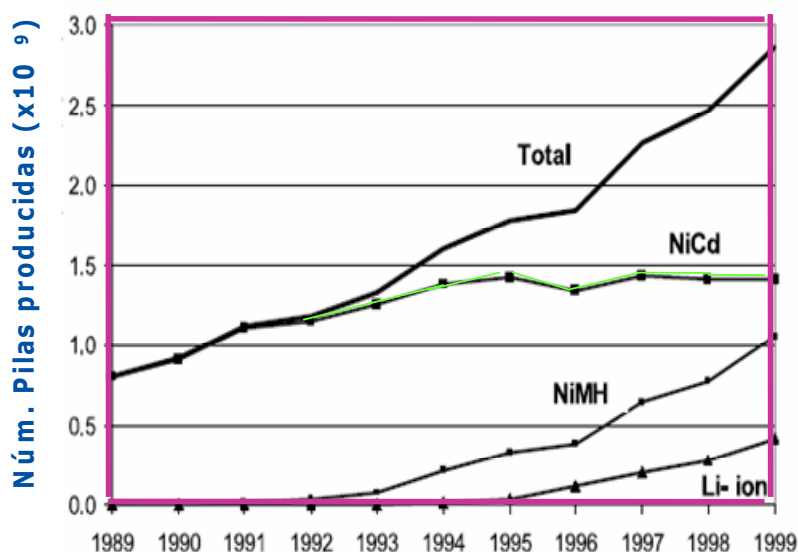


Figura 23. Número total de pilas secundarias producidas a nivel mundial de 1989 a 1999 (Fuente: Rydh y Svard, 2000)

⁶ Las pilas ión-Li han disminuido su precio entre un 20 al 50%, y las de NiCd y NiMH también lo han reducido, pero en menor proporción, de un 10 a un 20% (www.batteriesdigest.com)

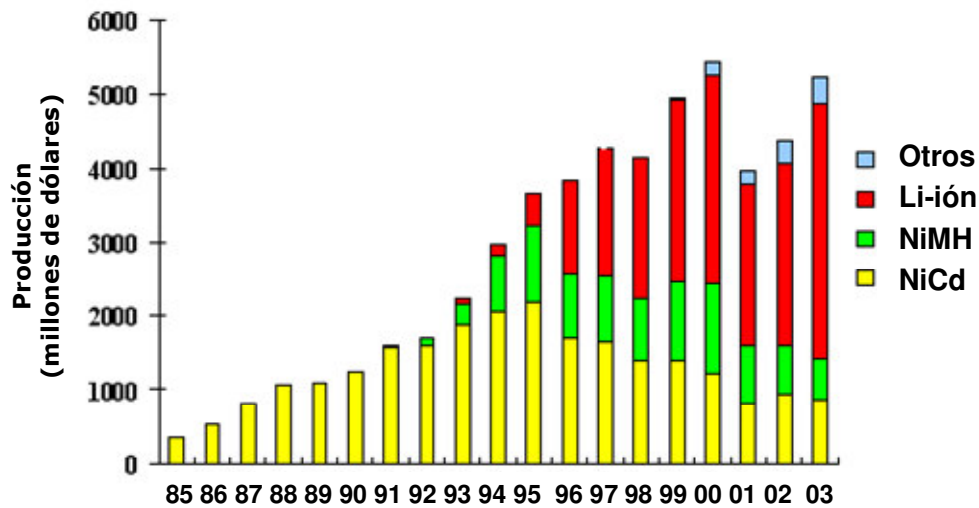


Figura 24. Mercado mundial de pilas de 1985 a 2003

La Figura 25 presenta la distribución en el mercado mundial en el año 2000 de las pilas fabricadas en Japón, y en ella se puede observar que desde ese año las pilas de ión litio ya dominaban el mercado doméstico; sin embargo, en el resto del mundo (dividido por continentes) todavía prevalecían las pilas de NiMH y NiCd. Sin embargo, entre 2006 y 2007 la producción de pilas de NiMH iguala a la de NiCd y en los años siguientes la sobrepasará, pues desde 1996 la producción mundial de NiCd ha estado disminuyendo (Figura 26). Sin embargo, en Canadá preveen un crecimiento de este tipo de pilas (Cuadro 8).

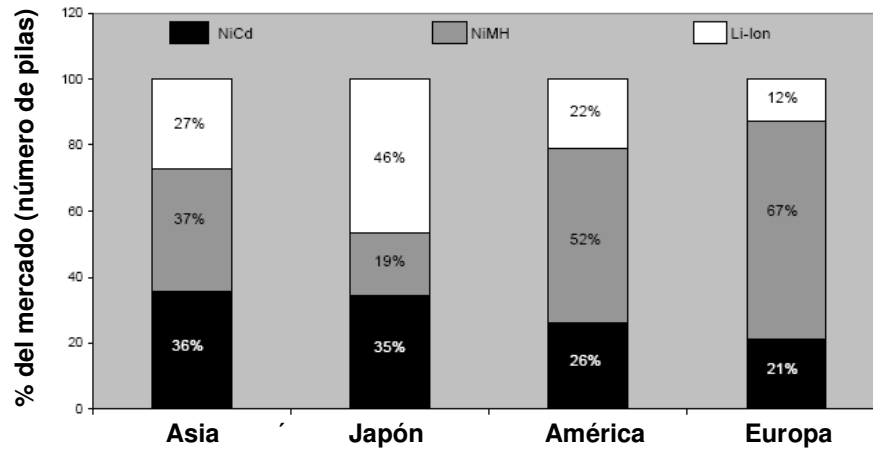


Figura 25. Producción de pilas secundarias japonesas y su distribución en el mercado mundial en 2000. (Fuente: Morrow, 2003)

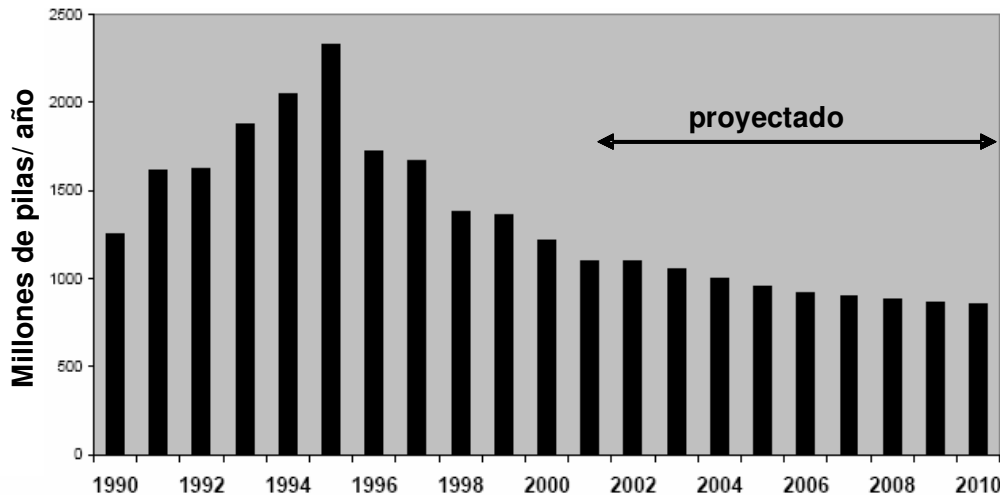


Figura 26. Producción mundial de pilas NiCd de 1990 a 2010 (Fuente: Institute for Information Technology en Morrow, 2003)

Las proyecciones realizadas en Japón señalan una gran parte del mercado en el futuro corresponderá a pilas primarias y secundarias de litio (Power, 2002) y en la Figura 27 se presentan las tendencias hasta 2015 para el consumo de pilas en EEUUA, que también preveen el aumento en la demanda de pilas ión-Li.

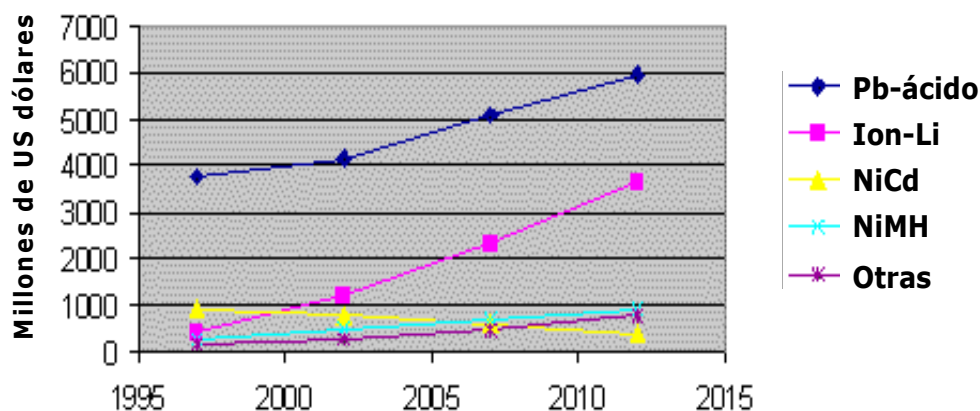


Figura 27 Demanda en EEUA de pilas secundarias, incluyendo las de uso industrial y automotriz, proyectada hasta 2015 (con base en datos de 2002) (Fuente: www.freedoniagroup.com)

El principal nicho de mercado de las pilas NiCd, es el de las herramientas eléctricas portátiles. No obstante Noréus (2000) predice que en forma general, incluyendo en este campo de aplicación van a ser sustituidas a corto plazo por las de NiMH, con excepción de su uso en algunas aplicaciones especiales, como luces de emergencia de hospitales y aditamentos de aviones.

La sustitución de las pilas NiCd va a acelerarse a partir del 2008, ya que la UE planea prohibir su venta en sus países miembros. Esta restricción ha sido promovida especialmente por los países del norte de Europa, y se justifica con base en los siguientes factores:

1. Las nuevas tecnologías de pilas de Li y NiMH tienen un mejor comportamiento, como una mayor densidad de energía y la ausencia de efectos de memoria (Moshtev and Johnson, 2000).
2. La toxicidad del cadmio para la biota y su acumulación en el ambiente han llevado a establecer estrictas regulaciones, como

límites de su contenido en pilas que se permiten disponer en rellenos sanitarios, y el reciclado obligatorio de las pilas caducas (ver Capítulo 3).

3. El cadmio es un subproducto de la producción del zinc -y en menor proporción del plomo y cobre-, por lo que su disponibilidad y precio no siempre son los óptimos para la producción de pilas en cantidades y precios acordes con los requerimientos del mercado. En los últimos años el consumo de este metal fue mayor que su producción y su precio ha variado.

En el caso de los países en vías de desarrollo como China, la India, América Latina, entre otros, se prevee que el consumo de aparatos electrónicos aumente, y por lo tanto la producción y consumo de pilas de NiCd siga creciendo.

2.2.3. Pilas de mercurio

El uso de pilas de mercurio ha disminuido en las últimas dos décadas. En 1980 ocupaban el primer lugar en producción (cerca de 1,000 toneladas anuales) pero para 1990 disminuyeron al 10% (117 toneladas anuales). En el Cuadro 6 se muestra la drástica reducción en la demanda de pilas de mercurio de 1990 a 2010.

Cuadro 6. Demanda de pilas de mercurio de 1990 a 2010 (millones de dólares)

Producto	Año				
	1990	1995	2000	2005	2010 (proyección)
Productos electrónicos	283	206	615	850	1182
\$pilas/\$productos electrónicos	0.14	0.06	0.01	Valor extremadamente pequeño	Valor extremadamente pequeño
Ventas de pilas de mercurio	40	23	5	Valor extremadamente pequeño	Valor extremadamente pequeño
% de mercurio	2.1	0.9	0.1	Valor extremadamente pequeño	Valor extremadamente pequeño
Mercado de las baterías primarias	1903	2495	3670	4975	6720

Fuente: Freedonia Group Inc.

Actualmente, el uso del mercurio en pilas se restringe a⁷:

- 1) Manufactura de electrodos de las pilas de botón de óxido de mercurio
- 2) Fabricación de pilas de mayor tamaño de mercurio para usos militares o médicos
- 3) Aditivo de las pilas de botón, como las de Zn-aire que se utilizan en equipos para sordos; de las pilas de óxido de plata que se usan en relojes y cámaras fotográficas; y de las pilas alcalinas de manganeso que se usa en termómetros digitales, calculadoras, juguetes, etc.

En EEUA se espera eliminar el mercurio de las pilas de botón tan pronto el desarrollo tecnológico lo permita (www.nema.org, National Electrical

⁷ El pasivo ecológico y el impacto actual del mercurio utilizado en la fabricación de pilas es tema del capítulo 4 de este estudio.

Manufacturation Association) y en la UE se espera prohibirlas para el año 2008 (Comisión de las Comunidades Europeas, 2006).

2.3. Volúmenes generados de pilas.

De acuerdo a RIS International Ltd. (2007), se estima que en el 2004 en Canadá se vendieron 450 millones de pilas, que equivalen a 15,182 toneladas; de esta cantidad, 430.5 millones de unidades (10,991 toneladas) corresponden a pilas primarias y 19.7 millones de unidades (4,191 toneladas) a pilas secundarias. En el Cuadro 7 se muestran la cantidad en unidades de pilas vendidas en el 2004 por tipo. Este cuadro muestra que las pilas primarias dominan el mercado en Canadá, con el 96 % de las pilas vendidas. Las pilas alcalinas representan el mayor número de unidades vendidas, con el 69 % del total. Las pilas secundarias ocupan una pequeña porción del Mercado con solo el 4 % del total; el 70 % de las pilas secundarias vendidas lo representa las de níquel-cadmio.

Cuadro 7. Cantidad (miles de unidades) de pilas vendidas en el 2004 en Canadá y el porcentaje por tipo de pila

Tipo de pila y química	Unidades vendidas (en miles)	% de ventas por segmento(*)	% total de ventas
Primaria			
Zinc-carbón (ZnC)	81,190	18.90	18.00
Alcalina (ZnMnO ₂)	309,537	71.90	68.80
Zinc-aire (ZnO ₂)	23,078	5.36	5.13
Litio	6,049	1.41	1.34
Óxido de plata (Ag ₂ O)	10,668	2.48	2.37
Subtotal primarias	430,522	100.00	95.64
Segmento de pilas secundaria			
Níquel-cadmio (NiCd)	12,810	65.10	2.85
Níquel-hidruro metálico (NiMH)	4,100	20.80	0.91
Ión-litio (Li-ion)	1,540	7.82	0.34
Ión-litio polímero	140	0.71	0.03
Pilas portátiles plomo-ácido (SSLA)	1,093	5.55	0.24
Segmento de pilas secundarias	19,683	100.00	4.37
TOTAL	450,205		100.00

Fuente: RIS Internacional Ltd, 2007

En este mismo estudio, se reportan datos de otros países:

- La Asociación Británica de fabricantes de Pilas reporta que el 89 % de las pilas comercializadas en el Reino Unido son primarias, de las cuales el 69 % del total son alcalinas y el 24 % de zinc-carbón.
- En la Unión Europea, la Asociación Europea de Pilas Portátiles (EPBA) reporta que las pilas alcalinas representan el 62 % de las unidades vendidas en el 2002. El 92 % de las pilas vendidas ese mismo año corresponden a las primarias

Labouze (2003) en su evaluación de impacto del reciclado de pilas de níquel-cadmio, reporta que en la Unión Europea en el 2002 se vendieron alrededor de 160 ktoneladas de pilas portátiles. De este valor el 75 % en

peso corresponde a las pilas no recargables. En unidades, las pilas no recargables ocupan un 90 % del mercado y el resto a las no recargables.

Fisher (2006) reporta que en el Reino Unido, en el año 2003 se comercializaron 24,850 toneladas de pilas, el 79.13 % en peso son primarias; el 78.6 % del total sólo correspondieron a las pilas alcalinas y de zinc carbón. El otro 20.87 % son pilas secundarias (Cuadro 8).

Cuadro 8. Cantidad (toneladas) de pilas comercializadas en el Reino Unido en el año 2003

Tecnología	tipo	Peso (toneladas)	% en peso	Usos típicos
Ag ₂ O	primaria	5	0.02	Cámaras, calculadoras
Zn-aire(ZnO)	primaria	12	0.05	Equipo de sordera y de bolsillo
Li-Mn	primaria	11	0.04	Calculadoras de bolsillo
Li	primaria	107	0.43	Equipo de fotografía, controles remotos y electrónicos
Zn-C	primaria	4,628	18.62	Juguetes, relojes, lámparas de flash
alcalinas	primaria	14,899	59.96	Radios, linternas, caseteras, cámaras y juguetes.
ion-Li	secundarias	1,064	4.28	Teléfonos celulares, computadoras portátiles
NiCd	secundarias	1,024	4.12	Luces de emergencia
NiCd	secundarias	1,261	5.07	Teléfonos inalámbricos y herramientas portátiles
NiMH	secundarias	1,300	5.23	Teléfonos celulares e inalámbricos
Plomo-ácido	secundarias	538	2.17	Aplicaciones para entretenimiento (juegos)
TOTAL		24,850	100	

Fuente: Fisher, 2006

Cuadro 9. Volumen de pilas comercializadas de 2001 a 2010 en Canadá (masa, unidades y %).

tipo de pilas	tecnología	peso kg/ unidad	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	promedio en masa	unidades%	peso ponderado		
	Zinc carbón	0.027	2,033	2,085	2,137	2,192	2,240	2,291	2,346	2,404	2,466	2,532	2,273	84,170	16.7	0.005	
	Alcalinas	0.028	7,178	7,735	8,326	8,667	9,289	9,963	10,693	11,483	12,340	13,270	9,894	353,371	70.0	0.020	
primarias	Zinc aire	0.033	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	45	0.0	0.000	
	Litio	0.016	76	84	92	97	106	114	123	132	140	149	111	6,956	1.4	0.000	
	Óxido de plata	0.001	13	13	13	13	13	13	13	13	12	12	13	12,800	2.5	0.000	
primarias de botón	Zinc aire	0.001	17	18	20	21	22	24	25	27	28	30	23	23,200	4.6	0.000	
total primarias														480,544	95.2	0.000	
	NiCd	0.203	2,018	2,170	2,377	2,600	2,832	3,065	3,339	3,703	4,109	4,543	3,076	15,151	3.0	0.006	
	NiMH	0.093	241	278	326	381	444	513	595	701	826	976	528	5,678	1.1	0.001	
secundarias	ión-litio	0.04	36	43	52	62	74	86	101	122	146	172	89	2,235	0.4	0.000	
	litio-polímero	0.04	4	4	5	6	6	8	10	11	13	14	8	203	0.0	0.000	
	Plomo-ácidas	1.045	1,186	1,186	1,186	1,142	1,142	1,142	1,142	1,142	1,142	1,142	1,155	1,105	0.2	0.002	
total secundarias														24,372	4.8		
TOTALES														17,172	504,916	100.0	0.034

Fuente: RIS Internacional Ltd, 2007

2.4. Consumo de pilas por habitante

2.4.1 Unión Europea (UE)⁸

En los países miembros se comercializaron en el año 2002 aprox. 160,000 toneladas de pilas, siendo que los de mayores ingresos consumen más pilas que los que tienen relativamente menos posibilidades económicas. En el Cuadro 10 se muestra el intervalo del número de pilas generadas por persona al año, que varía de 5-9 (valores bajos) a 10-18 (valores altos).

Cuadro 10. Consumo de pilas por persona en la Unión Europea en 2002

Descripción	unidad
Pilas comercializadas (g/persona/año)	250 a 425
Peso promedio en g de pilas portátiles	25 a 46
Consumo mínimo de pilas/persona	5 a 9
Consumo máximo de pilas/persona	10 a 18

Fuente: Labouze y Monier, 2003

2.4.2 Estados Unidos de América (EEUUA)

En EEUUA los datos reportados sobre el número de pilas totales consumidas por persona al año, resultan incongruentes cuando se comparan con otros países. Shapek, en 1994, reporta que cada consumidor doméstico utiliza de 35 a 90 pilas al año, lo cual es una cifra increíblemente alta. En 1998 se informa que el volumen total de pilas

⁸ Se confunde muchas veces la CEE con la actual CE (Comunidad Europea), y con la UE (Unión Europea), cuando en realidad, no son exactamente lo mismo (aunque la CE es la heredera directa de la desaparecida CEE, y a su vez, la actual CE es sólo una parte de la Unión Europea).

fue de 3,000 millones de pilas para una población aproximada de 280,000,000 de habitantes (www.epa.gov/epr/products/batteries y www.census.gov), lo cual equivale a un consumo *per capita* de 11 pilas. La ACHMM, en 2004 reporta un consumo de entre 10 a 12 pilas por año y una cantidad generada de 8 pilas caducas por persona por año.

Estos valores implicarían que no hubiera habido ningún aumento en el consumo, cuando los datos informan que ha sido de alrededor de un 6% anual. Al comparar el consumo de 10 a 12 pilas *per capita* en EEUA con el reportado para Japón que es de 24 (Cuadro 11) o con el Reino Unido que es de 21 pilas por año por persona, resulta demasiado bajo. Sin embargo, cabe hacer notar que la EPA reporta que se desechan 8 pilas por año por habitante (www.epa.gov), valor congruente con el de consumo *per capita* reportado, considerando que el número de pilas que llegan a los rellenos sanitarios es menor que el consumido.

Cuadro 11 Número de pilas por persona consumidos anualmente en países de alto ingreso

País	Año	Consumo de pilas <i>per capita</i>	Fuente
EEUU	1998	11	Castro y Díaz (2004)
	2003	11.5	
	2004	10-12	
España	2003	10	Castro y Díaz (2004)
Reino Unido	2001	21	www.wasteonline.org.uk
Unión Europea	2002	13	Labouze, 2003
Japón	2000	24	Castro y Díaz (2004)
Japón	2006	13	Battery Association of Japan (www.baj.org.jp/statistics)

2.4.3 América Latina

En algunos países de América Latina, los datos de pilas consumidas *per capita* que se reportan no son congruentes con el nivel de ingresos de su población y su acceso al consumo. En Costa Rica de acuerdo a Soto S. (2005)⁹ se importaron en 2004 1.7 kg de pilas por habitante, el cual dividiéndolo entre el peso máximo y mínimo de una pila (25-40g), da un número de pilas consumidas por persona fuera de cualquier escala. Una posible explicación es que en el peso de las pilas importadas esté incluido el de las baterías de plomo automotrices (peso promedio de 15 kg). Lo mismo puede estar sucediendo con los datos de Ecuador, pues es un país de bajos ingresos y el número reportado de pilas consumidas *per capita* es de 10.6 valor similar al de EEUUA y mayor que el de Argentina o Chile e inclusive de países asiáticos (Cuadro 12).

Cuadro 12 Número de pilas por habitante consumidas anualmente en países de ingresos medios y bajos

País	Año	Pilas por habitante	Fuente
Argentina	1990	10	www.ambiente-ecologico.com
Ecuador	2001	10.6	www.cepis.ops.-oms.org
Chile	1998 /2001	7-9.2	(SEMA-EMS, 1999); www.iepe.org/ecoclubes/pages/noticia1.htm
Filipinas	2000	5	www.blonnet.com
Sri Lanka	2000	5	www.blonnet.com
India	2000	2	

Fuente: Castro y Díaz (2004)

Específicamente en el caso de México, la Asociación Mexicana de Pilas A.C. (Amexpilas) reporta que se consumen 6 pilas primarias (no

⁹ UNDÉCIMO INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA NACION EN DESARROLLO HUMANO SOSTENIBLE. Informe final Situación del Manejo de los Desechos Sólidos en Costa Rica *Investigadora: Silvia Soto*. Costa Rica, 2005.

reciclables) por habitante por año (www.gemi.org.mx/files/02_basurtoamexpilas_abril2006.pdf). Castro y Díaz (2004) determinan que el consumo promedio de pilas/habitante importadas legalmente para el periodo 1994-1998 es de 5.11 y asignan un valor de 4.89 a las de origen ilegal para obtener una cifra de 10 pilas/habitante/año (ver Capítulo 4).

En general después de revisar los datos disponibles a nivel mundial se puede concluir que en los países con ingresos bajos el consumo de pilas por persona y por año varía de 2 a 5, en los que tienen un ingreso medio de 5 a 10 y en los de ingreso alto, el número es ligeramente superior a 10. En este estudio, se realizó un cálculo de las pilas consumidas en México con base en datos proporcionados directamente por la Secretaría de Economía (ver capítulo "Situación Nacional") y el dato obtenido concuerda con el intervalo de un país con ingreso medio.

2.5. Legislación Internacional

2.5.1 Europa

En la década de 1980, los primeros países en abordar la problemática ambiental relacionada con el manejo inadecuado de las pilas usadas, en especial las de óxido de mercurio, fueron Alemania y Suiza, cuyos gobiernos junto con los productores e importadores de pilas establecieron los siguientes compromisos:

- Disminuir la producción de pilas de óxido de mercurio en un plazo razonable
- Establecer un cuidadoso programa de recolección de pilas en colaboración con los distribuidores

Este compromiso fue la base de discusiones e investigaciones sobre el contenido de mercurio en pilas alcalinas y de zinc-carbón, el cadmio de las pilas de níquel-cadmio, el plomo en pilas de plomo-ácido, y otras cuestiones relacionadas con la composición de las pilas y los posibles riesgos para el ambiente.

Posteriormente, otros países europeos todos ellos miembros de la Comunidad Económica Europea (CEE) y actualmente de la Unión Europea, empezaron a involucrarse en la problemática, por lo que en 1991 se elaboró la Directiva 91/157/EEC referente a las pilas y acumuladores que contienen sustancias clasificadas como peligrosas.

El objetivo de la Directiva 91/157/EEC fue establecer programas de control de pilas y acumuladores que contienen cadmio, mercurio y plomo. Estos programas contemplan lo siguiente:

- Reducción del contenido de metales pesados en pilas y baterías
- Reducción gradual de pilas y acumuladores gastados en la basura municipal, para lo cual se estableció su recolección separada
- Promoción del consumo de pilas y acumuladores con concentraciones reducidas de sustancias tóxicas y/o sustitución de las más peligrosas por otras más inocuas
- Promoción para realizar investigaciones y desarrollar nuevos dispositivos con tecnologías más amigables al ambiente
- Promoción de procesos de tratamiento para las pilas gastadas, fabricadas con sustancias tóxicas.

Los dispositivos considerados en la Directiva 91/157/EEC y descritos en el Anexo 1 del mismo documento, son:

- Pilas con más de 25 mg de mercurio por unidad, a excepción de pilas alcalinas
- Pilas alcalinas con más del 0.025 % de mercurio en peso
- Pilas con más del 0.025 % de cadmio en peso
- Acumuladores con más del 0.4 % de plomo en peso

Esta Directiva prohíbe el comercio de pilas y acumuladores con las siguientes propiedades (Artículo 3):

- Pilas alcalinas para uso prolongado en condiciones extremas (debajo de 0 °C y por arriba de 50 °C) que contienen más de 0.05 % en peso de mercurio
- Las demás pilas alcalinas que contienen más del 0.025 % en peso de mercurio, excepto las pilas alcalinas de botón¹⁰ y de otros tipos que también son de botón.

Además, propone un manejo especial para las pilas portátiles gastadas que contienen más del 0.025 % de cadmio en peso y más del 0.4 % de plomo en peso.

Después de esta regulación, se emitió la Directiva 93/86/EEC que obliga a que las pilas de botón que contienen mercurio, acumuladores de níquel-cadmio y acumuladores de plomo-ácido, incluyendo baterías de coches estén etiquetadas claramente señalando que son peligrosas y cual es el tipo de manejo que debe dárseles; con el fin de que la población las acopie por separado y se evite su mezcla con los desechos domésticos. El símbolo consta de un contenedor de basura tachado, y en la parte inferior del mismo el símbolo del elemento químico peligroso que contiene la pila, que ocupa a lo más un 3 % de la superficie de la etiqueta (ver Figura 28)

En diciembre de 1998 la Comunidad Europea, elaboró la Directiva 98/101/EC que es una modificación de la Directiva 91/157/EEC y la cual prohíbe el comercio de pilas y acumuladores que contienen más del 0.0005 % (5 ppm) de mercurio en peso, y de pilas de botón que tienen más del 2 % en peso de mercurio.

¹⁰ Las pilas de formato de botón tienen un límite permisible de mercurio mayor al de otros formatos de mayor tamaño, ya que, al ser más pequeñas, se necesita controlar al máximo la emisión de gases que pueden hacer explotar a la pila, por ello necesitan un mayor contenido de mercurio.

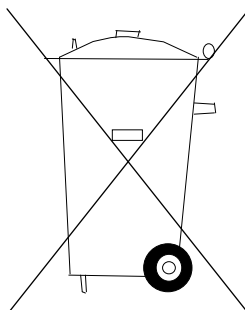


Figura 28. Símbolo propuesto para el etiquetado especial de pilas consideradas en la Directiva 91/157/EEC

Actualmente, ya se elaboró la Directiva 2006/66/EC que abroga la Directiva 91/157/EEC y entrará en vigor en los países miembros de la CE, el 26 de septiembre del 2008. Este documento responsabiliza a los productores, de la recolección y reciclado de todas las pilas y acumuladores gastados sin importar su composición química, a diferencia de las Directivas 91/157/EEC y 98/101/EEC, que sólo contemplaban a las pilas que contienen mercurio, plomo y cadmio. En términos generales, los objetivos de esta nueva regulación son:

- Minimizar el impacto de las pilas y baterías en el ambiente,
- Armonizar las diferentes legislaciones de los Estados Miembros (en unos se exigía reciclar todo tipo de pilas y en otros solamente las peligrosas Hg, Pb y NiCd)
- Reducir gastos del reciclado al aumentar la economía de escala y facilitar su recolecta evitando tener que distinguir entre un tipo y otro de pilas.

Los puntos clave de este documento son los siguientes:

- Prohíbe la comercialización de pilas y acumuladores que contienen más de 0,0005% de Hg en peso, ya sea que sean o no parte de equipos; y las pilas o acumuladores portátiles incluyendo las que son parte de equipos, que contienen más de 0,002% de Cd en peso, con excepción de los dispositivos de emergencia y de alarma (considerando la iluminación de emergencia), equipos médicos o herramientas eléctricas portátiles (Artículo 4).
- Es obligatorio que los productores de pilas y acumuladores en los países miembros se registren y se responsabilicen del financiamiento de campañas de información al público, así como de la recolección, tratamiento y reciclado de de todas las pilas y acumuladores gastados. Se exenta a los pequeños productores de la obligación de financiar las campañas de información al público.
- Es obligatorio que las pilas y baterías se etiqueten siguiendo las instrucciones del Anexo II de esta Directiva y que fueron definidas en la Directiva 93/86/EEC
- Se prohíbe la disposición de las pilas usadas en rellenos sanitarios o basureros, así como su incineración.
- Las metas mínimas establecidas a lograr para la recolección de pilas y baterías que se envían a reciclado es del 25 % para el 2012 y del 45 % para el año 2016.

2.5.2 Estados Unidos de América

Desde 1989 se empezaron a decretar normas para la recolección y reciclado de pilas gastadas, especialmente en 13 estados que fueron los

que asumieron el liderazgo en este tema. Sin embargo, hay claras diferencias entre ellos, principalmente en relación a: 1) requerimientos de etiquetado, 2) tipo de símbolo utilizado para indicar que las pilas son reciclables; y 3) forma y lugar en que se debe poner los datos del productor, especialmente su nombre y dirección.

Para evitar tantas diferencias en las legislaciones de los estados, el 13 de mayo de 1996 el Congreso de EEUA estableció la Ley denominada The Mercury-Containing and Rechargeable Battery Management Act (Acta de Manejo de Pilas Recargables y de las que Contienen Mercurio) mejor conocida como la Battery Act; que tiene como objetivo principal:

- Uniformizar el etiquetado de las pilas y baterías gastadas de níquel-cadmio, de plomo ácido selladas y otras reguladas a nivel nacional, para promover y facilitar la recolección, reciclado o disposición adecuada de las mismas.
- Eliminar las pilas alcalinas, de zinc-carbón a las que se les haya adicionado intencionalmente mercurio así como las pilas de óxido de mercurio incluyendo las de botón, a menos que el productor ó importador cumpla con un esquema riguroso para su manejo adecuado.
- Educar al público acerca de los métodos adecuados para la recolección, reciclado y la correcta disposición de las pilas bajo control.

Estos objetivos básicamente están contemplados en dos apartados: el Título I que se denomina "Ley de Reciclado para Pilas Recargables" y el Título II que es la "Ley de Manejo de Pilas que Contienen Mercurio". A continuación se enumeran los puntos principales de estos títulos son los siguientes:

- Título 1. Para facilitar que la disposición y el reciclado de las pilas de níquel-cadmio y de plomo-ácido sean eficientes, se establece que estas pilas reguladas deben llevar un etiquetado especial, en el cual se advierte al consumidor acerca de su contenido y de su tratamiento adecuado. El símbolo ocupado será similar al mostrado en la Figura 29 y en la cual en su parte inferior se escribirá el símbolo del elemento o elementos tóxicos que componen a la pila, así como la siguiente leyenda "esta pila debe ser reciclada o ser desechada de manera adecuada" (sección 103).



Figura 29. Símbolo que exige la Battery Act para el etiquetado de las pilas de NiCd y plomo-ácidas

- Título 2. Prohíbe el comercio de pilas alcalinas y de zinc-carbón que contenga mercurio adicionado intencionalmente así como la venta de pilas de botón con más de 25 mg de este elemento por unidad (Sección 203 y 204), de pilas de botón de óxido de mercurio (Sección 205), y en el caso de las pilas de óxido de mercurio en otras presentaciones cuyos productores o importadores no hayan identificado sitios para su adecuada recolección, reciclado o disposición controlada y provean de un número telefónico que informe sobre estos servicios a los usuarios (Sección 206)

A nivel estatal se han establecido leyes que complementan estas obligaciones, inclusive en algunos sitios, en que ya no hay terrenos para

aumentar el número de rellenos sanitarios, se obliga al reciclado de las pilas y así se busca reducir el volumen de productos que se requieren disponer. En el Cuadro 13 se muestran algunos ejemplos:

Cuadro 13. Legislaciones referentes a las pilas en algunos estados de Estados Unidos.

Estado	Pilas que contienen mercurio	NiCd	Otros
California	Prohibido desecharlo con los demás residuos domésticos	Prohibido desecharlo con los demás residuos domésticos	Todas las pilas (primarias y secundarias) se consideran residuos peligrosos; después del 8 de febrero del 2006 deben reciclar
Connecticut	Recolección de las pilas de botón		
Florida	Prohibida su disposición. Programa de recolección de pilas de óxido de mercurio	Prohibida su disposición. Se han aprobado programas de recolección.	Prohibida la disposición de pilas recargables. Los consumidores deben estar informados acerca de la opción de reciclado y las pilas deben estar debidamente etiquetadas
Iowa		Prohibida su disposición y obligatoria su recolección	Prohibida la disposición de pilas selladas de plomo-ácido (SSLA), recolección obligatoria
Maine	Prohibida la venta de pilas botón de óxido de mercurio	Prohibida su disposición y obligatoria su recolección	
Maryland		Prohibida la disposición. La industria debe establecer planes de reciclado	
Minnesota	Prohibida la disposición de pilas de óxido de plata	Prohibido desecharlo con los demás residuos domésticos	Es responsabilidad de los fabricantes de la recolección de pilas
New Hampshire		Prohibido desecharlo con los demás residuos domésticos	Se requieren incineradores especiales para desechos que contengan mercurio
New Jersey		Prohibido desecharlo con los demás residuos domésticos	Establecimiento de planes de recolección de pilas
New York	Prohibido incinerar productos que contienen mercurio		
Rhode Island		Prohibido desecharlo con los demás residuos domésticos	
Vermont	Requerimiento de recolección y reciclaje de pilas que contienen mercurio.	Prohibido desecharlo con los demás residuos domésticos	

Fuente: EPA, 2005 en RIS internacional Ltd. (2007)

2.5.3 Japón

En abril del 2001 se estableció la Ley para Promover el Uso Eficiente de Recursos, que exige a los productores e importadores de pilas recargables y equipos que las usan, responsabilizarse de los costos de recolección y reciclado. Además están obligados a proveer toda la información sobre el manejo adecuado de las pilas a los usuarios y compradores, y de promover la participación de la población en su adecuado manejo. Los consumidores pueden llevar las pilas gastadas y que están descargadas a los centros comerciales donde compraron estos aditamentos y actualmente se estima que existen 30,000 sitios de recolección en Japón.

Las metas de reciclado establecidas para el 2003 por las autoridades ambientales de Japón fueron:

- Reciclar el 60 % de las pilas de níquel-cadmio
- Reciclar el 55 % de las pilas de níquel-hidruro metálico
- Reciclar el 30 % de las pilas de ión-litio
- Reciclar el 50 % de las baterías de plomo-ácido selladas.

Además esta ley obliga a los fabricantes a etiquetar pilas recargables; de acuerdo al sistema desarrollado por la *Battery Association of Japan* (Asociación de Fabricantes de Pilas de Japón) que establece códigos de colores y el símbolo de las tres flechas encontradas que es similar al utilizado en EEUU (Figura 30)



Figura 30. Etiquetado de pilas utilizado en Japón que fue desarrollado por la Battery Association (Fuente: www.baj.or.jp)

2.5.4 Otros países

Sin considerar a la Unión Europea, EEUA y Japón, muy pocos países han llevado a cabo acciones para manejar en forma especial a las pilas. Básicamente se han limitado a clasificar como peligrosas a las pilas que contienen mercurio, a las de níquel-cadmio y las de plomo-ácido como peligrosas, regulando su contenido químico y, en algunos casos, prohibiendo la comercialización de estos dispositivos. En el Cuadro 14 se muestran algunos países que han elaborado leyes específicas en el manejo de pilas usadas.

Cuadro 14. Países que han elaborado leyes sobre el manejo de pilas.

País	Legislación para pilas	Puntos principales
Brasil	Resolución CONAMA 257, 30 de junio de 1999	<ul style="list-style-type: none"> Contenido de mercurio en pilas alcalinas y de zinc-carbón no mayor al 0.01 % en peso, 0.015 % en peso de cadmio y hasta 0.2 % de plomo en peso Etiquetado que señale el riesgo a la salud y al ambiente por su contenido
Taiwán	Administración Taiwanesa de Protección Ambiental, septiembre, 2006	<ul style="list-style-type: none"> Prohíbe la manufactura, importación y venta de pilas alcalinas que no sean de botón y que la concentración de mercurio exceda las 5 ppm

Cuadro 14 (cont.). Países que han elaborado leyes sobre el manejo de pilas.

Canadá	<ul style="list-style-type: none">• Como consecuencia de la Battery Act (EEUU) se ha descontinuado la manufactura de pilas de óxido de mercurio en ese país desde 1996 y se ha suprimido el uso de mercurio en otros dispositivos• Etiquetado obligatorio de pilas en 13 estados• Establecimiento de programas de recolección y reciclado de pilas de NiCd y otras secundarias en 9 estados
---------------	---

Fuente: EPA, 2005 en RIS internacional Ltd. (2007) y www.cristinacortinas.com

2.6. Legislación de México

En México se clasifican las pilas gastadas de NiCd, óxido de mercurio, Pb-ácidas y óxido de plata como peligrosas de acuerdo a la NOM-052-SEMARNAT-2005, y los generadores de residuos deben contar con un plan de manejo como establece la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, publicada el 8 de octubre de 2003 y modificada el 22 de mayo de 2006.

Esta ley señala en el Capítulo III, Artículo 31, Fracciones IV y V de Planes de Manejo que “estarán sujetos a un plan de manejo los siguientes residuos peligrosos y los productos usados, caducos, retirados del comercio o que se desechen y que estén clasificados como tales en la norma oficial correspondiente: [...] “Acumuladores de vehículos automotores conteniendo plomo”, “Baterías eléctricas a base de mercurio o de níquel-cadmio”. En el Capítulo IV. Artículo 67. Fracción IX, menciona que “se prohíbe la incineración de residuos peligrosos que sean o que contengan compuestos orgánicos persistentes y bioacumulables, plaguicidas organoclorados, así como baterías y acumuladores usados que contengan metales tóxicos, siempre y cuando

exista en el país alguna otra tecnología disponible que cause menor impacto y riesgo ambiental”.

Además, en el Artículo 28, fracción I, menciona que “estarán obligados a la formulación y ejecución de los planes de manejo, según corresponda: (I) Los productores, importadores, exportadores y distribuidores de los productos que al desecharse se convierten en los residuos peligrosos a los que hacen referencia las fracciones I a XI del artículo 31 de esta Ley y los que se incluyan en las normas oficiales mexicanas correspondientes”

En la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005 se cubren algunos tipos de pilas. En el Listado 5, titulado “Clasificación por Tipo de Residuos, Sujetos a Condiciones Particulares de Manejo” se listan las celdas de desecho en la producción de baterías níquel-cadmio, pilas o baterías de zinc-óxido de plata usadas o desechadas, lodos de tratamiento de aguas residuales en la producción de baterías de plomo-ácido, lodos de tratamiento de aguas residuales en la producción de baterías de níquel-cadmio, pasta de desecho en la producción de pilas secas (celdas primarias, alcalinas y ácidas), y residuos de los hornos de la producción de baterías de mercurio. En el Apartado 7 denominado “Características que definen a un residuo como peligroso”, numeral 7.1 se menciona: “el residuo es peligroso si presenta al menos una de las siguientes características [...]: corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad ambiental, inflamabilidad y biológico-infecciosa. En el caso del numeral 7.5 se define que: “es Tóxico Ambiental cuando” (7.5.1) el extracto PECT, obtenido mediante el procedimiento establecido en la NOM-053-SEMARNAT-1993, contiene cualquiera de los constituyentes tóxicos listados en la Tabla 2 de esta Norma en una concentración mayor a los límites ahí señalados, la cual deberá obtenerse según los

procedimientos que se establecen en las Normas Mexicanas correspondientes”

Esta norma lista los elementos cadmio, mercurio, plata y plomo como elementos tóxicos, por lo que las pilas que los contienen pueden ser peligrosas cuando liberan en el extracto PECT cantidades superiores a las máximas permisibles (Cuadro 15).

Cuadro 15. Límites máximos permisibles para los constituyentes tóxicos en el extracto PECT

No. CAS	Contaminante	LMP (mg/L)
CONSTITUYENTES INORGANICOS (METALES)		
7440-38-2	Arsénico	5.0
7440-39-3	Bario	100.0
7440-43-9	Cadmio	1.0
7440-47-3	Cromo	5.0
7439-97-6	Mercurio	0.2
7440-22-4	Plata	5.0
7439-92-1	Plomo	5.0
7782-49-2	Selenio	1.0

Fuente: SEMARNAT, 2000

De la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, se han derivado leyes a nivel estatal; en resumen, sólo establecen los planes de manejo a seguir con los residuos sólidos municipales y de manejo especial y no se mencionan a las pilas y baterías en especial. Algunos de estos ejemplos son la Ley de Prevención y Gestión Integral de Residuos del Estado de Querétaro, Ley de Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial para el Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave, Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal¹¹, etc.

¹¹ Ésta ley propone la recolección separada de los residuos sólidos municipales, considerados como no peligrosos y no menciona nada acerca del manejo de pilas gastadas.

3. ASPECTOS AMBIENTALES

3.1. Ciclos de vida de los metales

El aumento en forma continua de la concentración de metales en la superficie de la Tierra, especialmente de los denominados “metales pesados”, constituye actualmente una preocupación para los países, industrializados.

Las fuentes de los metales que se acumulan en la superficie terrestre son de tipo:

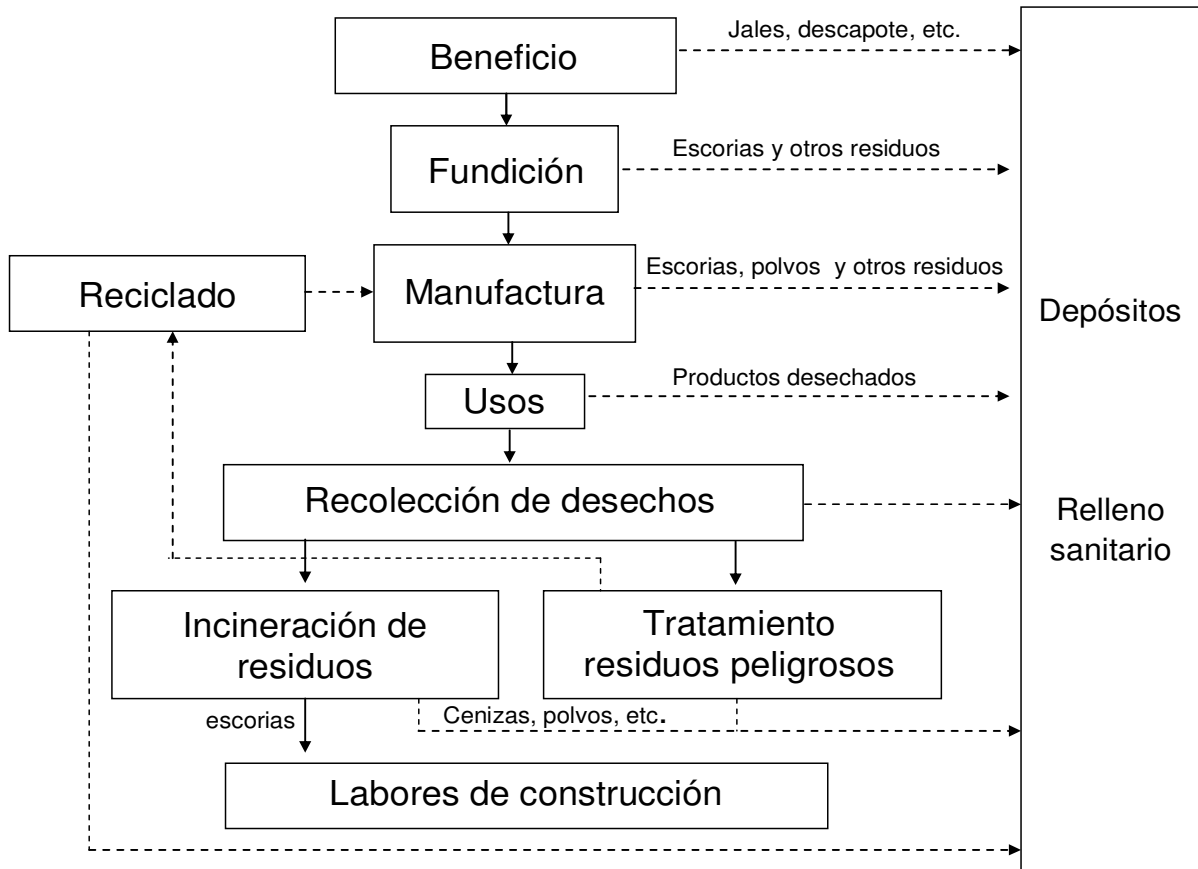
- Natural: emisiones volcánicas, meteorización e incendios (Callender, E., 2003).
- Antropogénico: extracción de energéticos y extracción de minerales

La dispersión en el ambiente de los metales generados por fuentes antropogénicas no solamente ocurre durante los procesos de extracción de los minerales o energéticos sino también en durante la refinación, producción, distribución, uso de los productos, así como durante el manejo de los desechos.

Las pilas en la etapa de post-consumo, cuando se envían a disponer o incinerar, pueden liberar metales que conforman una fuente de impacto al ambiente y constituyen un factor de aumento de la concentración general de estos elementos en la corteza terrestre.

En la Figura 31 se muestra el ciclo de vida de los metales y en la Figura 32 el de las pilas, señalando en ambos casos el destino final de

los desechos, cuyo destino es determinante para evaluar el impacto de los metales en general y de las pilas sobre el ambiente, así como el nivel de riesgo que representan para la biota y población humana.



Fuente: European Comisión DGENV.E3. Heavy Metals in Waste (2002)

Figura 31. Ciclo de vida de los metales

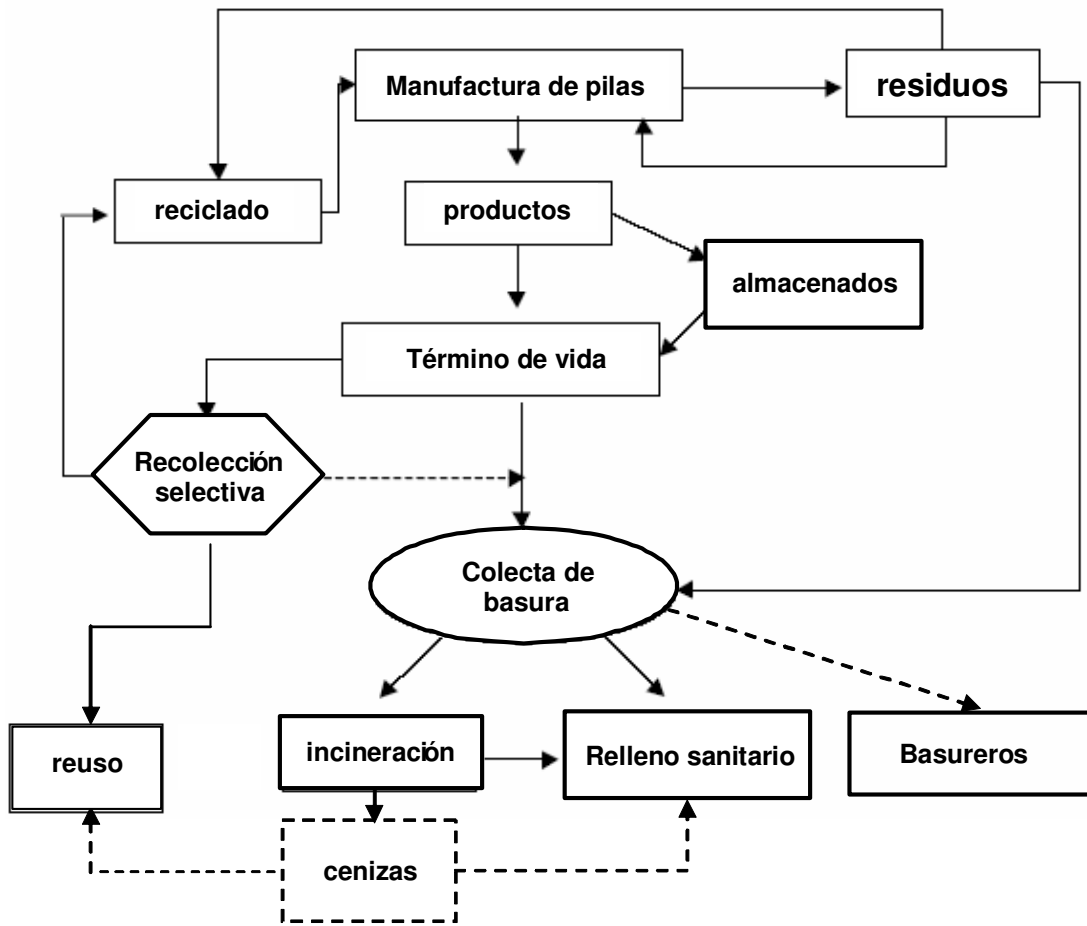


Figura 32. Ciclo de vida de las pilas

3.2. Factores generales de impacto y riesgo de las pilas

En forma general el riesgo potencial de las pilas para el ambiente y la salud se relaciona con una o más de las siguientes causas:

1. Durante su uso o almacenamiento por los usuarios las pilas de mala calidad pueden explotar o en el caso de las pilas de botón, ser ingeridas accidentalmente por niños.

2. Son, como ya se comentó, un factor de acumulación a largo plazo de metales en la corteza terrestre
3. Cuando los basureros presentan condiciones de vulnerabilidad, las pilas al igual que muchos otros componentes de la basura pueden liberar metales a los lixiviados, los cuales pueden afectar a cuerpos de agua vulnerables.
4. En los incineradores de basura, los metales se concentran en las cenizas o se emiten a la atmósfera.
5. En los procesos de reciclado, se generan emisiones que pueden, dependiendo del control de proceso y la calidad de los equipos, afectar al ambiente.

Sin embargo, la magnitud del impacto de los metales de las pilas depende de diversos factores, como son:

1. El aporte relativo de metales de las pilas respecto a la de otras fuentes de estos elementos para el ambiente, como son la industria, el tráfico vehicular, los procesos oxidantes de destrucción térmica, el tratamiento de aguas, etc.
2. Los patrones de consumo del sitio, región o país, que afectan el volumen de pilas desechadas, la composición (presencia o ausencia de elementos tóxicos), el tamaño del dispositivo (cantidad), la vida útil (durabilidad) y el tipo de empaque (hermeticidad).
3. La velocidad en la aparición de nuevas tecnologías. En la última década los metales más tóxicos están siendo sustituidos por otros más amables para el ambiente y biota; e inclusive hay ya nuevos aditamentos desarrollados en base a materiales orgánicos.

4. El periodo de vida útil de las pilas secundarias y primarias (www.ecolabel.dk), el cual depende de la tecnología y calidad de las pilas, pero también de los patrones de uso de los consumidores.
5. El porcentaje de pilas almacenadas por distribuidores y consumidores, y el tipo y estado de conservación de las mismas.
6. La vulnerabilidad del medio geográfico en el sitio de manejo de las pilas, y las características físico químicas del ambiente, especialmente del suelo, que están relacionadas con el destino final de los metales, el cual a su vez determina la geodisponibilidad (fracción móvil del metal en el ambiente) y, en cierta medida, la biodisponibilidad (fracción del metal absorbida por los seres vivos y que interacciona con su metabolismo).
7. La respuesta individual de los diferentes organismos afectados al agente tóxico, pues todos, inclusive los que habitan en zonas aisladas de toda actividad industrial, contienen metales potencialmente tóxicos como consecuencia del contacto con el ambiente (aire, agua, suelo, minerales, etc.), aunque en concentraciones bajas menores a las dosis tóxicas. En el Cuadro 16 se muestran los elementos químicos que se han identificado en el cuerpo humano, que incluyen a elementos esenciales, benéficos y tóxicos que están presentes en las pilas (letra cursiva).

Cuadro 16. Elementos químicos en el cuerpo humano y cuales de ellos están presentes en las pilas

Elemento	Masa del elemento en una persona de 70 kg	Función en el cuerpo humano	Elemento usado en pilas	Cantidad relativa en pilas
oxígeno	43 kg	esencial	√	
carbón	16 kg	esencial	√	alto
hidrógeno	7 kg	esencial	√	medio
nitrógeno	1.8 kg	esencial	√	
calcio	1.0 kg	esencial		
fósforo	780 g	esencial		
potasio	140 g	esencial	√	medio
azufre	140 g	esencial	√	bajo
sodio	100 g	esencial	√	medio
cloro	95 g	esencial	√	medio
magnesio	19 g	esencial	√	medio
hierro	4.2 g	esencial	√	alto
flúor	2.6 g	esencial	√	bajo
zinc	2.3 g	esencial	√	alto
sílice	1.0 g	esencial		
estroncio	0.32 g	esencial		
cobre	72 mg	esencial	√	bajo
yodo	20 mg	esencial	√	bajo
boro	18 mg	esencial		
níquel	15 mg	esencial	√	alto
selenio	15 mg	esencial		
cromo	14 mg	esencial	√	
manganeso	12 mg	esencial	√	alto
molibdeno	5 mg	esencial		
cobalto	3 mg	esencial	√	
vanadio	0.11 mg	esencial	√	bajo

Fuente: Emsley, J. (1998)

Cuadro 16 (cont.). Elementos químicos en el cuerpo humano, señalando los que contienen las pilas

Elemento	Masa del elemento en una persona de 70 kg	Función en el cuerpo humano	Elemento usado en pilas	Cantidad relativa en pilas
arsénico	7 mg	se sugiere esencial ⁽¹⁾		
bario	22 mg	se sugiere esencial		
cesio	6 mg	se sugiere esencial		
estaño	20 mg	se sugiere esencial		
<i>litio</i>	7 mg	se sugiere esencial	√	bajo
rubidio	0.68 g	se sugiere esencial		
<i>aluminio</i>	60 mg	sin función reportada	√	bajo
antimonio	2 mg	sin función reportada		
berilio	36 µg	sin función reportada		
bismuto	0.5 mg	sin función reportada		
bromo	0.26 g	sin función reportada		
<i>cadmio</i>	50 mg	sin función reportada	√	alto
<i>cerio</i>	40 mg	sin función reportada	√	v estigios
<i>cerio</i>	NR	sin función reportada	√	v estigios
escandio	0.2 mg	sin función reportada		
galio	0.7 mg	sin función reportada		
germanio	5 mg	sin función reportada		
indio	0.4 mg	sin función reportada		
itrio	0.6 mg	sin función reportada		
<i>lantano</i>	0.8 mg	sin función reportada	√	vestigios
<i>mercurio</i>	6 mg	sin función reportada	√	bajo ⁽²⁾
niobio	1.5 mg	sin función reportada		
<i>niodimio</i>	NR	sin función reportada	√	v estigios
oro	0.2 mg	sin función reportada		

Notas: (1) A pesar de su reconocida toxicidad (se le conoce como el rey de los venenos), estudios en animales han mostrado que el arsénico es esencial para el crecimiento, desarrollo y reproducción (Mineral Information Institute, CO USA mii@.org); y (2) El mercurio en las pilas está limitado a su presencia como impureza de otros elementos, con excepción de las pilas de botón y las pilas de "imitación" a las que se les adiciona mercurio y son vendidas preferentemente en países en vías de desarrollo económico.

Fuente: Emsley, J. (1998)

Cuadro 16 (cont.). Elementos químicos en el cuerpo humano, señalando los que contienen las pilas

Elemento	Masa del elemento en una persona de 70 kg	Función en el cuerpo humano	Elemento usado en pilas	Cantidad relativa de pilas
<i>plata</i>	2 mg	sin función reportada	√	bajo
<i>plomo</i>	0.12 g	sin función reportada	√	alto en baterías automotrices
<i>prasodimio</i>	NR	sin función reportada	√	vestigios
samario	50 µg	sin función reportada		
talio	0.5 mg	sin función reportada		
tantalio	0.2 mg	sin función reportada		
telurio	0.7 mg	sin función reportada		
<i>titanio</i>	20 mg	sin función reportada	√	vestigios
torio	0.1 mg	sin función reportada		
tungsteno	20 µg	sin función reportada		
uranio	0.1 mg	sin función reportada		
<i>zirconio</i>	1 mg	sin función reportada	√	vestigios

Fuente: Emsley, J. (1998)

3.3. Percepción de riesgo

Como los cambios en las tecnologías y en consecuencia en la composición de las pilas han ocurrido tan rápidamente (ver Capítulo 1), y el comportamiento de los metales en el ambiente es un tema muy especializado, la mayor parte de la población sigue todavía identificando a todos los tipos de pilas como peligrosas y considera que sin lugar a dudas son un factor de riesgo para su salud.

La información “pseudocientífica” o incompleta que se difunde a través de los medios de comunicación es el principal factor que alimenta la percepción del riesgo de las pilas a la salud. En los artículos no se dan citas, datos, referencias de trabajos científicos internos de universidades o centros de investigación, etc., pero si afirman que las pilas son un riesgo para la salud y dan ejemplos simples muy convincentes. Por ejemplo, en la Internet se informa que una pila de un teléfono celular es capaz de contaminar 675,000 L de agua, o que una sola pila de mercurio puede contaminar 600,000 L de agua; o una alcalina, 167,000 L de agua; o una de óxido de plata, 14,000 L; o una de zinc-aire, 12,000 L y una de carbón-zinc, 3,000 L. Una frase textual de la página dice: “Para contaminar los 6.5 millones de litros de agua que contiene la alberca universitaria de la UNAM (alberca, fosa de clavados y zona de polo acuático), se necesitarían sólo 11 pilas de botón de óxido de mercurio, o 40 de tipo alcalinas (www.greenpeace.org/mexico). Este planteamiento conforma un sofisma basado en una serie de supuestos falsos: a) las pilas se disuelven totalmente en el cuerpo de agua donde son arrojadas, b) no ocurren ningún tipo de reacción en los cuerpos de agua naturales entre partículas sólidas y iones solubles, c) los cuerpos de agua son utilizados directamente como fuentes de agua potable, y d) aplican concentraciones máximos permisibles de los metales establecidas para agua potable.

Aplicando los mismos supuestos a otros materiales naturales diferentes al de las pilas, como por ejemplo suelo fértil no afectado, se obtienen también escenarios catastróficos, pues bastan 500 g de suelo natural para contaminar con aluminio 3,600 L de agua. En este caso no sucede pues los minerales no se disuelven.

Las pilas son herméticas y en la basura permanecen largos periodos sin intemperizarse, pero inclusive si todos los metales se disolvieran, la mayor parte se inmovilizarían por mecanismos de atenuación natural, como son los procesos de coordinación, sorción y precipitación, ya sea que ocurran en el mismo depósito de basura (especialmente presentes en el lixiviado), o durante su paso por el suelo, subsuelo e inclusive en los sedimentos de los cuerpos de agua.

Además, los cuerpos de agua superficiales y acuíferos someros, en su mayor parte, no son utilizados directamente como fuente de abasto de las poblaciones pues contienen sedimentos, y residuos humanos, animales y vegetales, por lo que pueden llegar a tener bacterias y virus. El agua se sujeta a tratamiento y los metales son separados generalmente por procesos fisicoquímicos como la sorción en sulfato de hierro (antes de aluminio), aunque hay otras vías físicas, químicas y biológicas.

Otros factores que ayudan a la percepción de que las pilas son peligrosas son:

- a) su aspecto de aditamento industrial y el hecho de que pueden generar electricidad, que es reconocida como peligrosa.
- b) los accidentes comunes que ocurrían con pilas ya en desuso, como el que "chorreaban" ácido y oxidaban los equipos e inclusive quemaba las manos.

3.4. Evaluación del riesgo asociado al manejo de pilas gastadas

3.4.1 Documentación disponible

A pesar de la importancia de evaluar científicamente el nivel de riesgo que representan las pilas gastadas para el ambiente y población, el número de los estudios serios sobre el tema, es muy reducido. Básicamente los trabajos han sido realizados en países con economías desarrolladas, como son la Unión Europea, Estados Unidos, Japón y Canadá.

Sin embargo, el valor de estos estudios es alto, pues dado que los patrones de consumo de equipos eléctricos y electrónicos que requieren de fuentes de electricidad autónoma, como son las pilas portátiles, son similares en casi todo el mundo, los resultados de los estudios realizados en un país se pueden extrapolar a otro y además conforman una base de comparación muy importante.

Las diferencias más importantes a considerar entre los países que elaboran los estudios y los que tienen economías en desarrollo, es la magnitud del consumo y el precio de los dispositivos. Por lo que se debe tomar en cuenta el consumo de pilas de bajo precio (legales e ilegales) que se venden en mercados informales.

3.4.2 Factores de peligro

El riesgo se define como la probabilidad o posibilidad (cuando no es posible realizar mediciones estadísticas) de que suceda un daño, y para que ocurra se requiere de la presencia de un agente capaz de dañar y

de un objeto que puede ser dañado. Esto es, el riesgo ambiental es una función de la peligrosidad y de la vulnerabilidad del entorno:

$$R = f(P, V)$$

De acuerdo a Gutiérrez *et al.* (2000), los factores peligrosidad de un agente capaz de dañar (Figura 33) aplicado a las pilas gastadas, son:

a) Naturaleza química del contaminante. Se encuentran involucrados en este factor la toxicidad y reactividad de la especie problema. La reactividad en el caso de las pilas se reduce a las de litio que pueden explotar bajo condiciones extremas y a las denominadas de imitación, que no siempre cumplen con los estándares de calidad.

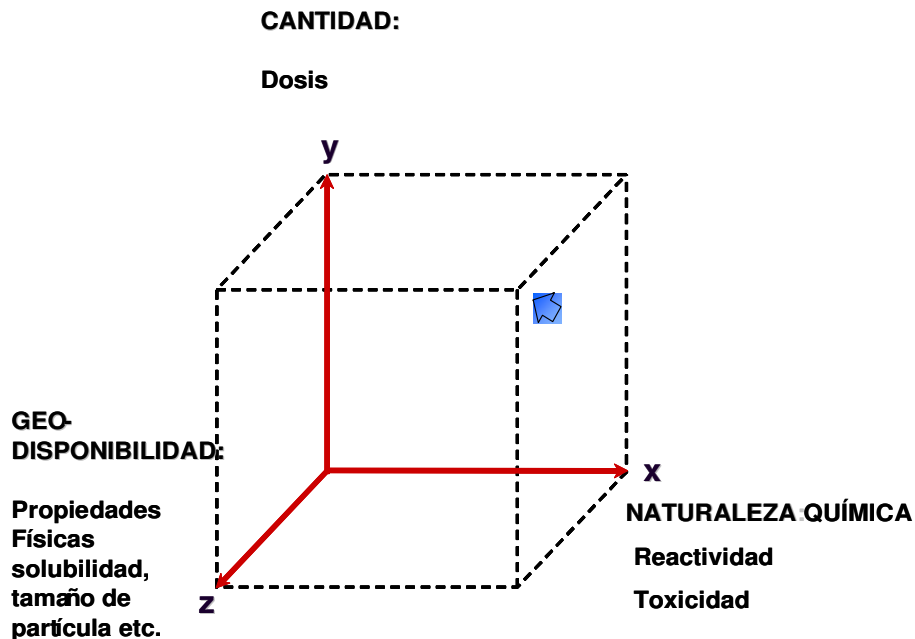


Figura 33. Factores de peligrosidad (Gutiérrez, 2000)

b) Cantidad. La dosis es un factor determinante para que una sustancia tóxica o reactiva pueda alterar un sistema natural por encima de su capacidad de amortiguamiento, y que en este caso se calcula con base

en los volúmenes que se manejan de las pilas gastadas y su composición, y su aporte relativo respecto a otras fuentes. Todos los metales de las pilas son potencialmente tóxicos, pero únicamente las que contienen Cd, Ag y Hg se clasifican como tales, pues son los elementos que en menores concentraciones son los más tóxicos.

c) Geodisponibilidad. Se refiere a las propiedades físicas de la sustancia tóxica (estado físico, solubilidad, tamaño de partícula, etc.), que permiten que se transporte a través de suelos, subsuelo, sedimentos, agua o aire, y pueda entrar en contacto con organismos acuáticos o terrestres⁴. En general las sustancias que presentan mayor geodisponibilidad son las más solubles, por lo que dentro de los organismos también pueden ser las más biodisponibles (Davis *et al.*, 1996). Este último término se refiere a la posibilidad de que una sustancia tóxica sea absorbida y pueda interaccionar con el metabolismo, ya sea favoreciendo las reacciones vitales o impidiéndolas. Entre más biodisponible es un contaminante más baja es la dosis tóxica.

Las pilas contienen compuestos sólidos que son menos geodisponibles que los gaseosos o líquidos, pero en general son óxidos poco solubles. El tiempo necesario para que se disuelvan es muy largo pues, como ya se comentó, el empaque es hermético y, por lo tanto, están prácticamente encapsuladas y su comportamiento es análogo a sustancias de muy baja solubilidad.

3.4.3 Factores de riesgo

Para que una sustancia peligrosa por su toxicidad, como los metales de las pilas, represente un riesgo, se requiere de una ruta de

⁴ <http://www.ine.gob.mx/dgmrar/rip/definicion.html>

transporte y de una vía de ingreso (ingestión, inhalación, absorción). Estas condiciones únicamente se dan en ambientes vulnerables en el que ocurra erosión eólica y/o hídrica y deben tener suelos y subsuelos porosos con presencia de cuerpos de agua, así como poblaciones vegetales, animales y humanas que a través del aire, agua o alimentos queden expuestos directa o indirectamente a los contaminantes. Un medio geográfico que cumple con estas condiciones se considera vulnerable.

En el caso de las pilas los aspectos más importantes a considerar para evaluar el riesgo son:

- Características geográficas del sitio donde se disponen las pilas (clima, permeabilidad del suelo-subsuelo, presencia de cuerpos de agua, tipo y abundancia de la flora o fauna, población humana expuesta, etc.).
- Sistema de manejo de las pilas gastadas (incineración, reciclado, disposición en rellenos sanitarios o a cielo abierto, etc.), evaluando su calidad y operación, para identificar las emisiones al ambiente.
- Aspectos biogeoquímicos y ecotoxicológicos de los componentes de las pilas.

En los casos de los metales utilizados en las décadas pasadas, como mercurio, cadmio y plomo, hay información suficiente sobre su comportamiento químico en el ambiente y datos ecotoxicológicos, inclusive se han realizado diversos estudios de riesgo a la salud. Sin embargo, para el caso de las nuevas pilas que contienen otros tipos de elementos, hay muy poca información, y resulta casi imposible

generarla a corto plazo, por lo que sus efectos en el medio abiótico no pueden ser fácilmente evaluados (Rydh, C. J., 2003).

Además, las tecnologías están cambiando tan rápidamente, que cuando ya se conocen algunos datos toxicológicos de alguno de los metales usados recientemente, ya se está comercializando otras tecnologías que utilizan otros elementos químicos. En algunos casos se ha relacionado los cambios de tecnología de las pilas con aspectos de conservación ambiental, pero en realidad no son los únicos que influyen, sino también intervienen diversos factores económicos como los precios o disponibilidad de las materias primas¹², o la necesidad de cumplir con los requerimientos de los nuevos productos electrónicos, que también evolucionan en forma muy rápida. En la Figura 34 se presentan las actividades que generan emisiones al ambiente de metales, las rutas de dispersión y, los compartimientos naturales que están en contacto con estos elementos.

¹² La sustitución del cadmio se debió en parte a que es un elemento clasificado como peligroso, pero también a que es un subproducto de la metalurgia del zinc y la demanda supera a la oferta.

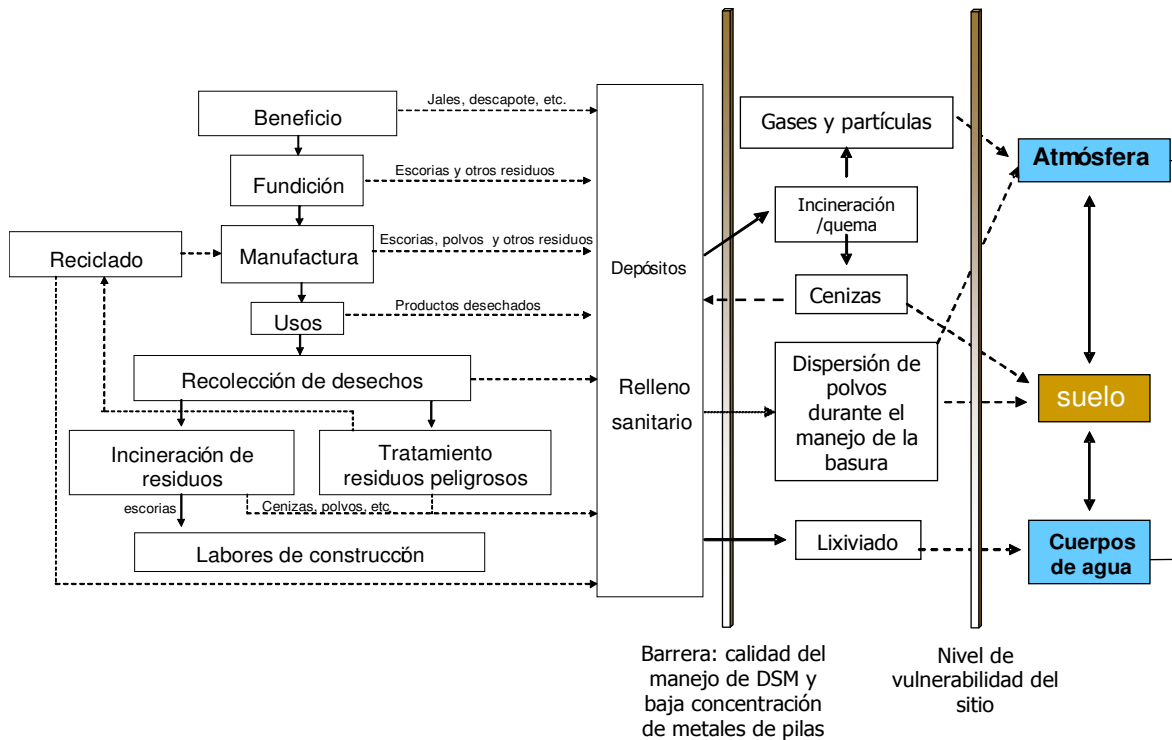


Figura 34. Fuente de contaminación y rutas de transporte de los metales, señalando los receptores y las barreras a su transporte

El riesgo aumenta cuando el contaminante se mueve del suelo, al agua y al aire y viceversa cuando se deposita del agua o aire en el suelo, el riesgo disminuye. En la Figura 35 se explican estos conceptos gráficamente.

El suelo constituye un filtro muy eficiente y el sumidero natural de EPT, ya sean metales, semimetales o no metales. Éstos, como ya se comentó, son retenidos rápidamente por procesos de sorción por las arcillas oxi-hidróxidos o materia orgánica, y con el tiempo forman especies prácticamente insolubles (termodinámicamente estables). Solamente la fracción soluble y bajo condiciones de sobresaturación, los EPT pueden transportarse a través del suelo y subsuelo.

No se puede comparar el impacto de metales dispersados en una zona húmeda con suelos saturados una gran parte del año, abundantes cuerpos de agua y suelos ácidos, con el de una zona desértica con suelos calcáreos, donde no hay cuerpos de agua vulnerables o población; y todavía es menos posible considerar el mismo nivel de riesgo para las pilas alcalinas herméticas depositadas en un relleno sanitario con control de lixiviados; con el de un cargamento de baterías vehiculares (plomo-ácidas) arrojadas en una barranca en un sitio lluvioso.

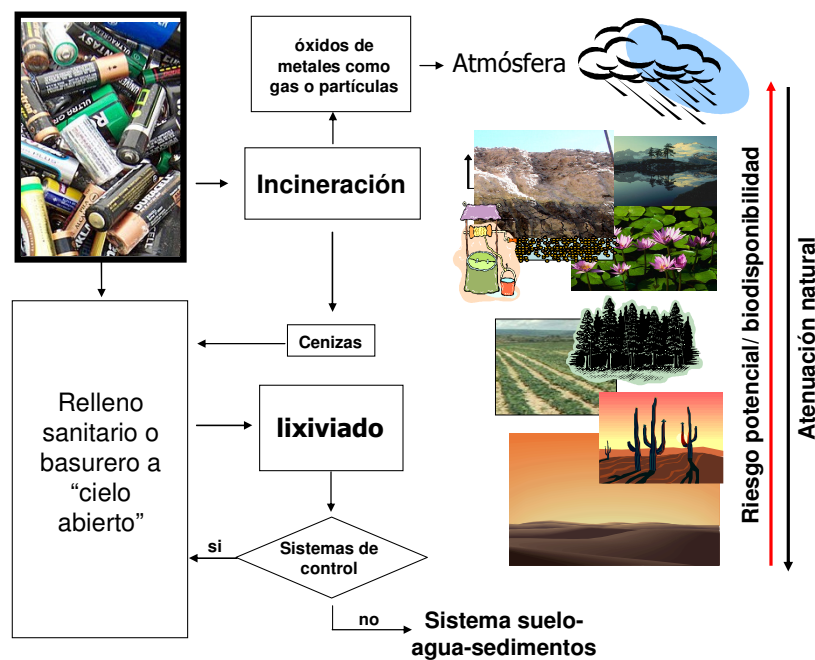


Figura 35. Fuentes de emisiones de pilas durante su manejo y tendencias en el riesgo potencial

3.5. Análisis de la información documental

3.5.1 Manejo de las pilas dentro de la corriente de desechos sólidos municipales.

a) Incineración de basura

La incineración de basura surgió como necesidad de ahorrar espacio en los tiraderos y rellenos sanitarios, y por tanto, el principal beneficio de la incineración es la reducción gradual del peso (arriba del 75%) y del volumen (arriba del 90%) de los desechos sólidos (www.unep.or.jp)

Este plan de manejo es económicamente efectivo en regiones donde las zonas disponibles para tiraderos y rellenos sanitarios son escasas. Esta falta de espacio se puede deber a las características geográficas de la región, por ejemplo, si se trata de una región muy urbanizada, una isla, o por condiciones ambientales, como por ejemplo, si el agua subterránea se encuentra muy cerca de la superficie. Estas condiciones además de las restricciones legales pueden volver más atractiva la opción de la incineración. Los países de la Unión Europea, Estados Unidos, Corea del Sur y Japón, por mencionar algunos ejemplos, han usado la incineración para el manejo de sus desechos sólidos (www.unep.or.jp) De acuerdo a Aucott (2006), en el estado de Nueva Jersey, EEUU, una tercera parte de la basura producida es incinerada, otro tercio es enviado a rellenos sanitarios dentro del estado, y el resto enviado a rellenos sanitarios fuera del estado. En el caso de la Unión Europea, Vangheluwe, *et al.* (2005) en el periodo 1995-2002, se produjo 157,241,000 toneladas de basura, de los cuales aproximadamente el 25 % de la basura es incinerada, y el resto es mandada a rellenos. En el Cuadro 17 se muestra el porcentaje de

basura incinerada y enviada rellenos en 15 países de la Unión Europea en el periodo 1995-2002.

Cuadro 17. Disposición e incineración de DSM (miles de toneladas) en el periodo 1995-2002

País	Año	% de DSM enviado a rellenos	% de DSM incinerado
Austria	1999/2000	68.1	31.9
Bélgica	1998	51.8	48.2
Dinamarca	2002	12.3	87.7
Finlandia	1997	95.3	4.7
Francia	1998	68.4	31.6
Alemania	2001	57.1	42.9
Grecia	1997	100	0
Irlanda	1995	100	0
Italia	1998	91.4	8.6
Luxemburgo	1998	33.5	66.5
Holanda	2002	16.5	83.5
Portugal	1999	71.1	28.9
España	1999	92.9	7.1
Suecia	1998	48.1	51.9
Reino Unido	1999	91.2	8.8
Promedio UE		75.4	24.6

Fuente: Vangheluwe, *et al.* (2005)

La mayor inquietud sobre el riesgo ambiental de los incineradores de basura son las emisiones potenciales de contaminantes al aire. La combustión de cualquier sustancia genera subproductos que pueden ser liberados al aire. Éstos pueden ser metales como mercurio, plomo y cadmio, orgánicos como dioxinas y furanos, gases ácidos como óxido de azufre y cloruro de hidrógeno, óxido nítrico, monóxido de carbono y partículas de polvo (www.unep.or.jp). En la década de 1980 en Suiza, se registraron altas cantidades de mercurio en los incineradores de basura municipal durante las mediciones de rutina por lo cual se le

responsabilizó a las pilas usadas¹³ como la principal fuente de mercurio en los gases liberados. Por ello, las autoridades decidieron recolectar a las pilas usadas de manera separada al resto de los desechos municipales, además de promover la reducción de metales como mercurio, cadmio y plomo en las pilas (Fahrni, 1995). Además del surgimiento de otros planes de manejo para las pilas, como el reciclado de sus componentes, se promovió la recolección separada de otros desechos para su reciclado. Se han disminuido las emisiones de metales pesados de los incineradores, sin embargo, la liberación de éstos no es nula. En el periodo 1995-2001 en la Unión Europea (Vangheluwe *et al.*, 2005), se incineró 38,700,000 toneladas de desechos sólidos municipales, de los cuales se estimó la liberación de los siguientes metales:

- 3.2 toneladas de Cd/año
- 15.2 toneladas de Pb/año
- 3.8 toneladas de Ni/año
- 49.5 toneladas de Zn/año

b) Disposición a rellenos sanitarios o tiraderos

Composición

Éste es el último depósito de los desechos municipales. La seguridad de este sistema depende de su planeación, administración y manejo. Existen desde los tiraderos abiertos sin ningún control ambiental hasta los rellenos sanitarios con estrictos controles. Estos sistemas de manejo

¹³ En ese entonces, las pilas alcalinas contenían más de 1% en peso de mercurio.

son los más utilizados a nivel mundial, predominando los tiraderos abiertos en países en vías de desarrollo.

De acuerdo a Vangheluwe *et al.* (2005), en la Unión Europea se generan anualmente 157,241 ktoneladas de desechos sólidos municipales, cuyo contenido de humedad es de 30 %. EUROSTAT (*ibidem*) resume la composición física en 8 diferentes fracciones, tal como se muestra en el Cuadro 18:

Cuadro 18. Composición de la basura en la Unión Europea.

Fracción	% en base húmeda
Papel	25
Metales	4
Vidrio	6
Plásticos	7
Textiles	3
Otros	25
No identificado	3
Material orgánico	27

Fuente: EUROSTAT, 2003 en Vangheluwe, 2005.

En el Cuadro 19 Sharma *et al.* (2006) muestran la composición de los desechos sólidos municipales a nivel mundial, dividido en regiones.

Cuadro 19. Datos de composición de desechos sólidos municipales en distintas regiones

Región	Desechos de comida	Papel/cartón	Madera	Textiles	Hule/cuero	Plásticos	Metales	Vidrio	Otros
Asia									
Oriente	26.2	18.8	3.5	3.5	1.0	14.3	2.7	3.1	7.4
Sur-centro	40.3	11.3	7.9	2.5	0.8	6.4	3.8	3.5	21.9
Sureste	43.5	12.9	9.9	2.7	0.9	7.2	3.3	4.0	16.3
Occidente y Medio Oriente	41.1	18.0	9.8	2.9	0.6	6.3	1.3	2.2	5.4
África									
Oriente	53.9	7.7	7.0	1.7	1.1	5.5	1.8	2.3	11.6
Centro	43.4	16.8	6.5	2.5		4.5	3.5	2.0	1.5
Norte	51.1	16.5	2	2.5		4.5	3.5	2	1.5
Sur	23	25	15						
Occidente	40.4	9.8	4.4	10		3.0	1.0		
Europa									
Oriente	30.1	21.8	7.5	4.7	1.4	6.2	3.6	10.0	14.6
Norte	23.8	30.6	10.0	2.0		13.0	7.0	8.0	
Sureste	36.9	17.0	10.6						
Occidente	24.2	27.5	11.0						
Oceanía									
Australia y Nueva Zelanda	36.0	30.0	24.0						
Los demás	67.5	6.0	2.5						
América									
Norte	33.9	23.2	6.2	3.9	1.4	8.5	4.6	6.5	9.8
Sur	43.8	13.7	13.5	2.6	1.8	6.7	2.6	3.7	12.3
Centro	44.9	17.1	4.7	2.6	0.7	10.8	2.9	3.3	13.0
Caribe	46.9	17.0	2.4	5.1	1.9	9.9	5.0	5.7	3.5

Fuente: Sharma *et al.*, 2006

Existen pocos estudios disponibles que evalúen la cantidad de pilas gastadas contenidas en la basura. Muchos de estos datos fueron obtenidos en países en donde los esquemas de recolección de pilas están en operación desde hace varios años. En el Cuadro 20 se muestra la cantidad de pilas (g/tonelada) depositadas en la basura de la Unión Europea.

Cuadro 20. Fracción de baterías (por tipo) en basura municipal de países europeos.

País	Año	Cantidad de pilas depositadas en la basura (g/ton peso húmedo, 30 % de humedad)				Cantidad de DSM estudiada (toneladas)
		primarias	NiCd	NiMH	Pb-acido	
Holanda	1998	170	8	NR	NR	10,000
Holanda	2000	160	9	NR	NR	10,000
Francia	1999	105	2.1	3.7	3.7	8,800
Austria	2000	230	11	NR	NR	377
Bélgica	2004	250	6.5 (fracción de recargables)			133
Alemania	2000	370	23	NR	NR	400
Suecia	1996	100-200	13.2	NR	NR	-

Fuente: Vangheluwe, *et al.* (2005)

En el caso de Canadá, RIS internacional Ltd. (2007) reporta un estimado de 346 millones de pilas desechadas a la basura en el 2004 (equivalente a 11,011 toneladas), en un total de 9,500,000 toneladas de basura residencial descargada. Con estos datos, se infiere que las pilas portátiles ocupan un 0.116 % del total de la basura.

Witzenhausen (Vangheluwe *et al.*, 2005) reporta, a partir de un muestreo de desechos sólidos municipales hechos en dos campañas, que el 48 % de las pilas encontradas son de zinc-carbón y el 43 % son alcalinas (ver Cuadro 21 y Figura 36)

Cuadro 21. Distribución de tipos de pilas en la basura determinada en dos campañas realizadas en la Unión Europea.

Tipo de pila	% en la basura	
	Campaña 1	Campaña 2
Zn-C	47.4	45.3
Alcalinas	45.1	39.9
NiCd	3.5	8.4
Li	0.5	0.1
NiMH	0.8	1.6
No identificadas	2.7	1.7

Fuente: Witzenhausen, 2001 en Vangheluwe, 2005

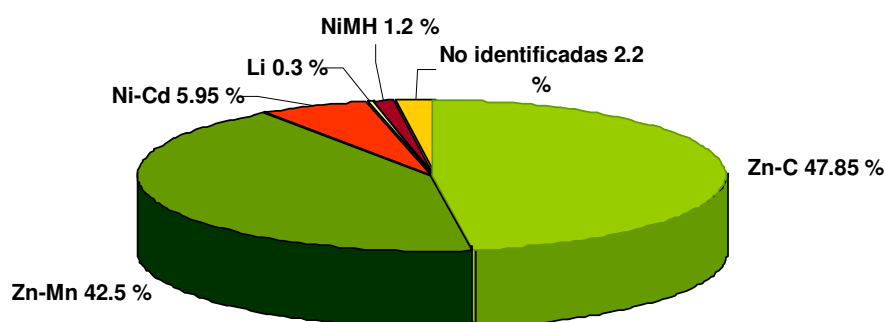


Figura 36. Distribución del tipo de pilas en la basura (valores promedio) (Fuente: Witzenhausen, 2001 en Vangheluwe, 2005)

Contenido de metales en la fracción total

Ciertos metales como el mercurio, cadmio, plomo, arsénico, e incluso cobre y zinc, pueden llegar a causar problemas de contaminación ambiental. Estos elementos son añadidos intencionalmente a los productos de consumo o de aplicación industrial, como las pilas, switches, equipos electrónicos y ciertos pigmentos. Al final, estos productos se descargan a la corriente municipal de desechos. Por ello, es indispensable conocer el

contenido de estos metales en la basura, para así monitorear su riesgo potencial al ambiente. Se han elaborado varios estudios al respecto.

En el Cuadro 22 se muestra el contenido total de metales en los desechos sólidos municipales de Estados Unidos, de acuerdo a una recopilación hecha por Aucott (2006). Algunas son concentraciones directamente reportadas y otros son estimaciones en base a la cantidad de basura desechada y la cantidad de metal desechado, asumiendo que se desechan 250 millones de toneladas de basura.

Cuadro 22. Concentración total de metales en los DSM de Estados Unidos

Metal	Concentración estimada (ppm)	Toneladas/año de desechos descargados en rellenos
Cadmio (Cd)	4	1,000
	20	5,000
		2,700
Cobre (Cu)	77	19,250
Cromo (Cr)	350	87,500
Plomo (Pb)	230	57,500
	400	100,000
		127,000
Mercurio (Hg)	1.5	375
		400
Níquel (Ni)	57	14,250
Zinc (Zn)	380	95,000

Fuente: Aucott, 2006

De acuerdo a Vangheluwe, *et al.* (2005) la concentración total de plomo, cadmio, níquel y zinc en los desechos sólidos municipales de la Unión Europea se encuentra en los intervalos mostrados en el Cuadro 23.

Cuadro 23. Concentración total de metales en los DSM en base seca (g/ton)

Metal	g/ton de DSM en base seca
Cd	0.3 - 12
Pb	200 - 800
Ni	12 - 159
Zn	710 - 2,677

Fuente: Vangheluwe, *et al.* (2005)

Comparando ambas tablas, se observa que existe una tendencia similar en la concentración de metales tanto para Estados Unidos como en Europa.

De acuerdo a Prudent, *et al.* (Aucott, 2006) en 1996 el 50 % del cadmio depositado en la basura provenía de los plásticos, que fungía como pigmento o como agente estabilizante. Los datos más recientes indican que las aplicaciones de cadmio en los productos de consumo han cambiado, incluso la distribución en la basura: se sabe que el 75 % del cadmio depositado en la basura se encuentra en baterías. También encontraron que el cobre está principalmente asociado con metales no ferrosos o como fragmentos, e incluso está asociado a partículas finas, papel y cartón (tinta). El cromo se encuentra principalmente como componente de fragmentos de metales no ferrosos, pero incluso en el vidrio y en partículas finas. Es el mismo caso para zinc y plomo. En el caso del plomo, se estimó que en el 2000 el 65 % del plomo desechado a la basura lo contribuyeron las pilas de plomo-ácido, 30 % en productos electrónicos y 4 % en vidrio, cerámicos y plásticos.

En el caso del mercurio, se cree que existe principalmente en productos como pilas, lámparas fluorescentes, termostatos, switches y en

dispositivos de medición como termómetros. De Cerreño, *et al.* (2002, en Aucott, 2006) estimaron, para la basura de Nueva York y Nueva Jersey que los desechos de amalgamas provenientes de consultorios dentales es la mayor fuente de mercurio, contribuyendo quizá al 50 % del mercurio total en los desechos sólidos municipales.

Concentración de metales en el lixiviado de la basura

La movilidad de los metales dependerá de varios factores. Uno de ellos es la forma en la cual se depositan el tiradero o relleno. Si el metal se encuentra inmerso en una estructura que se espera permanecer intacta en periodos de tiempo largos en un ambiente agresivo como el de un relleno, los metales no tendrán movilidad. En caso de no estar encapsulado en algún contenedor, la forma química del metal será el factor determinante de su movilidad en el ambiente. Otro factor importante, son las propiedades fisicoquímicas y biológicas del relleno, que son variables en el tiempo. En un relleno sanitario, se presentan etapas bien definidas en su ciclo de vida. SWANA (2004 en Aucott, 2006) describe 4 fases:

- Fase I, Ajuste inicial. La basura comienza a depositarse. Empiezan a desarrollarse microorganismos en un cantidad suficiente para empezar a descomponer los desechos.
- Fase II, Transición. Las condiciones aeróbicas del basurero se vuelven anaeróbicas. El ambiente se vuelve reductor.
- Fase III, Formación de ácidos. Durante esta fase, algunos desechos son hidrolizados, produciendo especies solubles. Las bacterias anaeróbicas formadoras de ácidos metabolizan la materia orgánica,

produciendo ácidos orgánicos volátiles; este fenómeno disminuye el pH del sustrato, que tiende a incrementar la concentración de metales disueltos en el lixiviado. Se ha reportado que el pH decrece de 7 hasta 5 en los primeros 200 días de vida del basurero.

- Fase IV, Producción de metano. Se caracteriza por la dominancia de bacterias metanogénicas. Convierten la materia orgánica en metano y dióxido de carbono. El ambiente se vuelve más reductor, induciendo a la reducción de sulfatos (SO_4^-) a sulfuros (S^{2-}). El pH aumenta como resultado de la neutralización de los iones H^+ por el amoníaco (NH_3), aumentando la presencia de iones amonio (NH_4^+). El pH se mantiene neutro, y la presencia de iones sulfuro e hidróxido (OH^-) favorece la precipitación de metales.
- Fase V, maduración. En esta fase, la actividad biológica decrece por falta de nutrientes, la producción de gases disminuye y la concentración de contaminantes en el lixiviado es menor que en otras fases previas.

Con la información anterior, se llega a la conclusión de que la concentración de los metales y su especiación dependerán también de la edad del relleno sanitario. Como se comentó anteriormente, la principal vía de exposición de los metales provenientes de la basura es a través del lixiviado, el mercurio es la excepción, ya que por su alta presión de vapor el aire se vuelve otra vía de exposición a este metal. De acuerdo a varios estudios sobre la calidad de lixiviado de basura, sus propiedades típicas son su alta conductividad eléctrica, alto contenido de materia orgánica y nitrógeno. Los elementos considerados potencialmente tóxicos se

encuentran a niveles muy bajos e incluso no se detectan. En el Cuadro 24 se muestran las propiedades típicas de un lixiviado de basura.

Cuadro 24 .Calidad típica del lixiviado de desechos sólidos municipales.

Parámetro	Intervalo (mg/L)	Parámetro	Intervalo (mg/L)
Conductividad eléctrica	480-72,500 umhos/cm	Manganeso	ND-400
Sólidos suspendidos	2-140,900	Fósforo total	ND-234
Demanda bioquímica de oxígeno	ND-195000	Boro	0.87-13
Demanda química de oxígeno	6.6-99,000	Bario	ND-12.5
Carbono orgánico total	ND-40,000	Níquel	ND-7.5
pH	3.7-8.9 unidades	Plomo	ND-14.2
Alcalinidad total	ND-15,050	Cromo	ND-5.6
Dureza	0.1-225,000	Antimonio	ND-3.19
Cloruro	2-11,375	Cobre	ND-9.0
Calcio	3-2,500	Talio	ND-0.78
Sodio	12-6,010	Cianuro	ND-6
Nitrógeno total Kjeldahl	2-3,320	Arsénico	ND-70.2
Hierro	ND-4,000	Molibdeno	0.01-1.43
Potasio	ND-3,200	Estaño	ND-0.16
Magnesio	4-780	Selenio	ND-1.85
Nitrógeno amoniacal	ND-1,200	Cadmio	ND-0.4
Sulfato	ND-1,850	Plata	ND-1.96
Aluminio	ND-85	Berilio	ND-0.36
Zinc	ND-731	Mercurio	ND-3.0

Fuente: McGinley y Kinet (1984) y Lu *et al.* (1981) en Christensen (1995)

En el Cuadro 25 se describe, de modo similar al cuadro anterior, las propiedades de un lixiviado de basura para un caso particular, en una región de Estados Unidos. En el Cuadro 26 se muestra la concentración promedio de metales en el lixiviado de alrededor de 200 rellenos sanitarios, compilados de una base de datos de Estados Unidos

Cuadro 25. Características fisicoquímicas del lixiviado de los desechos sólidos municipales de Minnessota (1996)

Propiedades químicas	media	mínimo	máximo	mediana	desviación estándar	tamaño de muestra
conductividad eléctrica (mmhos/cm)	15.7	4.6	35.2	16.0	5.0	244
pH	7.9	6.9	9.1	8.0	0.4	245
relación C/N	23.6	15.5	50.8	21.9	7.7	241
nitrógeno total Kjeldahl (%)	1.2	0.7	1.8	1.2	0.2	244
Carbono orgánico total	27.5	10.4	51.1	27.4	5.8	250
Aluminio (%)	1.5	0.6	2.4	1.5	0.4	258
Calcio (%)	3.5	1.8	9.5	3.3	1.0	258
Hierro (%)	1.8	0.3	3.6	1.9	0.7	258
Potasio (%)	0.5	0.1	1.2	0.5	0.2	258
Magnesio (%)	0.5	0.2	1.6	0.4	0.2	258
Sodio (%)	0.7	0.1	1.0	0.7	0.2	258
Fósforo (%)	0.7	0.1	27.5	0.3	2.5	258
N-amoniacal (ppm)	754.1	1.2	3,220.3	684.2	631.7	248
N-nitratos (ppm)	58.2	2.0	1,418.5	2.0	195.4	250
As (ppm)	8.8	3.2	19.8	8.9	3.6	257
B (ppm)	80.6	19.2	162.2	72.4	32.6	258
Cd (ppm)	10.3	0.9	109.9	8.3	12.5	257
Cr(ppm)	85.7	14.2	716.7	71.0	93.7	257
Cu (ppm)	545.4	45.0	8,344.0	377.1	804.2	256
Hg (pm)	6.5	0.6	149.0	5.7	12.1	250
Mn (ppm)	752.2	134.9	1,391.7	820.0	307.4	258
Mo (ppm)	5.9	0.9	41.4	5.8	3.3	257
Ni (ppm)	59.4	6.3	272.5	59.5	39.7	257
Pb (ppm)	661.7	36.0	62,037.0	342.3	3,930.0	258
Zn (ppm)	1,298.3	238.0	7,573.5	1,240.3	724.1	258

Fuente: 1996 Reporte de Malcom Pirnie a la oficina de asistencia del ambiente. Programa para el composteo de los desechos sólidos municipales. Vol. V

En: <http://www.extension.umn.edu/distribution/naturalresources/DD7083.html>

Cuadro 26. Concentración de metales en el lixiviado de la basura de Estados Unidos

Metal	Número de muestras	Promedio (mg/L)	Percentil 90 (mg/L)	Límites máximos permisibles (mg/L)		
				TCLP	Agua para beber (EPA)	Agua subterránea (RCRA)
Arsénico	2,444	0.441	0.100	5	0.01	0.05
Bario	1,779,	0.866	1.700	100	2	1
Cadmio	2,351	0.283	0.079	1	0.005	0.01
Cromo	2,776	0.235	0.341	5	0.1	0.05
Plomo	2,539	0.133	0.250	5	0.015	0.05
Mercurio	2,078	0.00715	0.0046	0.2	0.002	0.002
Selenio	1,754	0.585	0.180	1	0.05	0.01
Plata	1,830	0.0537	0.056	5	NA	0.05

Fuente: SWANA, 2004 en Aucott, 2006

Se observa de los datos del Cuadro 26, que los lixiviados analizados no se consideran como residuos peligrosos, ya que está por debajo de los límites máximos para el TCLP.

Vangheluwe, *et al.* (2005) reporta una recopilación de concentraciones de cadmio, plomo, níquel y zinc en lixiviados de basura de la Unión Europea (Cuadro 27) El Cuadro muestra intervalos de concentraciones, ya que el autor comenta que los resultados encontrados son muy variables debido a la heterogeneidad de la basura.

Cuadro 27. Concentración de metales en el lixiviado de la basura de la Unión Europea

Metal	Concentración (mg/L)
Cadmio	0.003-0.005
Plomo	0.002-0.45
Níquel	0.2-23.1
Zinc	0.06-20

Fuente: Vangheluwe, *et al.* (2005)

La solubilidad de las especies formadas por estas especies en los lixiviados puede llegar a ser baja o nula. Los sulfuros de algunos metales, como el sulfuro mercuríco (HgS) son prácticamente insolubles. Algunos óxidos, como el óxido de cadmio (CdO), Pb_3O_4 , Pb_2O_3 y PbO_2 (óxidos de plomo), son también insolubles. Compuestos como el óxido mercuríco (HgO), hidróxido de cadmio ($Cd(OH)_2$), PbO o $PbSO_4$ (sulfato de plomo) son poco solubles, el cual una disolución saturada de estos compuestos pueden contener concentraciones del orden de decenas de partes por millón o más.

Otra característica importante es la alta capacidad de intercambio iónico de la materia orgánica de la basura, que puede formar compuestos muy estables con iones como Pb^{2+} o Hg^{2+} , con el cual se puede amortiguar la movilidad de los metales en el lixiviado.

Aporte de los metales de las pilas al contenido total en la basura.

En el Cuadro 28 se presentan datos de países europeos en los que se observa que el cadmio representa un porcentaje importante respecto al consumo anual de este metal (28%). En níquel y zinc la proporción de consumo es mínima.

Cuadro 28. Porcentaje del aporte de metales de las pilas al consumo total del metal en la Unión Europea

metal	consumo anual del metal ton	mercado anual de pilas tipo	pilas ton/año	cantidad de metal en pilas %	pilas ton/año	porcentaje
Zinc	3,000,000	Zn -C, alcalinas	135,000	22	29700	0.99
Níquel	694,000	Ni -Cd	12,000	22	2640	0.38
		Ni -MH	10,000	40	4000	0.58
Cadmio	6,000	Ni -Cd	12,000	14	1680	28.00

Fuente: Modificado de Vangheluwe *et al.* (2005)

La cantidad aportada de metales de las pilas a la basura dependerá del volumen desechado en un periodo de tiempo, y además del contenido de estos dispositivos, que varía de una tecnología a otra.

En el Cuadro 29 se muestran los valores promedio obtenidos de diversas fuentes del contenido de metales en los diferentes tipos de pilas. Básicamente contienen elementos esenciales para la vida, como son el hierro, el zinc y el manganeso. Además, contienen carbón, agua, y otras sustancias no metálicas que no se reportan.

Cuadro 29. Contenido de metales en las pilas y su aporte al consumo total de cada metal

elemento / tipo de pila	Zn-Mn	Zn-C	HgO	botón	Zn-aire, botón	Li, botón	NiCd	NiMH	Ión-Li	Ag ₂ O
% en peso										
Fe	26.4	16.8	37.0		42.0	60.0	34.8	20.0	24.0	42.0
Zn	24.0	21.5	12.5		35.0		0.1	1.0		9.0
Mn	25.2	15.0	1.0			18.0	0.1	1.0		2.0
Ni	0.5	0.0	1.0			1.0	19.8	35.0	37.0	2.0
Cd	0.0						17.7			
Co							0.6	4.0	2.0	
Al							0.0		0.8	
Cr							0.0		0.8	
Li						3.0			3.0	
Ag										31.0
V									3.4	
Ti									3.0	
Pb	0.04	0.1								
Cu	0.5									
Zr									6.3	
Hg			31.0		1.0					0.4
La										
Ce										
Pr										
Nd										
Cd	0.0074									
Cr	0.004									
Otros metales	1.3	0.8	7.0					10.0		4.0

Fuentes: Fischer *et al.* (2006), Vangheluwe, *et al.* (2005), Rydh y Svard (2003), Primary Batteries (2003)

En el Cuadro 30, Vangheluwe, *et al.* (2005) muestra las contribuciones específicas de diferentes tipos de pilas al contenido total de cadmio, níquel, plomo y zinc en los desechos sólidos municipales.

Cuadro 30. Aporte de diferentes tipos de baterías al contenido total de metales de los Desechos Sólidos Municipales (DSM)

Contribución de las pilas por tipo	Cadmio		Níquel		Plomo		Zinc	
	g/ton seca	%	g/ton seca	%	g/ton seca	%	g/ton seca	%
NiCd	1.7	17	2.7	2.7				
Ni-MH			0.15	0.2				
ZnC y alcalinas							39	2
Pb-ácido					2.8	0.4		
Contenido total DSM	10	100	100	100	777	100	1900	100

Fuente: Vangheluwe, *et al.* 2005

De acuerdo al Cuadro 30, es claro que la contribución de los metales de las pilas al flujo total de metales es limitada. Las pilas primarias son responsables de sólo un 2 % del zinc observado en la basura. Las pilas de NiMH, el cual es una tecnología relativamente joven, tiene hasta el momento una contribución marginal (0.2 %) del níquel contenido en la basura, y las pilas de níquel-cadmio un 2.7 %. La contribución de las pilas plomo-ácido al contenido total de plomo en la basura es mínima (0.4 %). En el caso de las pilas de níquel-cadmio, éstas contribuyen al 17 % del contenido de cadmio observado.

Otro estudio al respecto, pero con conclusiones muy distintas al anterior, es el de Heck, *et al.* (1993); en esta investigación se determinaron las contribuciones de cada fracción específica en el contenido total de cadmio, plomo y mercurio en la basura de Florida. En el Cuadro 31 se muestran estos resultados.

Cuadro 31. Composición de los DSM y la contribución de las pilas gastadas.

Componentes	Porcentaje por peso	Concentración (ppm) ¹			Porcentaje		
		Pb	Cd	Hg	Pb	Cd	Hg
Desechos de comida	7.28	1.37	0.06	0.22	0.96	0.13	1.02
Desechos de jardinería	16.3	3.39	0.1	0.24	3.91	0.47	2.49
Periódicos	7.49	5.61	0.16	0.47	1.52	0.17	1.13
Papel de oficina	2.57	3.63	0.04	0.23	1.12	0.03	0.38
Cartón	4.59	4.61	0.09	0.28	1.94	0.13	0.82
Pañales	2.67	2.97	0.06	0.24	0.65	0.04	0.41
Otros tipos de papel	15.6	2.37	0.07	0.21	3.22	0.31	2.08
Textiles	4.73	2.18	0.17	0.36	0.89	0.24	1.08
Bolsas de plástico	2.78	92.2	0.31	0.26	24.2	0.25	0.46
Recipientes y etiquetas PET	0.4	215.44	0.22	1.01	1.13	0	0.05
Recipientes y etiquetas HDPE	0.48	3.72	0.19	0.73	0.02	0.01	0.07
Otros recipientes	1.54	18.1	0.1	0.3	2.16	0.05	0.29
Etiquetas y tapas OB	0.09	77.06	90.59	0.46	2.54	2.21	0.01
Otros plásticos	4.07	21.7	0.38	0.24	7.35	0.45	0.62
Ferrosos	6.33	8.27	0.28	0.16	4.36	0.53	0.64
No ferrosos	0.19	41.2	8.47	0.17	0.72	0	0
Aluminio	1.23	36.9	0.95	0.26	3.99	0.35	0.2
Vidrio	3.98	22.7	0.14	0.09	9.17	0.17	0.23
Construcción	11	4.66	0.38	0.24	3.58	1.24	1.68
Pilas²	0.06	91.7	4870	2100	0.43	91.3	84.6
Misceláneos	6.67	45	0.15	0.39	26.2	1.4	1.66
Total	100				100		

Fuente: Heck, *et al.* 1993.**Nota:** ¹ Es la concentración de los metales en cada material.² La concentración de los metales en las pilas fue calculado en base a la distribución estimada de los componentes en pilas de zinc-carbono y NiCd.

Con estos datos se llega a la conclusión de que la contribución de plomo y mercurio de las pilas es una fuente importante al contenido total de estos metales en la basura de Florida, con una aportación de mercurio del 85 % y un 91 % de cadmio. En el caso del plomo, la contribución es mínima (0.43 %), siendo la de mayor aporte la fracción de plásticos (37.4 %)

En el Cuadro 32, se muestra la cantidad de metales descargados a la basura provenientes de las pilas en el año 2004 en Canadá:

Cuadro 32. Cantidad de metales provenientes de las pilas descargadas a la basura en el 2004

Metales	Cantidad descargada (toneladas)
Plomo	765.8
Mercurio	0.4
Cadmio	234.7
Níquel	386.4
Zinc	1,673.9
Manganeso	2,436.7
Plata	4.3
Litio	1.6
Hierro	2,424
Aluminio	5.3

Fuente: RIS Internacional Ltd. (2007)

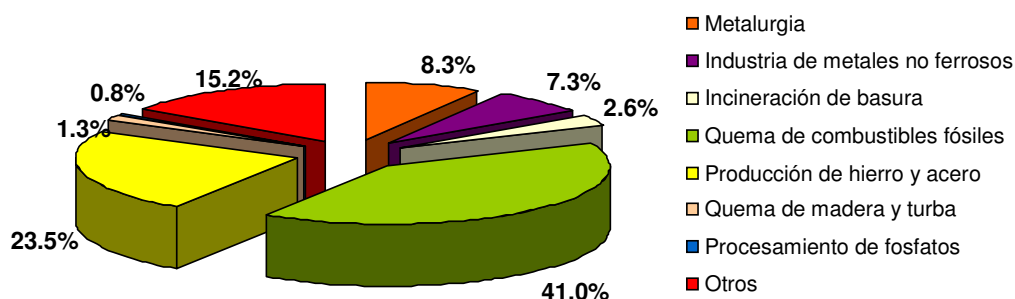
Contribución de los metales contenidos en las pilas con respecto a otras fuentes al medio ambiente.

En la Figuras 37, 38, 39 y 40 se presentan las contribuciones relativas de varias fuentes al total de las emisiones de cadmio, zinc, níquel y plomo al ambiente (Vangheluwe *et al.*, 2005); como se puede observar, las principales fuentes de estos metales son la quema de combustibles fósiles y las actividades industriales; la disposición de los desechos sólidos municipales en los basureros contribuyen de forma mínima a las emisiones.

Para las emisiones de cadmio al aire, la incineración de basura contribuye con 2.6% al total. La combustión de combustibles fósiles con un 43.5% y la producción de hierro y acero con 25%

Respecto al agua, la producción de hierro y acero contribuye con un 40% y la industria no ferrosa con 24.9%. Los rellenos sanitarios y los incineradores de basura conjuntamente solo representan el 2.3%.

Emisiones de cadmio al aire



Emisiones de cadmio al agua

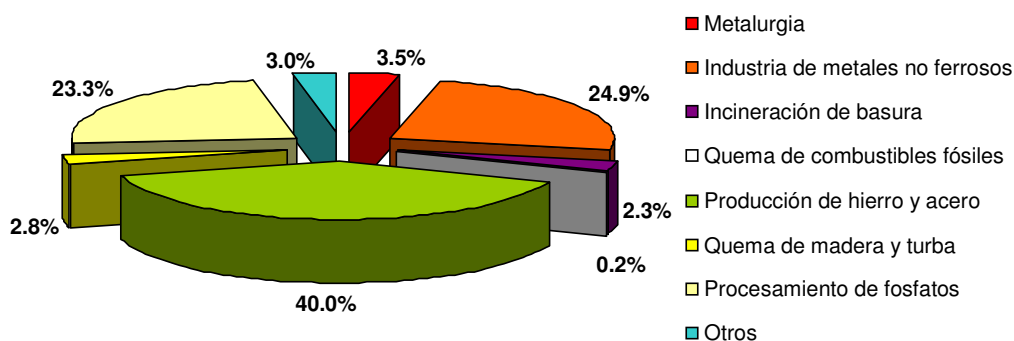
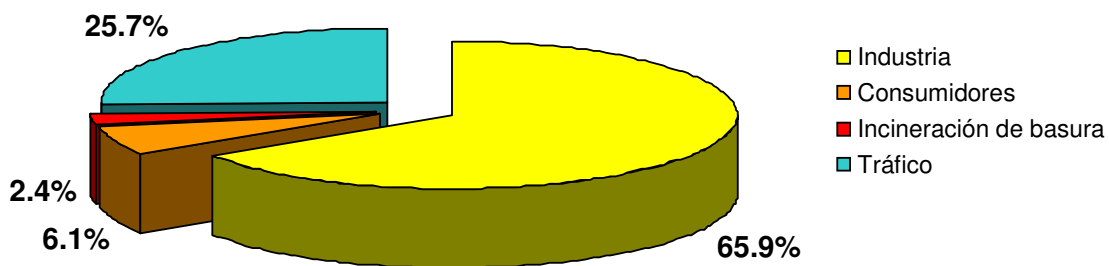


Figura 37. Porcentajes de las fuentes de emisión de cadmio al ambiente (Fuente: Vangheluwe, et al., 2005)

En el caso del zinc, las emisiones al aire provienen en un 67.2% de las actividades industriales y del tráfico vehicular (25.2%). La incineración causa el 2.4% de las emisiones totales de este elemento y para los cuerpos de agua solamente contribuye con 0.2%. Los efluentes de las plantas de tratamiento son la fuente más importante pues aporta al ambiente el 40.5 %, del total de las emisiones.

Emisiones de zinc al aire



Emisiones de zinc al agua

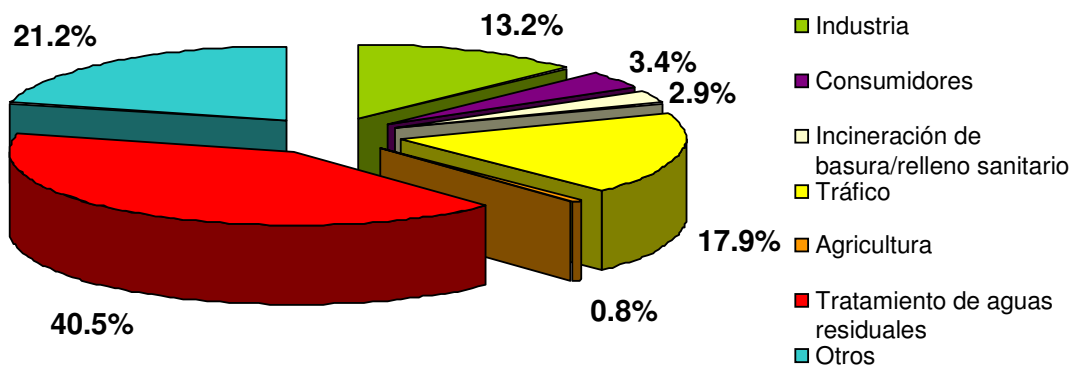
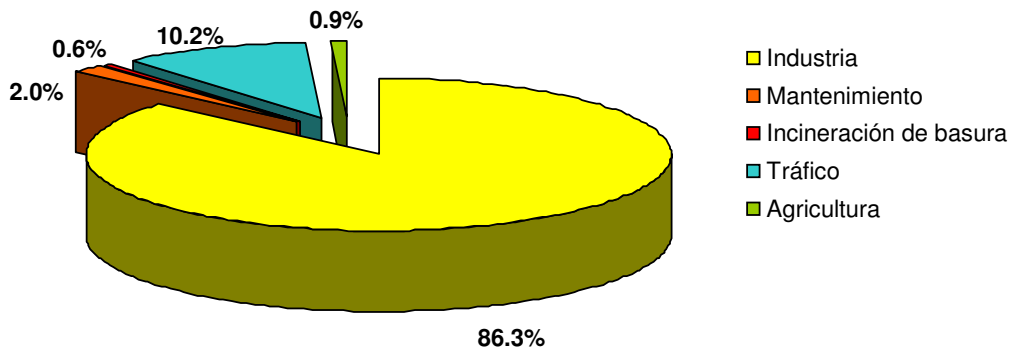


Figura 38. Porcentajes de las fuentes de emisión de zinc al ambiente (Fuente: Vangheluwe, et al., 2005)

Las fuentes más importantes de níquel en Europa para el aire son la industria y el tráfico vehicular (86.3 y 10.2 % respectivamente), mientras que en el caso de emisiones a los cuerpos de agua son las plantas de tratamiento (55.5 %) seguidas por la industria (25.4 %) las que originan las mayores emisiones (Figura 39). La contribución de la incineración de basura y de los rellenos sanitarios en conjunto ocupan un 13.9 %.

Emisiones de níquel al aire



Emisiones de níquel al agua

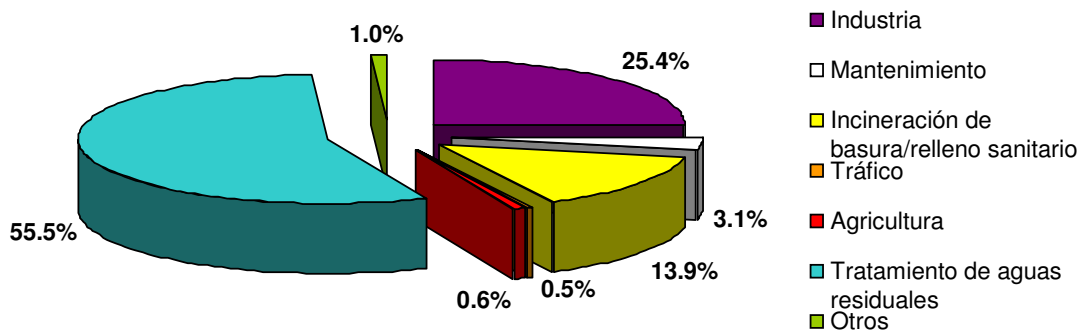
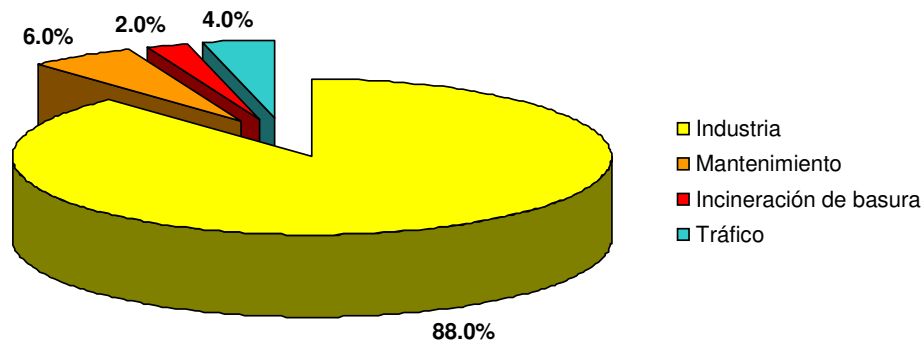


Figura 39. Porcentajes de las fuentes de emisión de níquel al ambiente (Fuente: Vangheluwe, et al., 2005)

Las emisiones de plomo al aire de la incineración de DSM representan el 2% de todas las emisiones de este elemento, que en su mayor parte se deben a actividades industriales (88 %). Las emisiones de plomo a cuerpos de agua más importantes son las relacionadas con trabajos de mantenimiento (35 %), la industria (20%) y los efluentes de plantas de tratamiento (17 %). La incineración y manejo en rellenos sanitarios de la basura solamente contribuyeron un 3.3 % (Figura 40). Las pilas portátiles consideradas en este trabajo no aportan plomo a la basura, pero las baterías automotrices si son un factor más importante a considerar.

Emisiones de plomo al aire



Emisiones de plomo al agua

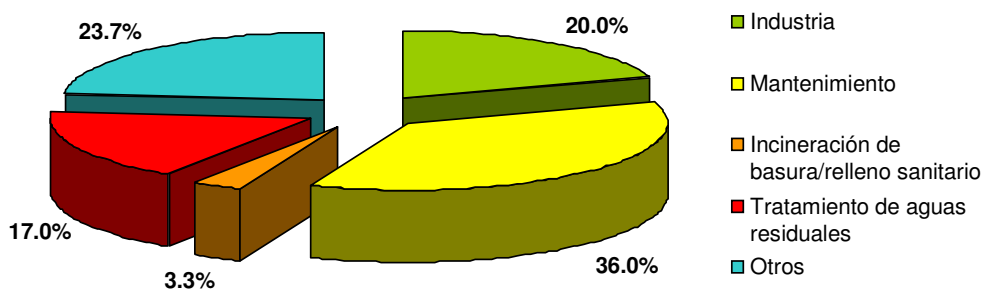


Figura 40. Porcentajes de las fuentes de emisión de plomo al ambiente (Fuente: Vangheluwe, et al., 2005)

En cuanto a las pilas, su contribución con respecto a otras fuentes antropogénicas a las emisiones al aire y el agua es mínima. Las pilas de NiCd contribuyen a un 0.4 % del total al aire (0.5 toneladas de cadmio) y 0.4 % de las emisiones totales de cadmio al agua (0.15 toneladas de cadmio). Las tecnologías basadas en níquel contribuyen a un 0.021 % (0.1 toneladas de Ni) y 0.4 % (2.5 toneladas de Ni) a las emisiones de níquel al aire y al agua, respectivamente. Un estimado de 0.05 % (1 tonelada de Zn) de todas las fuentes de emisión al aire proviene de las pilas primarias gastadas de zinc-carbón y alcalinas; en el caso de las emisiones al agua, la contribución de las pilas es sumamente pequeña (0.006 % o 0.5 toneladas de Zn) De un modo similar, la contribución a las emisiones de plomo a causa de las pilas gastadas de plomo-ácido es de 0.007 % (0.1 toneladas de Pb) al aire y de 0.01 % (0.1 toneladas de Pb) al agua.

Con estas evidencias, Vangheluwe (2005) concluye que las pilas gastadas representan una contribución mínima a las emisiones totales de plomo, cadmio, níquel y zinc.

3.5.2 Planes de manejo de pilas usadas

Cuando el ciclo de vida útil de los productos llega a su fin, éstos se convierten en desechos. Si los desechos no son considerados peligrosos para la población y el ambiente, pueden disponerse en los tiraderos municipales o rellenos sanitarios, incinerarse, o si las propiedades de los materiales componentes de éstos son las adecuadas, se reciclan para volver a integrarse a la cadena de consumo. Éste es el caso de las pilas

portátiles. Sin embargo, algunos tipos de pilas contienen materiales que son potencialmente tóxicos como mercurio, cadmio, níquel y plomo. Muchos países han tomado cartas en el asunto para disminuir el riesgo ambiental por estos compuestos. Algunos de los planes de manejo llevados a cabo son: la disminución o supresión de los componentes tóxicos en la manufactura de pilas, sustitución de éstas cuyo contenido las hacen peligrosas por tecnologías más amigables al ambiente y reciclado de sus componentes.

a) Reducción y sustitución

El gobierno se ha enfocado en establecer medidas para la reducción de metales pesados usados en la manufactura de las pilas, sobre todo el eliminar lo más posible el contenido de mercurio y reduciendo el contenido de cadmio. En 1991 la Comunidad Económica Europea adoptó la Directiva 91/157/EEC, y casi al mismo tiempo los fabricantes de pilas a nivel internacional empezaron a desarrollar pilas alcalinas con un contenido reducido de mercurio; posteriormente a esta directiva han surgido otras más estrictas, incluso se espera que para el año 2010 las pilas comercializadas en Europa estén libres de mercurio y se dejen de comercializar las pilas de níquel-cadmio, por lo cual las investigaciones en este ramo de parte de las manufactureras han sido constantes.

Además de la reducción o supresión de estos componentes, se han desarrollado nuevos dispositivos cuyos materiales no son considerados peligrosos para el ambiente, con el fin de sustituir tecnologías que sí lo son; por ejemplo, para sustituir las pilas de níquel-cadmio han surgido las pilas de níquel-hidruro metálico, ión-litio, ión-litio polímero, que además

de su inocuidad se ha logrado mayor efectividad en su funcionamiento y mayor vida útil; y para la sustitución de las pilas de botón de mercurio se desarrollaron pilas de botón de zinc-aire que están libres de mercurio.

b) Reciclado de pilas

El reciclado de pilas se ha implementado en diferentes países como Japón, Estados Unidos y en la Unión Europea. Ésta opción de manejo surgió como una necesidad de obtener controles más estrictos en la incineración de desechos sólidos municipales en la Unión Europea, especialmente en Suiza, ya que tiempo atrás se habían registrado altas emisiones de mercurio en incineradores, haciendo responsable a la presencia de pilas usadas en los desechos domésticos. Las autoridades llevaron a cabo la recolección separada de las pilas de los demás desechos y formularon leyes que regulan el contenido de mercurio y cadmio en estos dispositivos. El reciclado de pilas fue la opción de manejo de estos desechos más plausible por encima del confinamiento.

Actualmente se considera que el reciclado de pilas presenta aspectos positivos de importancia. De acuerdo a Labouze (2003) la utilización de metales reciclados, en vez de vírgenes, para la producción de baterías, tendría un impacto medioambiental positivo porque disminuiría el gasto de energía y la contaminación derivadas de la extracción del mineral virgen. Por ejemplo, utilizar cadmio o níquel reciclados exige un 46% y un 75% menos de energía primaria, respectivamente, en comparación con la extracción y refinado de los metales vírgenes (Rydh, C., Karlström, M., 2002). Este también es el caso de la plata y el plomo; pero en el caso de

otros elementos, su recuperación tiene un alto costo económico (Figura 41). Además, representa un costo ambiental que puede ser bajo o muy alto dependiendo del tipo de tecnología y del control de operación.

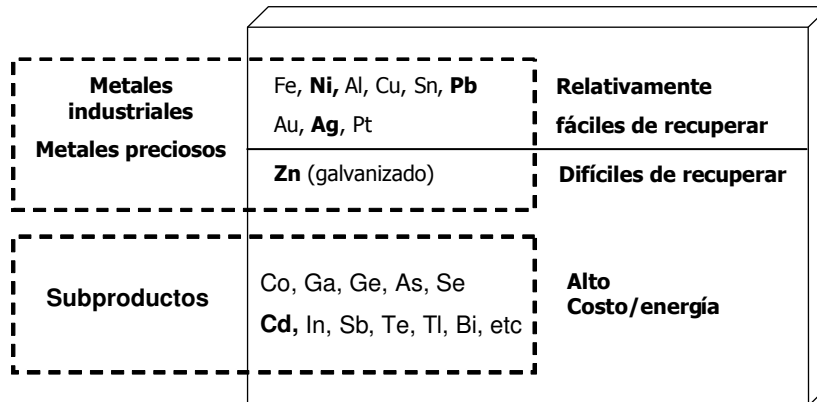


Figura 41. Complejidad relativa del reciclado de metales

En los países con experiencia en el reciclado de pilas, se han establecido programas que involucran 3 operaciones: recolección, clasificación y reciclado.

1. Recolección. Ésta es la primera operación llevada a cabo para el reciclado de las pilas. El consumidor final desecha a las pilas por separado del resto de la basura, ya sea regresándolas a los vendedores o disponiéndolos en puntos de recolección establecidos en la comunidad. Posteriormente se transportan a la planta de reciclaje. La responsabilidad de esta operación puede ser de parte de las autoridades municipales o puede ser compartida con las empresas recicladoras y los fabricantes de pilas (Fricke en Kiehne, 2003). Esta etapa es muy importante, ya que se debe evitar que las pilas usadas terminen en los incineradores ya que se pueden emitir sus materiales a

la atmósfera. La Asociación Europea de Pilas Portátiles (EPBA) sostiene que los costos de recolección y transporte de pilas en los países miembros que han establecido sistemas eficaces de recolección que cubren todo tipo de pilas y acumuladores, es de 300-550 €/tonelada.

2. Clasificación. los tipos de pilas recolectadas vienen mezcladas; al llegar a la planta éstas se separan por tipos de acuerdo a su composición química ya sea de manera manual o con máquinas clasificadoras, que los separan por tamaño y por composición. Las máquinas funcionan con diversos fundamentos; existen tablas vibratorias que separan a las pilas por tamaño con contribución manual; sensores electrodinámicos que separan las pilas por composición usando campos magnéticos; sensores de rayos X, en donde cada sistema electroquímico es detectado en tiempo real y son separados por tipo con un chorro de aire comprimido; también existen los detectores UV que separa las pilas que contienen mercurio de las que están libres de ese elemento (Fricke en Kiehne, 2003).

3. Reciclaje Los procesos de reciclado de pilas están agrupados en las siguientes categorías, de acuerdo al tipo de tratamiento: Procesos hidrometalúrgicos, procesos pirometalúrgicos, destilación de mercurio y otros procesos térmicos.

- **Proceso hidrometalúrgico.** Se refiere la recuperación de los metales de las pilas vía extracción acuosa. El proceso comprende una etapa mecánica y otra química. En la fase mecánica, las pilas son trituradas para separar la cubierta (metal, papel, plástico) de los componentes activos. Estos componentes son químicamente

procesados para producir una solución, que al ser sometido a electrólisis u otro tipo de tratamiento, se separan los metales disueltos (Fisher, 2006).

- **Proceso pirometalúrgico.** Utiliza hornos de altas temperaturas para la separación de los componentes de las pilas. No existe un proceso genérico, por lo tanto cada empresa tiene un proceso metalúrgico único y además difiere de acuerdo al tipo de pila a tratar (Fisher, 2006)
- **Destilación de mercurio.** Durante este proceso, el mercurio es recuperado de los desechos que contienen este elemento como las pilas botón de mercurio. Consiste en un tratamiento térmico al vacío, durante el cual el mercurio se vaporiza; posteriormente se recupera en trampas a baja temperatura obteniendo mercurio metálico.
- En el caso de las plata, su recuperación es más común por la vía electrolítica, en donde la plata es recobrada de la disolución por su electrodeposición en un cátodo (Fisher, 2006)

Además se puede reciclar los componentes de las pilas por otras vías como en un horno de arco eléctrico (el cual es usado para procesar diversos subproductos, como la chatarra) o en hornos de fundido, con controles estrictos para evitar las emisiones de mercurio a la atmósfera.

En el Cuadro 33 se muestra el proceso en el cual se tratan las pilas de acuerdo al tipo y componentes:

Cuadro 33. Procesos de reciclaje aplicados a diversos tipos de pilas.

Tipo de pila	Proceso		
	Hidrometalúrgico	Pirometalúrgico	Otros tratamientos térmicos
Pilas primarias			
Pilas botón	X	X	X
Mn-alcalinas	X	X	X
Zn-C	X	X	X
Li-Mn	X	X	
Zn-Aire	X		
Pilas secundarias			
Pb-ácido		X	
NiCd			X
Ni-MH	X	X	
Ión litio	X	X	

Fuente: Labouze, 2003

En el Cuadro 34 se muestran los procesos de reciclaje llevados a cabo en la Unión Europea, qué tipo de pilas son adecuadas para el proceso y qué empresas se encargan de ello.

Cuadro 34. Procesos de reciclado de pilas realizados en la Unión Europea

Compañía/proc esador	Localización	Tipo de proceso	Tipo de pilas tratadas
Recupyl	Unión Europea	Hidrometalúrgico	Alcalinas, Zn-C, ZnO, Li, LiMn, ión-Li
G&P	Reino Unido	Hidrometalúrgico (sólo etapa metálica)	Alcalinas, ZnC, ZnO
Citron	Unión Europea	Pirometalúrgico	Alcalinas, ZnC, ZnO
Batrec	Unión Europea	Pirometalúrgico	Alcalinas, ZnC, ZnO, Li, LiMn, ión-Li
Valdi	Unión Europea	Pirometalúrgico	Alcalinas, ZnC, ZnO
Indaver Relight	Unión Europea	Destilación de mercurio	AgO
SNAM	Unión Europea	Pirometalúrgico y destilación de mercurio	NiCd, NiMH
Campine	Unión Europea	Pirometalúrgico	Plomo-ácido

Fuente: Fisher, 2006

Ciertos factores influyen en la viabilidad financiera del reciclaje de pilas, como el valor de los materiales recuperados¹⁴, costo del transporte de las pilas recolectadas a la planta de reprocesamiento, grado de segregación del residuo para cada tipo de pila, costo de la clasificación de las pilas por tipo y el costo del reprocesamiento de las baterías para extraer la fracción recuperable.

Tal como lo mencionan las leyes elaboradas al respecto, las empresas manufactureras de pilas e importadores son las entidades responsables para cubrir los gastos del reciclado de las pilas. En algunos casos la inversión tiene que ser fuerte o dependiendo del tipo de pila los costos pueden ser nulos o incluso las plantas recicladoras pagan por recibir pilas; por ejemplo, las pilas de plomo-ácido, por el valor del metal. En el Cuadro 35 se muestran los costos aunados a la recuperación de metales de las pilas por tipo de tecnología (€/tonelada) en la Unión Europea.

Cuadro 35. Costos de reciclado de pilas portátiles por tipo

Tecnología	Costo (Euros/tonelada de pilas)
Pilas alcalinas y ZnC	900-1000 €/ton sin importar el contenido de Hg 180-700 €/ton con restricciones en el contenido de Hg
Pilas pequeñas de plomo-ácido	0-1000 €/ton (pueden ser negativos)
Pilas de botón	2600-4000 €/ton
Pilas de níquel-hidruro metálico	0 €/ton
Pilas de litio	2000 €/ton
Pilas de ión-litio	1000 €/ton

Fuente: Labouze, 2003

¹⁴ El reciclado de los materiales que componen las pilas en algunos casos es manejado por lo económico. En algunos países, como en el caso del Reino Unido, el valor de la plata y el plomo obtenido por extracción primaria es mayor que el costo de su recuperación en las pilas gastadas (www.wasteonline.org.uk).

Ventajas y desventajas del reciclado de pilas

La recolección y reciclaje de pilas que contienen mercurio, cadmio y plomo tiene grandes beneficios ambientales en comparación con la disposición de estos dispositivos a los tiraderos o rellenos sanitarios, ya que se disminuye las emisiones de estos elementos directamente al ambiente, a pesar de que la tecnología de separación de las pilas por tipo, la tecnología de reciclado y los controles de emisión en las plantas de reciclado sean costosas.

Labouze (2003) sostiene que, además de disminuir las emisiones de metales en los rellenos sanitarios a causa de las pilas, el reciclar los metales de las pilas tiene consecuencias sociales y ambientales benéficas, ya que se pueden generar más fuentes de empleos; por ejemplo, si se recicla del 50 al 60 % de las pilas usadas, se genera un 20 % más de empleos, generándose más si se aumenta la proporción de pilas a reciclar. Además, se disminuyen las emisiones de CO₂, SO_x y NO_x a la atmósfera por otros sistemas de manejo utilizados.

En el 2008, entrará en vigor la Directiva 2006/66/EEC, que obliga a recolectar y reciclar todas las pilas sin importar su tecnología. Ésta disminuirá costos del proceso, pero algunos estudios cuestionan esta decisión.

Fisher (2006) menciona que la implementación de esta Directiva dará como resultado un incremento significativo en los costos del manejo de pilas usadas, con algunas ganancias en los aspectos ambiental y social. Al

mismo tiempo, se emiten entre 198-248 kg menos de CO₂ por tonelada de pilas, en comparación con los tratamientos convencionales.

Aumônier (2000) comenta que los beneficios de la recuperación de metales por reciclado de pilas primarias son menores al considerable impacto ambiental por el alto consumo de energía y emisiones al aire relacionado a la recolección y transporte de las pilas; además de que el costo del proceso, que puede llegar a ser mayor a 1000 €/tonelada de pilas, es debido en su mayoría al transporte.

Arnold (2006), quien realizó un análisis costo-beneficio del reciclado de las pilas usadas, coincide con esta conclusión; su análisis muestra que la recolección y reciclaje de las pilas no está justificado económicamente; el impacto ambiental relacionado al manejo de pilas en la corriente de desechos domésticos no justifican los altos costos del reciclaje, a excepción de las pilas de botón de mercurio, y bajo ciertas condiciones, para las pilas de níquel-cadmio. Sin embargo, considera que la restricción o prohibición de la manufactura y comercio de estas pilas es la acción más justificada mientras no existan alternativas que no presenten el mismo costo exorbitante del reciclado.

Rondia (1994), de la Universidad de Liege, Bélgica en su estudio de riesgo ambiental del zinc provenientes de las pilas usadas, concluye que el zinc no es un elemento considerado de riesgo para el medio ambiente, ya que se encuentra en grandes cantidades en el suelo y rocas y es importante para el metabolismo de animales y plantas; la contribución del zinc proveniente de las pilas primarias usadas es mínima con respecto a otros desechos sólidos domésticos, y al tener cantidades reducidas de mercurio

y cadmio posterior a las legislaciones erigidas su disposición a los rellenos sanitarios no implica un riesgo a la salud y el ambiente y no es necesario reciclarlas.

Haight, *et al.* (1992), de la Universidad de Waterloo, en su evaluación del riesgo ambiental de las pilas de uso doméstico en Canadá, concluyen que las pilas alcalinas, zinc-carbón y níquel-cadmio no representan una fuente significativa de metales pesados en los desechos sólidos municipales y por lo tanto no representan un riesgo al ambiente; la opción de reciclado de las pilas puede representar un riesgo a la salud y al ambiente y en algunos casos no ser necesario como en las pilas de zinc-carbón y alcalinas por la reducción de los niveles de mercurio en estos aditamentos; pero por otro lado es viable el reciclado de las pilas de níquel-cadmio y de plomo-ácido.

Yanase, *et al.* (1996) de la Universidad de Fukuoka, Japón, realizaron una evaluación del comportamiento del mercurio y la corrosión de pilas primarias enterradas dentro de un sistema que simula las condiciones de un relleno sanitario. Se encontró que la corrosión de las pilas no fue significativa después de 10 años de entierro en el sistema, y que los niveles de mercurio en el lixiviado y el aire no presentaron un cambio significativo durante este periodo, y que incluso se encontró dentro de los límites ambientales de Japón.

Estos estudios demuestran en resumen que el reciclado es una opción de manejo cara, pero se justifica para las pilas de níquel-cadmio, óxido de mercurio y plomo-ácido; sin embargo, el reciclado de pilas alcalinas, zinc-carbón, níquel-hidruro metálico y con tecnología de litio, que no contienen

elementos peligrosos no son una opción factible ya que implica un alto costo económico y un riesgo ambiental mayor.

4 SITUACIÓN EN MÉXICO

4.1 Antecedentes

La información sobre tipos, cantidades y vida útil de las pilas portátiles en México es muy limitada, los principales resultados de los estudios existentes son:

La Asociación Mexicana de Fabricantes de Pilas (AMEXPILAS) estima que se comercializan cada año aproximadamente un total de 600 millones de pilas y baterías primarias; de este total, se calcula que las pilas de zinc carbón tienen una participación del 54 %, mientras que el restante 45 % son alcalinas y el 1 % restante, corresponde a las demás (AMEXPILAS-SEMARNAT, 2006).

Bolaños-Berruecos (2004) realizó una investigación para determinar el tipo de pilas que se desechan en el municipio de Puebla; en el cual realizó una encuesta a vendedores y consumidores de pilas, y determinó que las pilas consumidas se utilizan en su mayor parte para controles de televisión, teléfonos celulares, relojes y cámaras fotográficas, y una buena proporción de éstas son no recargables. De las pilas que se venden en los negocios encuestados, el 67 % corresponde a pilas primarias y el 33 % a pilas secundarias. Además, recolectó pilas gastadas de hogares de ese municipio cuya distribución se muestra en la Figura 42. Cabe señalar que el estudio carece de la rigurosidad científica necesaria para interpretar o comparar los resultados, ya que no describe el método de muestreo y los

métodos analíticos utilizados no los fundamenta ni están estandarizados o reportados en la literatura internacional.

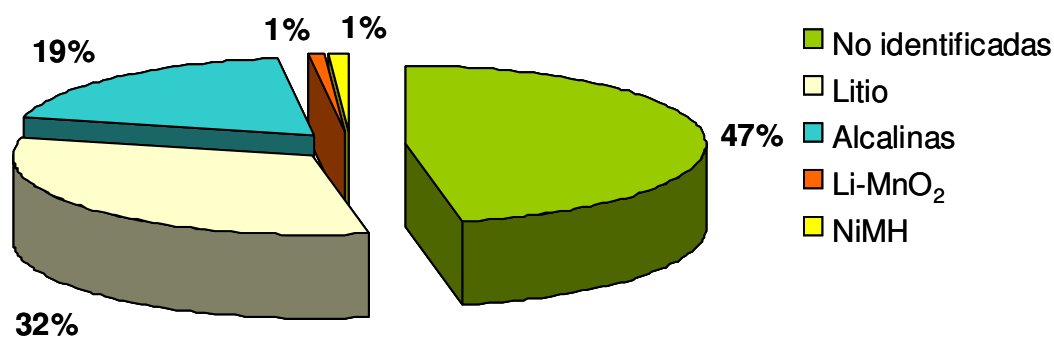


Figura 42. Porcentajes de pilas gastadas recolectadas en hogares del Municipio de Puebla (Fuente: Bolaños-Berruecos, 2004)

Castro y Díaz (2004), con base en los datos oficiales del periodo de 1988, y de 1994 a 1998 publicados por INEGI (<http://dgcnesyp.inegi.gob.mx>) y BANCOMEXT (<http://www.bancomext.com/Bancomext/index.jsp>) determinaron el número de pilas por habitante que se consumen anualmente y calcularon un porcentaje de pilas que ingresan en forma ilegal. En el Cuadro 36 se presenta el consumo de pilas primarias alcalinas (Zn-Mn) y de zinc-carbón (Zn-C), así como de pilas secundarias de níquel cadmio (NiCd) de acuerdo a estos datos.

Cuadro 36. Consumo de pilas alcalinas y de zinc carbón y pilas secundarias de níquel-cadmio (piezas/hab año)

Año	Núm. de habitantes¹	Producción e importación de alcalinas y Zn-C	Importación baterías NiCd	Piezas/Habitante
1988	77,434,974	367,723,817	16,353,654	4.96
1994	89,616,946	520,230,064	3,132,901	5.84
1995	91,120,433	365,799,992	-43,233,659 ²	4.00
1996	92,646,700	402,748,600	26,205,621	4.63
1997	94,129,047	525,146,644	79,213,605	6.42
1998	97,329,435	416,215,259	81,138,154	5.11
“Consumo promedio de pilas/habitante para la década de los 90: 1994-1998: 5.11”				

Fuente: Castro y Díaz (2004)

Nota: ¹ El número de habitantes se proyectó a partir de la información presentada en el libro: La Situación Demográfica en México, 1998. CONAPO.

² Según los datos oficiales del INEGI, en 1995 la exportación de estas baterías fue de 57,088,937 piezas, mientras que la importación fue de tan sólo 13,145,330

Por otro lado, Castro y Díaz (2004) realizan el cálculo de pilas alcalinas, de zinc-carbón y de níquel-cadmio consumidas por habitante por año en el periodo 1988-1998 basado en datos de importaciones, exportaciones y producción, consultados en BANCOMEXT y en el INEGI; datos del peso promedio de pilas alcalinas consultado en la PROFECO y número de habitantes por año en México consultado en la CONAPO. Determinan un promedio de consumo por habitante de aproximadamente 5.11 pilas para “la década de los 90” (Cuadro 36). Como no hay datos oficiales sobre la cantidad de pilas que entran de contrabando, Castro y Díaz (2004) compararon el dato que obtuvieron del consumo de pilas, con el reportado en otros países con características de consumo, que consideraron similares a México, como Argentina, España y Estados Unidos, cuyo promedio

aproximado de consumo es de 10 pilas por persona, y asignaron diferencia entre este valor y 5.11 a la venta ilegal: "A partir de la información existente para la década de los 90 en que se calcula un consumo promedio de 10 pilas por habitante (5.11 pilas de origen legal y 4.89 de origen ilegal) "...de las cuales, una de cada 10 corresponde a pilas recargables".

Otros datos generados por Castro y Díaz (2004) son la cantidad de metales "emitidos" en 1997 a causa de las pilas gastadas; en el Cuadro 37 se presenta esta cantidad de metales que son los que contienen las diferentes pilas comercializadas en ese año.

Cuadro 37. Cálculo de emisiones de metales tóxicos en 1997 (toneladas)

Tipo de pila	Pilas Generadas*	Hg	Cd	Ni	MnO ₂	Li
Alcalinas y Zn-C	27,295.0	3	22	-	7,916	-
HgO	47.0	15	-	-	-	-
NiCd	8,265.0	-	1,488	1,653	-	-
Li	76.6	-	-	-	-	7.6
Totales	35,683.6	18	1,510	1,653	7,916	7.6

Fuente: Castro y Díaz, 2004

Notas: *Datos obtenidos de la información disponible en BANCOMEXT y en INEGI

CENICA (2006) realizó una evaluación de la peligrosidad (CRETI) de pilas primarias de varias marcas y tecnologías que se comercializan en México tanto de manera legal como en el mercado informal. Se encontró que todas las marcas analizadas presentaron resultados inferiores a los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-052-SEMARNAT-1993 y, por lo tanto, estos dispositivos no se consideran tóxicos al ambiente. Sin embargo, reportan vestigios de mercurio en el análisis, pero las concentraciones son menores a los límites máximos permisibles.

4.2 Parte experimental

4.2.1 Metodología

A continuación se listan las metas y actividades que se establecieron para determinar la situación en México de las pilas gastadas:

1. Calcular el volumen anual de pilas comercializadas en México con base en la mejor información disponible, estableciendo las cantidades por subpartida arancelaria, tipo y peligrosidad de las pilas.
2. Establecer el número de pilas consumidas anualmente por habitante, discriminando por tipo, tecnología y peligrosidad
3. Determinar las tendencias de consumo.
4. Evaluar la magnitud del aporte de metales de las pilas al ambiente en relación con otras fuentes, para lo cual se debe calcular:
 - a) Volúmenes de pilas comercializadas anualmente
 - b) Porcentaje de uso de las pilas comercializadas
 - c) Contenido de metales en las pilas comercializadas
 - d) Volúmenes de pilas desechadas en la basura
 - e) Aporte de metales de las pilas desechadas en la basura
 - f) Aporte total de metales a la basura y porcentaje de participación de las pilas
5. Establecer las condiciones bajo las cuales los EPT representan un riesgo, con base en:

- a) Determinación de las concentraciones teóricas máximas de metales en lixiviados e investigación de los datos experimentales disponibles
 - b) Identificación de las características de vulnerabilidad de los sitios de disposición y factores de peligro determinantes para que los metales de las pilas representen un riesgo para el ambiente; enfatizando las rutas de transporte.
 - c) Identificación de los mecanismos de atenuación natural de metales en suelos y subsuelo
6. Contrastar los resultados obtenidos en México con los reportados mundialmente, y establecer con base en las rutas de exposición y volúmenes de metales en lixiviados el riesgo potencial, así como proponer opciones de manejo adecuadas

4.2.2 Determinación del volumen anual de pilas comercializadas en México

a) Bases de cálculo

Dado que a partir del año 2000 se dejaron de producir pilas en México (www.bancomext.gob.mx), el cálculo del volumen de dispositivos comercializados legalmente cada año, se planteó realizar, en primer término, con base en la diferencia entre las cifras de importación y las de exportación del Sistema de Información Arancelaria Vía Internet (SIAVI) disponible al público para el periodo del 2003 al 2005.

Para cada año, se restaron los valores del peso importado de pilas menos el exportado y se dividió el resultado entre el número de habitantes de

México en los años respectivos. Para transformar este volumen expresado en unidades de masa a número de pilas, la cantidad obtenida se dividió entre el peso promedio (Ecuación 13).

$$\text{Número de pilas en el mercado legal /habitante/año} = \frac{\text{Importaciones} - \text{Exportaciones}}{\frac{\text{Peso promedio de una pila}}{\text{Número de habitantes}}} \quad \dots\text{Ecuación 13}$$

No obstante los resultados obtenidos no fueron congruentes con los datos internacionales, ni con la situación socioeconómica de México. Los cálculos y datos obtenidos se reportan en el Apéndice 1 en los cuales se observa que el consumo anual de pilas de NiCd es demasiado alto, lo cual permite inferir que los errores se deben principalmente a que el sistema sigue registrando la importación de todo tipo de pilas, incluyendo las que solamente están en tránsito y se utilizan en equipos electrónicos que se venden fuera de México, pero no las contabiliza en sus datos de exportación.

Por lo tanto se volvieron a realizar los cálculos, pero con base en datos aportados directamente por la Secretaría de Economía¹⁵, que corresponden al volumen de pilas registradas en el país para su comercio interno y que no involucran a los dispositivos en tránsito.

Para lo cual se corrigió la ecuación anterior y se obtuvo la Ecuación 14 que se presenta a continuación:

¹⁵ Datos proporcionados por el Lic. Jorge Gordillo, Negociaciones Internacionales, Secretaría de Economía.

$$\text{Número de pilas en el mercado legal /habitante/año} = \frac{\frac{\text{Volumen de pilas registradas SE}}{\text{Peso promedio de una pila}}}{\text{Número de habitantes}} \quad \dots \text{Ecuación 14}$$

Para calcular el volumen de pilas registradas en la Secretaría de Economía (SE) se consideraron las siguientes subpartidas del "Sistema de registro de importaciones y exportaciones", que son parte de las fracciones arancelarias relevantes para el tema en estudio¹⁶. Estas subpartidas corresponden a las pilas portátiles de uso general: 850610 (dióxido de manganeso), 850630 (óxido de mercurio), 850640 (óxido de plata), 850650 (litio), 850660 (zinc-aire), 850730 (níquel-cadmio) y 850680 (las demás pilas y baterías). No se incluyeron las sub-fracciones 850780 (demás acumuladores), 850790 (partes de acumuladores) y 850690 (partes); ya que este estudio no contempla pilas industriales ni baterías automotrices. Todas las subpartidas mencionadas en el párrafo anterior son parte de la partida 8506 ("Pilas y baterías de pilas eléctricas") y de la 8507 ("Acumuladores eléctricos, incluidos sus separadores, aunque sean cuadrados o rectangulares"); que a su vez pertenecen al Capítulo 85 ("Máquinas, aparatos y material eléctrico y sus partes; aparatos de grabación o reproducción de sonido, aparatos de grabación o reproducción de imágenes y sonido en televisión, y las partes y accesorios de estos aparatos").

Las siguientes fracciones que fueron suprimidas por el Decreto publicado el jueves 17 de marzo de 2005 en el Diario Oficial fueron incluidas en los

¹⁶ La selección se basó en la información disponible, pero que no se considera suficiente ya que las descripciones de las fracciones y sus correspondientes subpartidas no permiten dilucidar, con toda certeza y con la especificidad deseada y el tipo de tecnología de las pilas, y tampoco el país en donde se fabricaron.

cálculos del total de pilas de cada sub-partida, ya que hasta 2005 reportan datos de importaciones y exportaciones: 8506.10.01, 8506.10.02, 8506.10.03, 8506.10.04, 8506.10.99, 8506.30.01, 8506.30.02, 8506.30.03, 8506.30.04, 8506.30.99, 8506.40.01, 8506.40.02, 8506.40.03, 8506.40.04, 8506.40.99, 8506.50.01, 8506.50.02, 8506.50.03, 8506.50.04, 8506.50.99, 8506.80.01, 8506.80.02, 8506.80.03, 8506.80.04, 8507.30.01, 8507.30.02, 8507.30.03, 8507.30.04, 8507.30.99.

El peso promedio de las pilas se calculó con base en información nacional e internacional. La Revista del Consumidor (1995) publicó los pesos (masa por unidad) y porcentaje de consumo para cada formato de pilas primarias que se venden en los principales comercios de México (Cuadro 38). Con estos datos se obtiene un peso promedio ponderado de 0.032 kg/unidad, el cual es análogo al calculado por Duracell (Cuadro 49).

Cuadro 38. Peso promedio de pilas primarias PROFECO (1995)

Código ANSI	Porcentaje consumido	Masa por unidad/ kg	Peso promedio/ kg
AA	54.73	0.025	0.014
AAA	18.3	0.010	0.002
C	8.3	0.065	0.005
D	5.33	0.095	0.005
9V	4.17	0.040	0.002
Otros tamaños	9.17	0.050	0.005
Promedio ponderado			0.032

Fuente: (a) y (b) Datos Profeco en Castro y Díaz (2004)

Nota: (*) "Dentro de esta categoría están decenas de tipos de pilas cuyos pesos oscilan de 1 g (como en el caso de las pilas de reloj) a 1,195 gramos (como las pilas de lámparas de mesa), por lo cual se estimó el peso promedio indicado" (Castro y Díaz, 2004).

Cuadro 39. Peso promedio de pilas primarias

Código ANSI	Dimensión/mm	Peso/ kg	%
	Alto x Largo x Ancho		
AAA	45x11x11	0.012	20.16
AA	51x15x15	0.023	60.26
C	50x26x26	0.064	9.14
D	61x33x33	0.141	5.87
9 V	49x18x27	0.045	4.59
Promedio ponderado		0.032	

Fuente. www.duracell.com

Para incluir a las pilas secundarias, se consideró información internacional del peso de las pilas y el porcentaje de consumo (Cuadro 40). Los valores reportados varían de 0.025 a 0.045 kg y el peso promedio ponderado es de 0.032 kg/unidad, que es igual al de las pilas primarias.

Cuadro 40. Peso promedio de pilas secundarias

	Peso de la pila (Kg/unidad)				Promedio ponderado
	NiCd	NiMH(AB ₅)	NiMH(AB ₂)	Li	
Valor mínimo	0.025			0.027	0.025
Valor máximo	0.045	0.02	0.001	0.046	0.045
media	0.032			0.036	0.032
% del consumo	49	25	1	14	

Fuente: Datos calculados con base en Rydh y Svard, 2003

Los datos de población de México utilizados en la ecuación 11, son los reportados en el Sexto Informe de Gobierno (2006), los cuales se basan en datos de los conteos de población realizados en los años 2000 y 2005 (Cuadro 41).

Cuadro 41. Datos de población de México en los periodos de 1994 a 1998 y 2000 a 2006

Año	Población		
	(1)	(2)	(3)
1994	89,616,946		
1995	91,120,433		
1996	92,646,700		
1997	94,129,047		
1998	97,329,435		
2000		98,438.6	
2001		99,715.5	
2002		100,909.4	99,801,615
2003		101,999.6	101,248,942
2004		103,001.9	102,696,269
2005		103,946.9	103,263,388
2006		104,860.0	105,590,923

Fuente: (1) Castro y Díaz, 2004; (2) Anexo del Sexto Informe de Gobierno 2006 reportado en miles de personas (3) INEGI, 2006

Nota INEGI: Al tener exclusivamente los datos del Censo de Población de los años 2000 y 2005, se estimó la población a la mitad de año de los años 2001 al 2004 a partir de una extrapolación de la tendencia poblacional (lineal) de un gráfico de crecimiento de la población con datos de 1990 al 2005.

b) Cálculo de pilas comercializadas anualmente

En el Cuadro 42 se resume la cantidad de pilas que se comercializaron en los años 2000 al 2004. Las pilas están divididas en subpartidas y se reportan en volumen¹⁷ (kg). Además se presentan los porcentajes en volumen de cada subpartida con respecto al volumen total y se les divide con base en dos criterios: a) pilas no peligrosas y peligrosas de acuerdo a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos, y b) pilas primarias (no recargables) y secundarias (recargables).

¹⁷ El término volumen es utilizado en los aranceles para referirse a la cantidad de pilas expresada en unidades de masa, específicamente en kilogramos.

La subpartida denominada "Dióxido de manganeso" incluye las pilas de zinc-manganeso (Zn-Mn) y las de zinc-carbón (Zn-C), que a nivel mundial son las de mayor venta- Como los registros aduanales no especifican los porcentajes que corresponden a cada tipo, se utilizaron los datos de Fisher (2006), que informa que el 76.3% de la subpartida "Dióxido de manganeso" corresponde a pilas de Zn-Mn y el 23.7% a las de Zn-C.

Cuadro 42. Porcentaje promedio de cada tipo de pilas comercializadas en México en el periodo de 2000 a 2004 (Secretaría de Economía, 2007)

Sub partida	Tipo de pila	Descripción	Año					
			2000		2001		2002	
			volumen (kg)	(%)	volumen (kg)	(%)	volumen (kg)	(%)
850610	Primaria	dióxido de manganeso	15,168,474	71.99	13,053,020	60.11	16,496,435	66.25
850650	Primaria	litio	106,402	0.51	180,031	0.83	177,211	0.71
850660	Primaria	aire-cinc	463,384	2.20	23,282	0.11	6,652	0.03
850680	Primaria	"Las demás pilas y baterías de pilas"	2,731,382	12.96	4,514,221	20.79	5,638,772	22.65
		Suma de pilas "no peligrosas"	18,469,642	87.66	17,770,554	81.83	22,412,410	89.63
850640	Primaria	óxido de plata	39,293	0.19	52,595	0.24	93,340	0.37
850630	Primaria	óxido de mercurio	15,989	0.08	44,372	0.20	29,173	0.12
850730	Secundaria	níquel-cadmio	2,544,410	12.08	3,847,691	17.72	2,458,533	9.87
		Suma de pilas "peligrosas"	2,599,692	12.34	3,944,658	18.17	2,581,046	10.37
		TOTAL	21,069,334	100	21,715,212	100	24,900,116	100
		Pilas primarias	18,524,924	87.9	17,867,521	82	22,441,583	90.1
		Pilas secundarias	2,544,410	12.1	3,847,691	18	2,458,533	9.9

Cuadro 42 (cont.). Porcentaje promedio de cada tipo de pilas comercializadas en México en el periodo de 2000 a 2004 (Secretaría de Economía, 2007)

Sub partida	Tipo de pila	Descripción	Año			
			2003		2004	
			volumen (kg)	(%)	volumen (kg)	(%)
850610	Primarias	dióxido de manganeso	20,613,245	68.87	21,384,808	73.54
850650	Primarias	litio	247,659	0.83	327,373	1.13
850660	Primarias	aire-cinc	82,698	0.28	34,326	0.12
850680	Primarias	"Las demás pilas y baterías de pilas"	7,228,307	24.15	5,555,184	19.10
	Primarias	Suma de pilas "no peligrosas"	28,224,244	94.13	27,344,045	93.89
850640	Primarias	óxido de plata	52,335	0.17	42,354	0.15
850630	Primarias	óxido de mercurio	28,305	0.09	148,129	0.51
850730	Secundarias	níquel-cadmio	1,677,623	5.61	1,586,692	5.46
		Suma de pilas "peligrosas"	1,758,263	5.87	1,777,175	6.11
TOTAL			29,930,172	100	29,078,866	100
primarias			28,252,549	94.4	27,492,174	94.5
secundarias			1,677,623	5.6	1,586,692	5.5

Las pilas primarias ocupan del 82 al 94.5% del total y, por su tecnología, las más importantes son las de dióxido de manganeso (Zn-Mn y Zn-C), ya que del 60 al 74 % del mercado corresponde a este tipo. El consumo de pilas portátiles clasificadas en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos como peligrosas¹⁸ fue en 2004 de únicamente un 6% del mercado total.

En el Cuadro 43 se muestra un resumen de todos los datos obtenidos, incluyendo el número de unidades totales anuales por tipos, y las cantidades totales de pilas por habitante al año en peso y unidades, así como por tipo.

¹⁸ Cabe mencionar que no se incluyeron las pilas portátiles de plomo-ácido en esta investigación, ya que su registro en las fracciones arancelarias no es claro y como sus usos son muy restringidos, puede suponerse prácticamente que no se consumen en el país.

Cuadro 43. Estadística de las pilas comercializadas en el periodo 2000 al 2004 (Secretaría de Economía, 2007)

	Año				
	2000	2001	2002	2003	2004
total de pilas en kg/año	21,069,334	21,715,212	24,900,116	29,930,172	29,078,866
total de pilas peligrosas en kg/año	2,560,399	3,892,063	2,487,706	1,705,928	1,734,821
total de pilas no peligrosas en kg/año	18,508,935	17,823,149	22,412,410	28,224,244	27,344,045
peso promedio de pilas (kg)	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
número de habitantes en México (**)	98,438,600	99,715,500	100,909,400	101,999,558	103,001,871
g de pilas /habitante/año	214	218	247	293	282
g de pilas peligrosas /habitante/año	26	39	25	17	17
g de pilas no peligrosas /habitante/año	188	179	222	277	265
total de pilas en unidades/año	658,416,688	678,600,375	778,128,625	935,317,875	908,714,563
número de pilas totales /hab/año	6.7	6.8	7.7	9.2	8.8
número de pilas peligrosas/hab/año	0.8	1.2	0.8	0.5	0.5
número de pilas no peligrosas/hab/año	5.9	5.6	6.9	8.6	8.3

Fuente: Secretaría de Economía (2007)

(**) Fuentes: Anexo del Sexto Informe de Gobierno 2006. Con base en estimaciones del Consejo Nacional de Población, con base en la actualización de las estimaciones de población de México y de cada entidad federativa.

El número y peso de las pilas comercializadas en México en el periodo 2000 a 2004 por habitante, varía de 214 a 293 g/persona/año y en unidades de 6.7 a 8.8 pilas. Estas cifras son congruentes con los valores informados en el Capítulo 2 para países de ingresos bajos de la Unión Europea (5 a 9), EEUUA (10 a 12), Japón (13) y países de Latinoamérica como Chile (7 a 9.2) y Argentina (10). En el Cuadro 44 se presenta una comparación de los valores promedio de pilas comercializadas anualmente en México con los de otros países y se incluyen datos de cuantas pilas comercializadas se usan anualmente en UE y EEUUA. Las cantidades usadas son siempre menores a las comercializadas, pues hay un porcentaje que se almacena ("stock") en los comercios, servicios y casas habitación. Aunque no hay datos informados en México se puede suponer que el porcentaje es similar al de Europa y EEUUA, en donde se usan entre el 73 y 85 % de las pilas que se venden.

Cuadro 44. Comparación del número de pilas vendidas y utilizadas por habitante anual en México y otros países

	UE	EEUUA	Japón	México
Volumen en gramos de pilas/persona/año	250 a 425	352	416	282
Número de pilas promedio vendidas /persona/año	13	11	13	9
Número de pilas promedio usadas/persona/año	11	8	ND	NR

Fuentes: Secretaría de Economía, 2007, <http://web-japan.org/stat/stats/01CEN21.html>, www.stat.go.jp/English/data/handbook/c02cont.htm; <http://www.epa.gov/garbage/battery.htm>; quickfacts.census.gov/qfd/states/00000.html

ND. No disponible en las fuentes consultadas
NR. No reportado en ningún documento publicado

En la Figura 43 se observa una tendencia positiva en **el consumo de pilas no peligrosas en México, que tiende a aumentar en los próximos años** en forma similar a lo reportado en UE, EEUUA, Japón y otros países (ver Capítulo 2). **Las pilas de mayor consumo en el mundo y en México (Zn-Mn y Zn-C), no están clasificadas como peligrosas y son recargables.**

En la Figura 44 se observa la gran diferencia en el número de pilas no peligrosas por habitante en relación a las peligrosas.

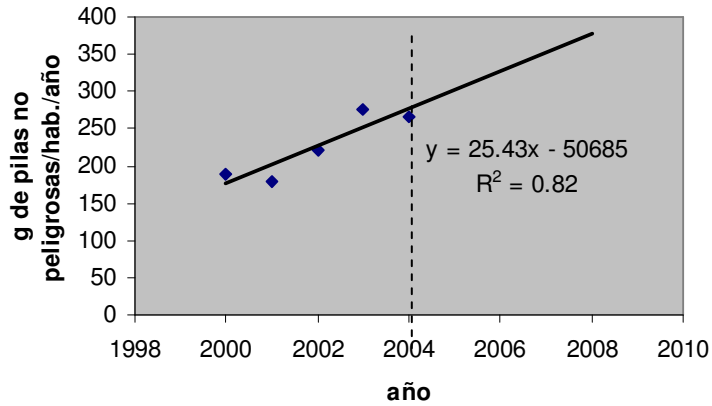


Figura 43. Tendencia en el consumo de pilas no peligrosas en México basada en datos del periodo 2000-2004 (Secretaría de Economía, 2007)

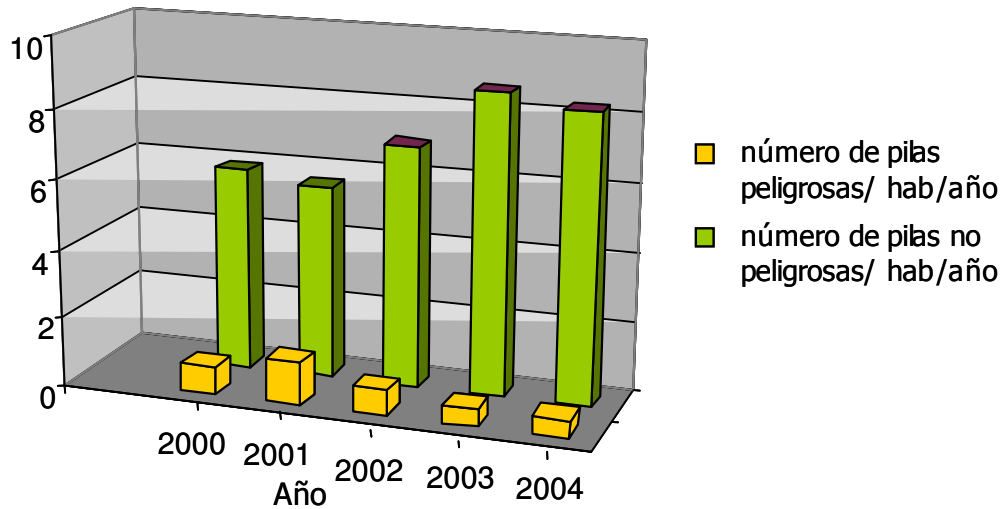


Figura 44. Comparación entre el número de pilas peligrosas y no peligrosas comercializadas por habitante del año 2000 al 2004 (Secretaría de Economía, 2007)

En la Figura 45, se presentan los porcentajes de comercialización de cada tipo de pilas, y también queda de manifiesto que los de las pilas de níquel-cadmio (NiCd), de óxido de plata y de óxido de mercurio (peligrosas) son notablemente más bajos que el de pilas no peligrosas de la subpartida "dióxido de manganeso", inclusive incluyendo la subpartida 850680 "las demás pilas y baterías de pilas" que posiblemente incluye baterías industriales.

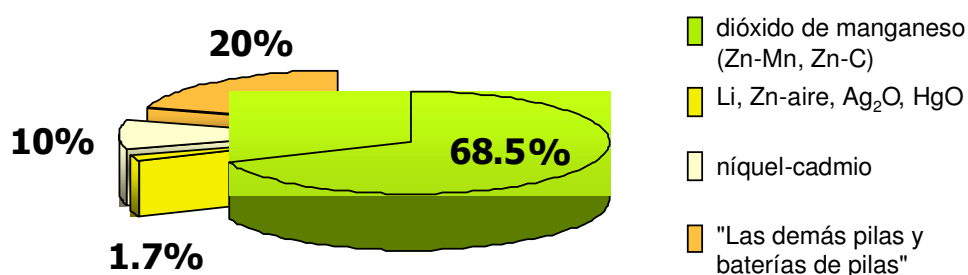
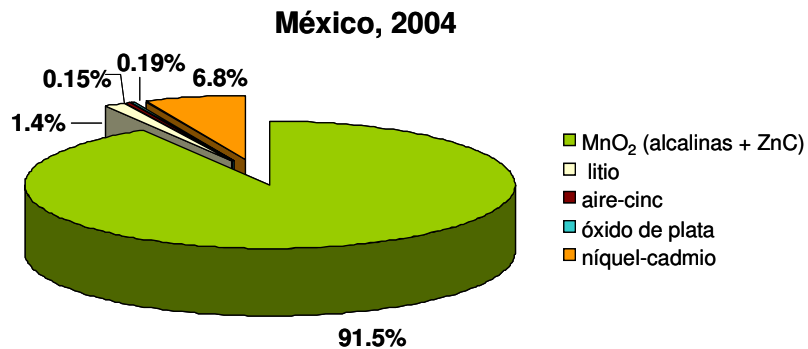
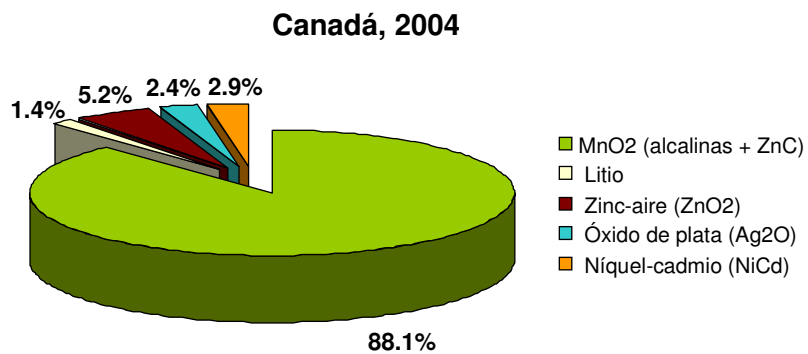


Figura 45. Distribución del tipo de pilas comercializadas en México, incluyendo la subpartida 850680 "las demás pilas y baterías de pilas" (porcentaje de los volúmenes promedio del periodo 2000-2004)

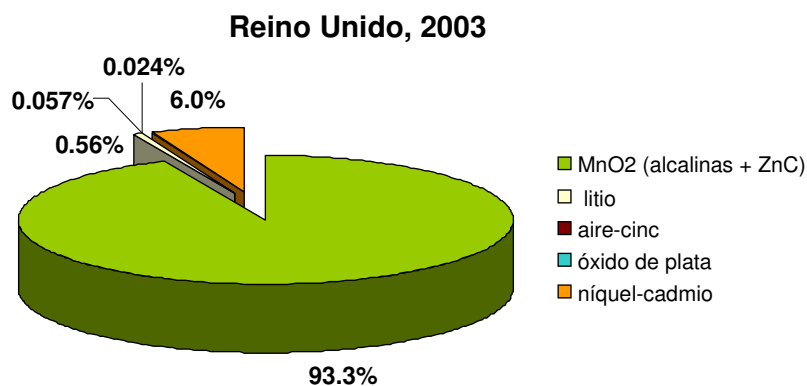
La distribución de las pilas primarias y secundarias en México, Reino Unido y Canadá, que se presenta en la Figura 46, son similares y en todas ellas se observa que el porcentaje de pilas portátiles no recargables de Zn-Mn y Zn-C (subpartida de "Dióxido de manganeso") clasificadas como no peligrosas representan entre el 88.1 y 93.3% del mercado.



Fuente: Secretaría de Economía, 2007



Fuente: RIS International Ltd., 2007



Fuente: Fisher, 2006

Figura 46. Distribución de los porcentajes promedio de venta de pilas en la Unión Europea y en México en el periodo 2000-2004.

Nota: Se incluyen únicamente los tipos de pilas que aparecen en las tres fuentes consultadas, por lo que para México se excluye la subpartida 850680 "las demás pilas y baterías de pilas".

c) Mercado de pilas clasificadas como peligrosas

NiCd, AgO y Pb-ácidas

Las pilas que contienen elementos clasificados como peligrosos son las de NiCd, AgO, Pb-ácidas y HgO. La demanda de pilas de NiCd a nivel mundial está disminuyendo, ya que el mercado de las pilas de NiMH y litio está aumentado (ver Capítulo 2), y en México se observa la misma tendencia (Figura 47). En esta figura se puede observar claramente la disminución del volumen comercializado de pilas de NiCd y, en consecuencia, de las peligrosas ya que la mayor proporción de las pilas peligrosas corresponde a este tipo, mientras que las pilas de Ag₂O y HgO ocupan una mínima proporción del mercado (0.22 y 0.21% respectivamente).

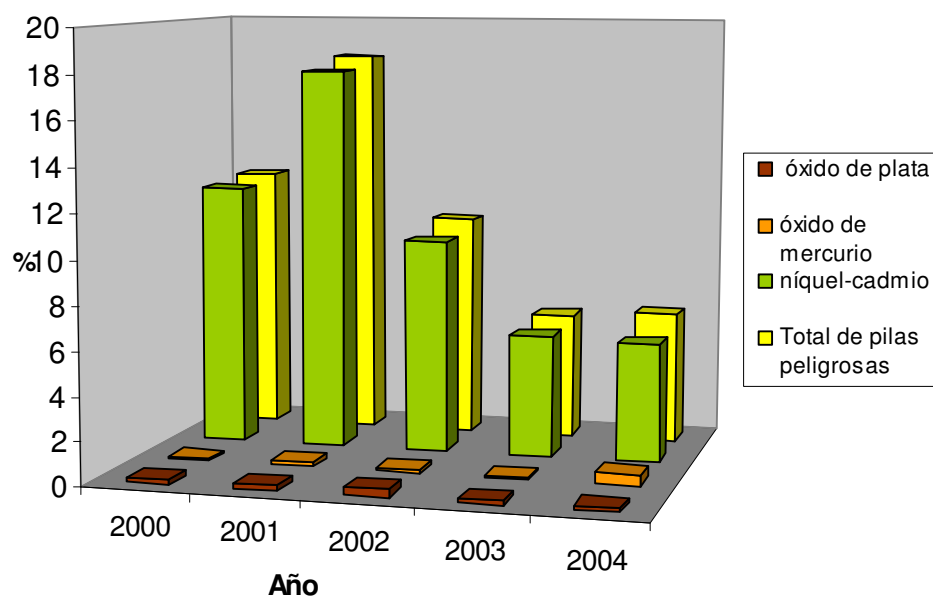


Figura 47. Tendencia del porcentaje de pilas de NiCd, Ag₂O y HgO comercializadas en México del año 2000 al 2004 (Fuente: Secretaría de Economía)

En la Figura 48, se presenta **la tendencia en el consumo de pilas NiCd hasta el año 2010**, basados en datos del periodo de 2001 a 2004, la cual indica que la demanda va a disminuir en forma similar a lo reportado para la Unión Europea, EEUA, Japón y otros países (ver Capítulo 2). Esta disminución se debe a la implementación en muchos países, como es el caso de la Unión Europea, de normas y lineamientos ambientales que tienden a la prohibición total a corto plazo de este tipo de pilas, a la variabilidad de los precios del Cd y al surgimiento de nuevas tecnologías altamente competitivas como son las de Ni-MH y litio (ver Capítulo 2).

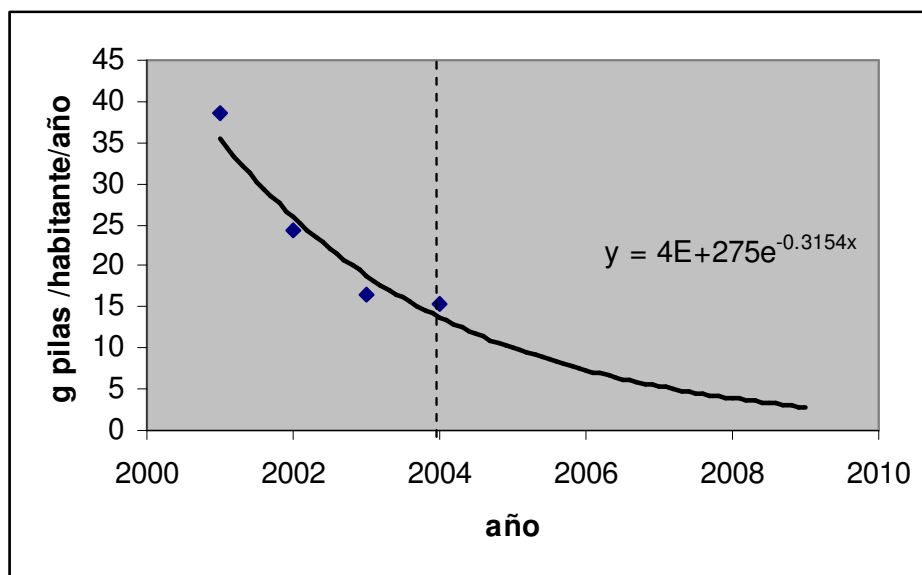


Figura 48. Tendencia en el consumo de pilas NiCd (peligrosas) en México basadas en datos del 2001 al 2004 (Secretaría de Economía, 2007)

Las pilas de óxido de plata no representan un riesgo para el ambiente, pues el volumen comercializado es muy bajo y por su contenido de un metal fácilmente recuperable y con valor en el mercado, difícilmente se

arrojan a la basura. Los relojeros que cambian las pilas y los centros comerciales que ofrecen ese servicio las recolectan para la recuperación de este metal (Bolaños-Berruecos, 2004).

En estos estudios no se reportan datos de las pilas portátiles de Pb-ácido, que principalmente se utilizan en juguetes, ya que no hay una subpartida específica para este tipo de pilas y lo más posible es que se registren conjuntamente con las baterías automotrices, ya que ambas contienen plomo y ácido sulfúrico. Sin embargo, su participación en el mercado debe ser muy limitado, pues en otros países se reportan cifras muy bajas, como es el caso de Canadá, donde para el año 2004 se reporta un porcentaje de 0.243% del total de ventas anuales (RIS Internacional LTD, 2007); y son menos peligrosas que las de mercurio, pues en el ambiente forman sulfato de plomo (medio ácidos) o carbonatos de plomo (medio alcalino) que son insolubles.

Pilas de HgO

Las pilas de óxido de mercurio contienen mercurio adicionado con el fin de aumentar su vida útil y controlar la corrosión, y cuando se desechan en la basura este elemento puede formar compuestos volátiles. Sin embargo desde hace más de una década este tipo de pilas, menos en las de botón, están prácticamente prohibidas en todo el mundo¹⁹ y se limita la concentración de mercurio a los vestigios presentes como impureza en las materias primas, como es el caso del polvo de zinc. Los límites que se han

¹⁹ No obstante, la NRDC (2004) informa que China vendió al menos hasta 2003 pilas de mercurio a países miembros de la CEE, Canadá, Suiza, EEUA etc., aunque no especifica si son de botón

impuesto son muy estrictos, pues en general la concentración máxima permisible es de 0.0005% (capítulo 2) lo que ha llevado a una disminución rápida de la concentración de mercurio en los desechos. Incluso en la Unión Europea en 2008 entrará en vigor la Directiva 2006/66 que prohíbe el comercio de pilas de botón de mercurio y se proyecta que, para el 2010, estos dispositivos estarán completamente eliminados del mercado (Labouze y Monier 2003).

Sin embargo, las restricciones no son universales, pues en países con bajos ingresos *per capita* que son consumidores de objetos electrónicos baratos, se comercializan pilas de bajo precio que contienen mercurio adicionado.

Pilas importadas legalmente

En México se importan pilas con mercurio que quedan registradas en la subpartida arancelaria 850630, denominada "óxido de mercurio". El porcentaje que representan las pilas de esta sub-partida respecto a otras tecnologías como las alcalinas y Zn-C, es de 0.2 % del mercado y agrupa a diferentes tipos que se muestran en el Cuadro 45.

Cuadro 45. Tipos, volúmenes y porcentajes de las pilas de la subpartida 850620 "óxido de mercurio" (2004)

Frac. arancelaria	Tipo	kg	%
85063001	"botón para sordera"	4.00	0.0003
85063002	"secas rectangulares"	395.00	0.03
85063003	"secas cilíndricas"	37,385.00	2.45
85063004	"alcalinas que no están incluidas en las fracciones anteriores"	1,387,136.00	90.90
85063005	"óxido de mercurio"	0.00	0.00
85063099	"las demás"	101,077.00	6.62
	TOTAL	1,525,997.00	100.00

Fuente: Secretaría de Economía (2007)

De acuerdo a los datos del Cuadro 45, la mayor parte de las pilas de la subpartida "óxido de mercurio", corresponden al tipo alcalino (90.9%), mientras que el porcentaje de pilas de botón es bajo o nulo²⁰. La descripción técnica de la subpartida 850630 es muy limitada, solamente aparecen registrados los países de procedencia, pero posiblemente no son sino eslabones de la cadena comercial, pues son sitios con un bajo desarrollo industrial, como Bután.

Las pilas alcalinas registradas en la partida de "óxido de mercurio" no son fabricadas por las empresas con prestigio del ramo, pues de acuerdo a la información de Amexpilas las empresas que venden las pilas importadas de marcas reconocidas solamente comercializan pilas de mercurio de tipo botón. Por lo tanto, posiblemente corresponden a las que se conocen

²⁰ Es importante hacer notar que en China se refieren a las pilas alcalinas cilíndricas tipo pasta y alcalinas tipo papel o cartón, como "pilas alcalinas", por lo que es posible que estas pilas no solamente sean registradas en el arancel "pilas alcalinas" de la subpartida "óxido de mercurio", sino que también pueden ser anotadas en otras subpartidas arancelarias, como la de "óxido de manganeso" que incluye pilas alcalinas de ZnMn.

como “de imitación”, (*fake*), clonadas, marca patito, piratas, etc. y no cumplen con estándares de calidad, por lo que su distribución básicamente se lleva a cabo a través del comercio informal.

El precio de estas pilas reportado en la aduana de México es muy bajo, por lo que es muy probable que provengan de China, importante productor de pilas de mercurio que ofrece precios muy económicos. El costo de una pila alcalina de tipo papel (o cartón) en China es de 1 yuan (1.40 pesos), que aproximadamente corresponde a 1/5 del valor de las pilas de marcas reconocidas que no contienen mercurio adicionado (NRDC, 2004). Asimismo esta misma fuente informa que cerca del 80% de las pilas de este tipo se exportan a países en desarrollo. De acuerdo a los datos de la Secretaría de Economía, el precio de las pilas de “óxido de mercurio” varía de 1.2 a 1.6 pesos/unidad, que es similar al reportado por NRDC (*ibidem*) (Cuadro 46).

Cuadro 46. Precios por unidad de las pilas registradas en la subpartida “óxido de mercurio”

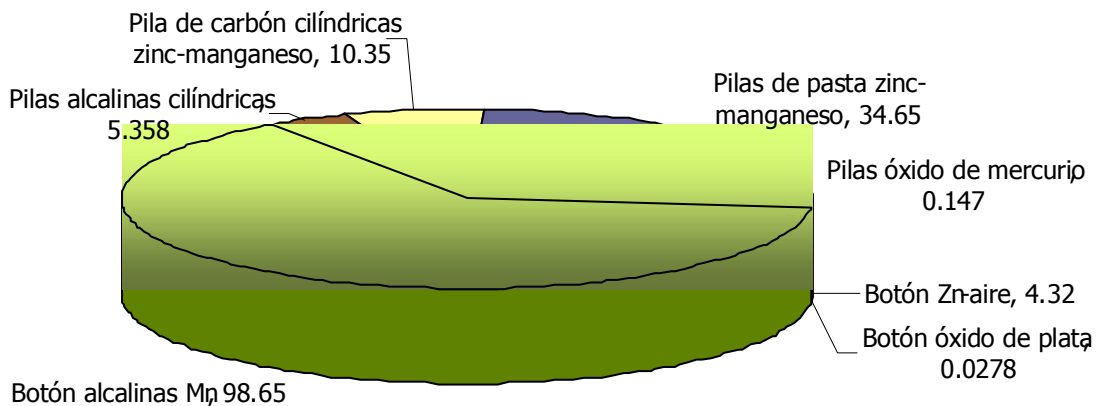
año	volúmenes importados	kg	número	dlls.	\$ mex/dlls	\$ mex/pila
2002	126,281.00	29,173.00	911,656	0.14	11.5	1.6
2003	91,766.00	28,305.00	884,531	0.10	11.5	1.2

Fuente: Secretaría de Economía (2007)

En China se fabrican 7 tipos de pilas que contienen mercurio: 1) pilas cilíndricas de alcalinas tipo pasta; 2) pilas cilíndricas de Zn-Mn tipo cartón; 3) alcalinas cilíndricas, 4) Ag₂O de botón; 5) Zn-aire de botón; 6) alcalinas de botón; y 7) HgO de botón y también de formatos de mayor tamaño. De

todas ellas las que más se elaboran en mayor cantidad son las de tipo pasta y las alcalinas de botón y, en consecuencia, son las que consumen mayor cantidad de mercurio durante su fabricación (Figura 49).

Debido a la presión de los mercados externos, China está restringiendo el uso de mercurio, por lo que es posible que la calidad de las pilas aumente en los próximos años, pero proporcionalmente también el costo será mayor. Sin embargo, dado el gran mercado de pilas baratas, si no hay cambios tecnológicos importantes que reduzcan el precio de las pilas de calidad, algún otro país del sureste asiático ocupará el nicho de mercado y fabricará dispositivos con mercurio.



Total: 153.5 toneladas de mercurio

Figura 49. Tipos de pilas fabricadas en China que contienen mercurio adicionado, indicando las toneladas de este elemento utilizadas para su fabricación (NRDC, 2004)

Pilas de contrabando

En el comercio informal de México se venden pilas de muy bajo precio denominadas “de imitación”. De acuerdo a un artículo del Periódico Reforma (2007) su venta se concentra en ciudades importantes del país, como el D.F., Monterrey, Toluca, etc. y las de mayor venta son primarias alcalinas de formato AA y AAA. Es posible que en forma similar a lo que sucede en muchos otros países económicamente no desarrollados, en estos centros informales de distribución no solamente se vendan pilas baratas importadas legalmente, sino que una parte sean de contrabando.

Dado que las pilas baratas pueden contener mercurio y su vida útil es muy corta, son un factor importante a considerar para evaluar las afectaciones al ambiente asociadas a su manejo en la fase de post-consumo. Además hay que considerar que son fuente de riesgo importantes durante su uso, pues se han reportado accidentes especialmente por su uso de teléfonos celulares, como es el caso de Malasia donde 11 niños sufrieron quemaduras ([www.battery digest.com](http://www.batterydigest.com)).

Inclusive las pilas de botón, sean de imitación o no, también representan un riesgo, pues hay numerosos reportes de niños que las ingieren accidentalmente²¹. El daño no está asociado al óxido de mercurio, pues afortunadamente por la acción del ácido gástrico y el hierro de la cubierta se convierte en mercurio elemental insoluble, sino a la basicidad pues se

²¹ “La ingestión de estas baterías se ha constituido en un problema de salud con una elevada morbilidad. Como ejemplo, en los EUA se informa cada año un número superior a 2500 ingestiones, con un incremento anual de 24%. Del total de ingestiones, más de 90% ocurren en niños, principalmente en menores de cinco años, con un discreto predominio de los hombres sobre las mujeres. Casi el 90% de las baterías ingeridas pasan al estómago sin incidentes, el 10% restante puede impactarse en cual quiera de las tres estrecheces anatómicas del esófago. El niño puede encontrarse asintomático o presentar síntomas relacionados con su acción corrosiva en la mucosa digestiva”.

estima que en 48 horas una pila de mercurio puede generar 1 mL de NaOH al 13%, cantidad suficiente para erosionar todas las paredes del esófago (www.drscope.com).

No se conoce el tamaño del mercado de las pilas de imitación en México, y no es fácil medirlo pues no existen datos sobre el porcentaje que pilas que se introducen ilegalmente. Castro y Díaz (2004) calcularon, como ya se comentó, 5.11 legales y 4.8 pilas ilegales, lo cual implica que el 49% del mercado es de contrabando. Esta cifra posiblemente se ajustó al 40% que aparece en el Convenio de Concertación Semarnat- Amexpilas y Concamin (2006)-. Sin embargo, cuando se compara este dato con los informados por Energizer en Muruglath C. (2003), compañía que realizó estudios en Malasia, -que es un país con una población de bajos recursos y un mercado informal son comparables con los de México-, resulta exageradamente alta. Esta empresa informa que las pilas de imitación representan para esa compañía la pérdida en el sureste asiático del 8% de sus ventas; por lo que considerando que detenta el 70% del total del mercado de esta región; se puede suponer que el mercado de pilas de imitación no es mayor al 11% de las ventas legales.

Dado que en los registros oficiales de México aparece que se importan pilas de bajo precio que seguramente surten el mercado de imitación, el contrabando debe ser menor al 11%. Para poder confirmar esta cifra se trató de determinar indirectamente la cantidad de pilas de contrabando de pilas chinas de HgO, para lo cual se buscó información en China sobre las exportaciones a México para compararlas con las registradas por la aduana de México. Sin embargo, las cifras oficiales de exportaciones China presentan serias incongruencias con las de ingreso de los países que las

reciben: a) 35 países reportan la entrada legal de pilas de HgO procedentes de China mientras que ese país reporta que exporta pilas a 8, y b) Las cifras oficiales de China indican que los productos exportados en 2004 contenían 0.147 toneladas de mercurio, mientras que los países importadores reportan un volumen de 146 toneladas (NRDC, 2004). .

En el caso de México, NRDC (2004) reporta que las fuentes oficiales consultadas por los investigadores que elaboraron el estudio, indicaron que en se importaron de China 1,203,914.101 ton. de pilas de óxido de mercurio (datos oficiales), lo que equivale aproximadamente a 37,622,315,656 unidades, la cual es una cantidad fuera de toda proporción. Los investigadores, basándose en el valor en dólares que informó México, que fue de \$550,927 y es similar al reportado por EEUUA, le asignaron un valor análogo de importación de ese país que fue de 3.4 millones de pilas de HgO (Cuadro 47). Con base en los datos de la Secretaría de Economía (2007) en 2004 se importaron 4.6 millones de pilas de HgO, cifra que es coherente con la reportada por NRDC (2004) pero mayor.

El gobierno de China explica las diferencias entre los datos de los países importadores y su aduana, como una consecuencia de la maquila ya que no queda registrada como exportación nacional (NRCD 2004).

Cuadro 47. Pilas importadas de China en 2004

país	precio total	# de pilas	precio unitario	
	dólares		dólares	pesos
Mauritania	\$ 2,597.00	1,147	2.26	24.91
Uganda	\$ 65,472.00	58,600	1.12	12.29
Malta	\$ 5,667.00	20,473	0.28	3.04
Canadá	\$ 1,752,816.00	7,752,924	0.23	2.49
Japan	\$ 12,006.00	56,342	0.21	2.34
USA	\$ 541,274.00	3,398,197	0.16	1.75
Sudafrica	\$ 278,388.00	2,460,226	0.11	1.24
Yemen	\$ 14,284.00	250,800	0.06	0.63
Holanda	\$ 43,553.00	787,778	0.06	0.61
Hong Kong	\$ 318,333.00	5,759,896	0.06	0.61
México ⁽¹⁾	\$ 550,927.00	3,400,000	0.16	1.78
México ⁽¹⁾	\$ 550,927.00	1,203,914,101	0.00	0.01
México ⁽²⁾	\$ 104,071.00	4,629,031	0.02	0.25
México ⁽³⁾	\$ 12,401,884	47,687,406	0.26	2.86

Fuente: www.chemunep.ch/MERCURY

(1) Datos informados por México a la UNEP, pero de los cuales se hace el siguiente comentario: "Dado que el peso informado por México es tan extraordinario, se considera que es un error y no se incluyó en Apéndice1. Sin embargo para no eliminar a México, y considerando que el precio total de las pilas de HgO importadas en 2004 es de 500,000.00 dls muy similar al de EEUUA, se le asignó una cantidad de 3 400 000 pilas"

(2) Datos de la Secretaría de Economía para la subpartida "óxido de mercurio" (2007). No en todas aparece China como país de origen

(3) Datos de Siavi (2007) para la subpartida "óxido de mercurio" (2007). No en todas aparece China como país de origen

En la Figura 50 se presentan en forma grafica los países de origen de las pilas de la sub-partida "óxido de mercurio" y el porcentaje que corresponde a cada país. Como se puede observar la cantidad importada de Asia es constante y considerando que China maquila muchas pilas, es posible que casi todas las que se importante de esa región e inclusive a través de EEUUA hayan sido fabricadas en ese país.

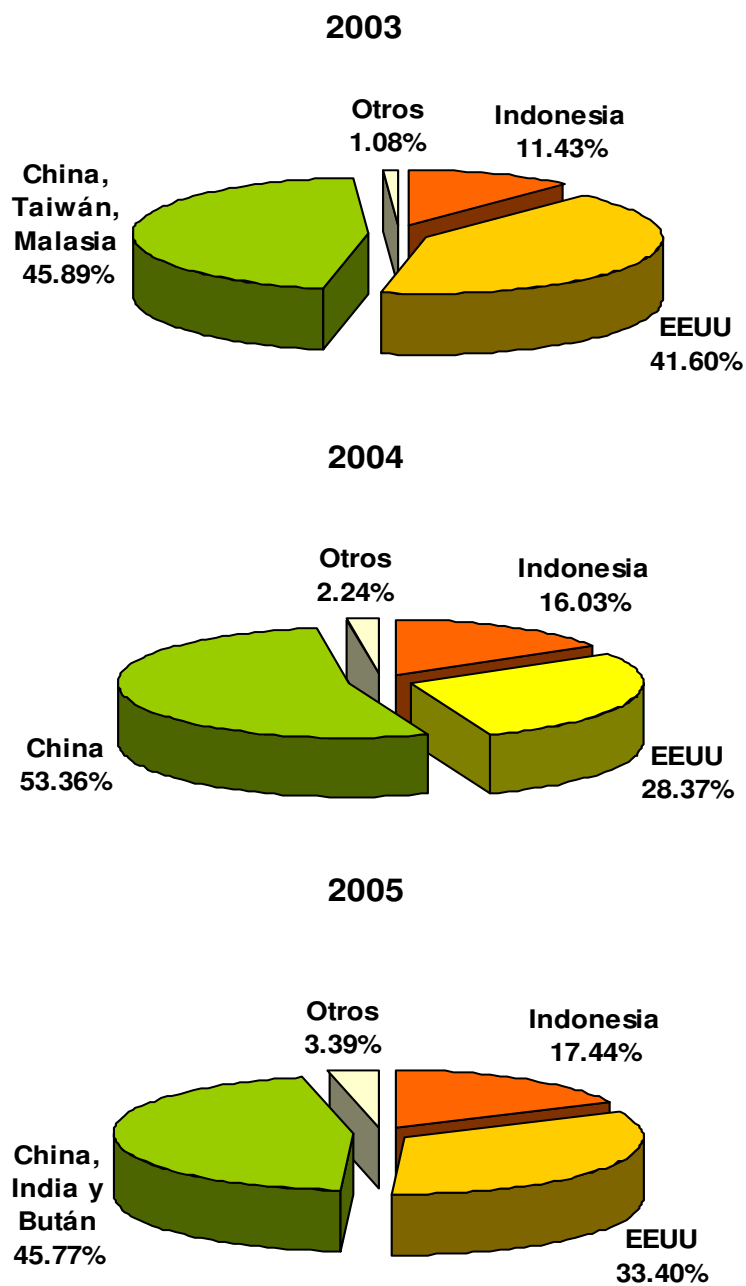


Figura 50. Países de origen de las pilas importadas por México de 2003 a 2005 reportados en la sub-partida "óxido de mercurio (Fuente: SIAVI, 2006)

4.2.3 Aporte de metales contenidos en las pilas a los Desechos Sólidos Municipales

a) Bases de cálculo

En primer término, se utilizaron los datos de los volúmenes de pilas que se comercializan legalmente en México (Cuadro 37) y se les aumentaron las pilas que posiblemente entren de contrabando, para lo cual se utilizó el factor de 11 %:

$$PC_{(\text{legales} + \text{ilegales})} = [PT_{\text{legales}} * 1.11]$$

Como ya se comentó, parte de las pilas comercializadas no son utilizadas y se guardan como "stock" en comercios, casas y otros servicios; por lo cual se aplica un factor del 7%, que es un valor muy conservador ya que es mucho menor al intervalo de 15 a 27% que se calculó comparando los datos de venta contra las de uso de EEUUA y de la Unión Europea (Cuadro 45).

$$PT_{(\text{legales} + \text{ilegales} - \text{no usadas})} = PC_{(\text{legales} + \text{ilegales})} [1 - 0.07]$$

No todas las pilas usadas una vez que se agotan se envían a disposición final (basureros o rellenos sanitarios), pues los usuarios acostumbran a guardarlas. Dado que en México no hay datos sobre el porcentaje de guardado de las pilas gastadas en hogares y servicios, se utilizaron cifras determinadas en la Unión Europea, en donde el almacenaje varía de un 27% a 62% del total, con un valor promedio de 37% (Labouze y Monier

2003). Se manejó el valor promedio de 37% pero considerando que el 62% puede ser más representativo para México, ya que en países donde no hay recolecta especial ni hay sistemas de reciclado, la población tiende a almacenar mayores cantidades; se estableció adicionalmente otro escenario en el que se utiliza este valor.

Escenario 1:

$$PT_{\text{desechadas en la basura (a)}} = PT_{(\text{legales} + \text{ilegales} - \text{no usadas})} \quad (1- 0.37)$$

Escenario 2:

$$PT_{\text{desechadas en la basura (b)}} = PT_{(\text{legales} + \text{ilegales} - \text{no usadas})} \quad (1- 0.62)$$

En ambos escenarios se consideró una vida útil máxima de un año, que es un dato extremadamente conservador. No se aplicaron factores de retardo considerando que las pilas secundarias tienen vidas útiles mucho mayores a la considerada, -por ejemplo en el caso de las pilas secundarias (NiCd) varía de 3 a 6 años (Cuadros 48 y 49)-, pues no se tienen datos de los volúmenes comercializados en la década de 1990 y no se pudieron extrapolar a partir de los datos del 2000 al 2004, ya que el comportamiento del mercado de las pilas secundarias en este periodo fue diferente pues no se habían popularizado las pilas de NiMH y litio.

Cuadro 48. Ciclos de vida útil de las pilas secundarias

Tipo de pilas	Número de ciclos de vida	
	Noréus, 2000	SAFT, 2000
NiCd	1 000	2 000
NiMH	1 500	1 500
Pb-ácidas	500	N.R.

Cuadro 49. Periodos de uso promedio de pilas de NiCd

Productos	Tiempo (años)
Teléfonos celulares	3
Herramientas inalámbricas	6
Húmedas industriales	17
Fuentes eléctricas de emergencia, computadoras portátiles, electrónicos y otros	5

Fuente: Hawkins, R., *et al.*, 2006

b) Volúmenes y composición de la basura

Los volúmenes de basura se requieren para determinar cuántas pilas por tonelada se están depositando en rellenos sanitarios y basureros. Los volúmenes y características de la basura dependen de las condiciones socio-económicas propias de cada país, e inclusive se ven influidos por los factores ambientales. Entre mayor sea la cantidad de basura que se genera y su contenido de materia orgánica menor, el desarrollo de la economía de consumo es más importante. En el Cuadro 50 se muestra la cantidad de basura que se genera en el país anualmente, además de la cantidad diaria de basura por habitante. En el Cuadro 51 se comparan los datos de México con otros países.

Cuadro 50. Generación de basura en México

Año	Población (miles de habitantes)	Generación de basura		Cita
		Anual (miles de toneladas)	Diaria por habitante (kg)	
2000	98,438.6	30,733	0.86	(a)
2001	99,715.5	31,489	0.87	(a)
2002	100,909.4	32,174	0.87	(a)
2003	101,999.6	32,916	0.88	(a)
2004	103,002	34,603	1.00	(a)
2004	105,350	34,600	0.90	(b)
2005	106,452	35,370	0.91	(b)
2010	111,614	39,100	0.96	(b)
2015	116,345	42,890	1.01	(b)
2020	120,639	46,700	1.06	(b)

Fuente: (a) Sexto Informe de Gobierno (2006) y www.ine.gob.mx (b) Proyecciones de Población 2000-2050 Conapo, México (2003)

Cuadro 51. Generación de basura por habitante en diversos países (año 2000)

País	Ton/hab/año	Kg/hab/día
México	0.31	0.85
EEUU	1.14	3.12
Canadá	0.49	1.34
Guatemala	0.22	0.60
Argentina	0.28	0.77
Europa del Norte	0.64	1.75
Europa del Sur	0.52	1.42
Europa Occidental	0.56	1.53

Fuente: Sharma, 2006

Como se observa en la información anterior, en México se produce menos de 1 kg/habitante/año, mientras que en EEUA es mayor a 3 kg/habitante/año. En el Cuadro 52 se describe la composición típica de la basura en México. La humedad es aproximadamente del 40% en peso²².

²² Comunicación personal: Ingeniería y Desarrollo Sustentable, 2007

Cuadro 52. Composición de la basura en México en los años 2000 a 2004 (miles de toneladas)

Tipo de basura	2000	2001	2002	2003	2004
Papel, cartón, productos de papel	4,324	4,430	4,527	4,909	5,160
Textiles	458	469	479	495	520
Plásticos	1,346	1,379	1,409	2,013	2,116
Vidrios	1,813	1,858	1,898	2,158	2,210
Aluminio	492	504	515	587	606
Ferrosos	247	253	259	283	329
Otros ferrosos ¹	152	156	159	178	225
Basura de comida, de jardines y materiales orgánicos similares	16,104	16,500	16,859	16,590	17,441
Otro tipo de basura (residuos finos, pañal desechable, etc.)	5,796	5,939	6,068	5,703	5,996
Total	30,733	31,489	32,174	32,916	34,603

Fuente: INEGI, 2006 Con base en SEDESOL. DGOT. Subdirección de Asistencia Técnica a Organismos Operadores Urbanos Regionales.

Notas. Debido al redondeo de cifras la suma de los parciales puede no coincidir con el total. A partir de 1997 las cifras reportadas se han ajustado con base en estudios de generación *per capita* llevados a cabo en pequeñas comunidades, donde se encontró que dicha generación es del orden de 200 a 350g., cantidades inferiores a las reportadas en años anteriores.

¹ Incluye cobre, plomo, estaño y níquel

En uno de los pocos estudios realizados sobre la composición de la basura en México, se informa que en la Cd. de Mexicali los materiales clasificados como basura doméstica peligrosa corresponden al 3.7% del total de los DSM en México. De esta porción, el 48.7% son productos de limpieza y cuidado de casa, y el 15.7% son equipos electrónicos y pilas, aunque no especifican cuáles de ellas son peligrosas (Buenrostro, *et al.* 2006). En valores absolutos el equipo electrónico y pilas representan en Mexicali solamente el 0.55% del total, y en la parte central, aunque no se especifica, se infiere de los datos, que el porcentaje es mucho menor, aproximadamente del 0.1 %, pues estos materiales corresponden al 1.03% y de ellos 66.3% son productos de limpieza y cuidado del hogar, los insecticidas el 14.4% y el resto ocupa el 19.3% (Buenrostro, *ibidem*).

c) Resultados de la aplicación de los escenarios para el cálculo de los volúmenes de pilas desechadas a la basura

A continuación se listan los resultados obtenidos para cada escenario, como pilas/habitante/ton. de basura húmeda y pilas/habitante/ton. de basura seca. Se presentan los resultados de la aplicación de los dos escenarios planteados, incluyendo los datos de la subpartida 850680 "las demás pilas y baterías de pilas" y sin tomarla en cuenta, ya que no hay una descripción de que tipo de pilas la conforman y el título permite suponer que puede incluir baterías de tipo industrial o pilas de usos especiales para hospitales y otros centros de servicios.

Escenario 1

En este escenario, como se estableció en la base de cálculo, se incluyen a todas las pilas comercializadas en México legalmente, adicionando un 11% de las ilegales; suponiendo que esta cantidad de pilas comercializadas se venderán, usarán y desecharán en el mismo año en el que están registrados sin aplicar ningún factor de retardo; se resta un 7% de las pilas que se almacenan sin usar, y además se les resta un factor del 37% que representa el almacenaje de pilas gastadas por parte de los usuarios (valor promedio en países de la Unión Europea).

En los Cuadros del 53 al 57 se presentan los cálculos realizados en pasos para el escenario 1 (37% de pilas guardadas por los usuarios):

Cuadro 53. Cantidad total anual de pilas comercializadas en México que pueden ser enviadas a disposición junto con la basura municipal. PT_i

Subpartida	Descripción	2000	2001	2002	2003	2004
kg generados/año						
850610	dióxido de manganeso	15,168,474	13,053,020	16,496,435	20,613,245	21,384,808
850650	litio	106,402	180,031	177,211	247,659	327,373
850660	aire-cinc	463,384	23,282	6,652	82,698	34,326
850680	"Las demás pilas y baterías de pilas"	2,731,382	4,514,221	5,638,772	7,228,307	5,555,184
	Suma de pilas "no peligrosas"	18,469,642	17,770,554	22,319,070	28,171,909	27,301,691
850640	óxido de plata	39,293	52,595	93,340	52,335	42,354
850630	óxido de mercurio	15,989	44,372	29,173	28,305	148,129
850730	níquel-cadmio	2,544,410	3,847,691	2,458,533	1,677,623	1,586,692
	Suma de pilas "peligrosas"	2,599,692	3,944,658	2,581,046	1,758,263	1,777,175
	pilas primarias	18,524,924	17,867,521	22,441,583	28,252,549	27,492,174
	pilas secundarias	2,544,410	3,847,691	2,458,533	1,677,623	1,586,692
	TOTAL	21,069,334	21,715,212	24,900,116	29,930,172	29,078,866

Cuadro 54. Cantidad total anual de pilas comercializadas en México adicionando el porcentaje de pilas ilegales. $PC_{(1+i)} = PT_i (1+0.11)$

Descripción	2000	2001	2002	2003	2004
(kg generados/año)					
dióxido de manganeso	16,837,006	14,488,852	18,311,043	22,880,702	23,737,137
litio	118,106	199,834	196,704	274,901	363,384
aire-cinc	514,356	25,843	7,384	91,795	38,102
"Las demás pilas y baterías de pilas"	3,031,834	5,010,785	6,259,037	8,023,421	6,166,254
Suma pilas "no peligrosas"	20,501,303	19,725,315	24,774,168	31,270,819	30,304,877
óxido de plata	43,615	58,380	103,607	58,092	47,013
óxido de mercurio	17,748	49,253	32,382	31,419	164,423
níquel-cadmio	2,824,295	4,270,937	2,728,972	1,862,162	1,761,228
Suma pilas "peligrosas"	2,885,658	4,378,570	2,864,961	1,951,672	1,972,664
pilas primarias	20,562,666	19,832,948	24,910,157	31,360,329	30,516,313
pilas secundarias NiCd	2,824,295	4,270,937	2,728,972	1,862,162	1,761,228
TOTAL	23,386,961	24,103,885	27,639,129	33,222,491	32,277,541

Cuadro 55. Cantidad total anual de pilas legales e ilegales restando las pilas comercializadas que no están en uso

$$PC_{(l + i - \text{no usadas})} = [PC_{(l + i)} * (1 - 0.07)]$$

Descripción	2000	2001	2002	2003	2004
	(kg generados/año)				
dióxido de manganeso	15,658,416	13,474,633	17,029,270	21,279,053	22,075,537
litio	109,839	185,846	182,935	255,658	337,947
aire - zinc	478,351	24,034	6,867	85,369	35,435
"Las demás pilas y baterías de pilas"	2,819,606	4,660,030	5,820,904	7,461,781	5,734,616
Suma pilas "no peligrosas"	19,066,211	18,344,543	23,039,976	29,081,862	28,183,536
óxido de plata	40,562	54,294	96,355	54,025	43,722
óxido de mercurio	16,505	45,805	30,115	29,219	152,914
níquel-cadmio	2,626,594	3,971,971	2,537,944	1,731,810	1,637,942
Suma pilas "peligrosas"	2,683,662	4,072,070	2,664,414	1,815,055	1,834,578
pilas primarias	19,123,279	18,444,642	23,166,446	29,165,106	28,380,171
pilas secundarias NiCd	2,626,594	3,971,971	2,537,944	1,731,810	1,637,942
TOTAL	21,749,873	22,416,613	25,704,390	30,896,917	30,018,113

Cuadro 56. Total de pilas desechadas a la basura, considerando que los usuarios guardan el 37% (Escenario 1)

$$PC_{(l + i - \text{no usadas} - \text{gastadas almacenadas \% promedio})} = PC_{(l + i - \text{no usadas})} (1 - 0.37)$$

Descripción	2000	2001	2002	2003	2004
	(kg generados/año)				
dióxido de manganeso	9,864,802	8,489,019	10,728,440	13,405,803	13,907,588
litio	69,198	117,083	115,249	161,065	212,907
aire-cinc	301,361	15,141	4,326	53,783	22,324
"Las demás pilas y baterías de pilas"	1,776,352	2,935,819	3,667,170	4,700,922	3,612,808
Suma pilas "no peligrosas"	12,011,713	11,557,062	14,515,185	18,321,573	17,755,627
óxido de plata	25,554	34,205	60,704	34,036	27,545
óxido de mercurio	10,398	28,857	18,973	18,408	96,336
níquel-cadmio	1,654,754	2,502,342	1,598,904	1,091,040	1,031,904
Suma pilas "peligrosas"	1,690,707	2,565,404	1,678,581	1,143,485	1,155,784
pilas primarias	12,047,666	11,620,124	14,594,861	18,374,017	17,879,508
pilas secundarias NiCd	1,654,754	2,502,342	1,598,904	1,091,040	1,031,904
TOTAL	13,702,420	14,122,466	16,193,766	19,465,057	18,911,411

Cuadro 57. Total de pilas desechadas a la basura, considerando que los usuarios guardan el 37% y restando la subpartida 850680 "Las demás pilas y baterías de pilas"

$$PC_{(I + i - \text{no usadas} - \text{gastadas almacenadas \% promedio})} = PC_{(I + i - \text{no usadas})} (1 - 0.37)$$

Descripción	2000	2001	2002	2003	2004
	(kg generados/año)				
dióxido de manganeso	9,864,802	8,489,019	10,728,440	13,405,803	13,907,588
litio	69,198	117,083	115,249	161,065	212,907
aire-cinc	301,361	15,141	4,326	53,783	22,324
Suma pilas "no peligrosas"	10,235,361	8,621,243	10,848,015	13,620,651	14,142,819
óxido de plata	25,554	34,205	60,704	34,036	27,545
óxido de mercurio	10,398	28,857	18,973	18,408	96,336
níquel-cadmio	1,654,754	2,502,342	1,598,904	1,091,040	1,031,904
Suma pilas "peligrosas"	1,690,707	2,565,404	1,678,581	1,143,485	1,155,784
pilas primarias	10,271,314	8,684,305	10,927,691	13,673,095	14,266,700
pilas secundarias NiCd	1,654,754	2,502,342	1,598,904	1,091,040	1,031,904
TOTAL	11,926,068	11,186,647	12,526,596	14,764,136	15,298,603

En el Cuadro 58 se presentan la cantidad total de pilas desechadas anualmente por habitante para el Escenario 1 considerando todas las subpartidas, y en el Cuadro 59, excluyendo la subpartida de "Las demás pilas y baterías de pilas" que como se comentó, es posible que incluya dispositivos similares para la industria y servicios. En la Figura 51, se presenta la tendencia en la generación de pilas desechadas por año.

Cuadro 58. Cantidad de pilas desechadas anualmente por habitante. Escenario 1

Descripción	2000	2001	2002	2003	2004
	(kg /enviados a basura/habitante/año)				
pilas totales	0.14	0.14	0.16	0.19	0.19
pilas "no peligrosas"	0.12	0.12	0.15	0.18	0.17
pilas "peligrosas"	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01
pilas primarias	0.12	0.12	0.15	0.18	0.18
pilas secundarias	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01

Cuadro 59. Cantidad de pilas desechadas anualmente por habitante calculadas con base en el escenario 1, excluyendo a las pilas de la subpartida arancelaria 850680 "Las demás pilas y baterías de pilas"

Descripción	2000	2001	2002	2003	2004
	(kg /enviados a basura/habitante/año)				
pilas totales	0.12	0.11	0.12	0.14	0.15
pilas "no peligrosas"	0.10	0.09	0.11	0.13	0.14
pilas "peligrosas"	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01
pilas primarias	0.10	0.09	0.11	0.13	0.14
pilas secundarias	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01

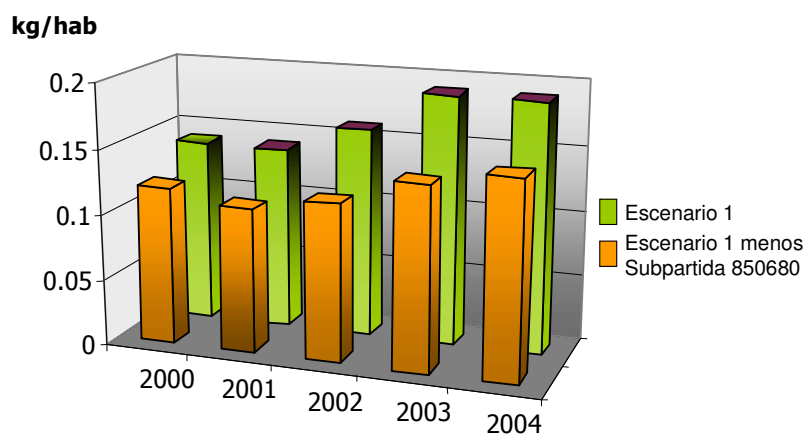


Figura 51. Pilas desechadas a la basura por habitante del año 2000 al 2004. Escenario 1

En los Cuadros 60 y 61, se presentan las cifras obtenidas en el Escenario 1 del volumen de pilas desechadas por tonelada de basura húmeda.

Cuadro 60. Cantidad de pilas desechadas anualmente por tonelada de basura húmeda (40%). Escenario 1

Descripción	2000	2001	2002	2003	2004
	kg de pilas/tonelada de basura húmeda				
pilas totales	0.45	0.45	0.51	0.60	0.55
pilas "no peligrosas"	0.40	0.37	0.46	0.56	0.52
kg pilas "peligrosas"	0.06	0.08	0.05	0.04	0.03
kg pilas primarias	0.40	0.37	0.46	0.57	0.52
kg pilas secundarias	0.05	0.08	0.05	0.03	0.03

Cuadro 61. Cantidad de pilas desechadas anualmente por tonelada de basura húmeda (40% de humedad) obtenida aplicando el Escenario 1, sin considerar las pilas de la subpartida 850680 "Las demás pilas y baterías de pilas"

Descripción	2000	2001	2002	2003	2004
	(kg de pilas/tonelada de basura húmeda)				
pilas totales	0.39	0.36	0.39	0.45	0.44
pilas "no peligrosas"	0.33	0.27	0.34	0.41	0.41
pilas "peligrosas"	0.06	0.08	0.05	0.03	0.03
pilas primarias	0.33	0.28	0.34	0.42	0.41
pilas secundarias	0.05	0.08	0.05	0.03	0.03

En los Cuadros 62 y 63 se presentan los mismos datos pero por tonelada de basura seca con el objeto de poder comparar estos datos con los de otros países.

Cuadro 62. Cantidad de pilas desechadas a la basura anualmente por tonelada de basura (base seca). Escenario 1

Descripción	2000	2001	2002	2003	2004
	kg de pilas/tonelada de basura seca				
pilas totales	0.75	0.76	0.85	1.00	0.92
pilas "no peligrosas"	0.66	0.62	0.76	0.94	0.87
kg pilas "peligrosas"	0.09	0.14	0.09	0.06	0.06
kg pilas primarias	0.66	0.62	0.77	0.94	0.87
kg pilas secundarias	0.09	0.13	0.08	0.06	0.05

Cuadro 63. Cantidad de pilas desechadas anualmente por tonelada de basura (base seca). Escenario 1, excluyendo a las pilas de la partida "Las demás pilas y baterías de pilas"

Descripción	2000	2001	2002	2003	2004
	(kg de pilas/tonelada de basura seca)				
pilas totales	0.65	0.59	0.65	0.75	0.74
pilas "no peligrosas"	0.56	0.46	0.56	0.69	0.68
kg pilas "peligrosas"	0.09	0.14	0.09	0.06	0.06
kg pilas primarias	0.56	0.46	0.57	0.69	0.69
kg pilas secundarias	0.09	0.13	0.08	0.06	0.05

Al comparar los datos calculados con los obtenidos directamente en rellenos sanitarios de países de la Unión Europea, resultan demasiado altos, pues en el año 2000 en Francia, de acuerdo a Screlslec y Ademe en Vangheluwe *et al.* (2005) se desecharon 0.073 kg de pilas primarias por tonelada de basura seca mientras que para México se calculó en ese mismo año (Escenario 1) una cantidad de 0.56 kg de pilas por tonelada de basura seca (Cuadro 63).

Esta diferencia posiblemente se debe a que los datos internacionales se obtuvieron directamente en campo, y los datos reportados para México se

basan en un escenario muy conservador en el que: a) se aplica un periodo de uso de las pilas de un año, mientras que las vidas útiles pueden ser mucho más altas, b) se estableció un valor de 37% a 62% para las pilas gastadas almacenadas por los usuarios, cifras que pueden ser menores a las reales, c) la cantidad de basura generada por persona en países con menor desarrollo económico, como es el caso de México, es menor que en los países ricos y c) en UE y otros países se reciclan e incineran una buena parte de las pilas, lo que disminuye su disposición en rellenos sanitarios.

Escenario 2

Para este escenario, al total de pilas legales e ilegales que se comercializan en México (Cuadro 53 y 54) se les resta un 7% de las pilas que no se usan (Cuadro 55) y posteriormente el 62% que corresponde al porcentaje máximo de las pilas gastadas que se supone almacenan los usuarios. Los resultados se presentan en los Cuadros 64 al 71, en el mismo orden que en el caso del escenario 1.

Cuadro 64. Cantidad total de pilas desechadas por año. Escenario 2

$$PC_{(I + i - \text{no usadas} - \text{gastadas almacenadas \% máximo})} = PC_{(I + i - \text{no usadas})} (1-0.62)$$

Descripción	2000	2001	2002	2003	2004
	(kg generados/año)				
dióxido de manganeso	5,950,198	5,120,360	6,471,123	8,086,040	8,388,704
litio	41,739	70,621	69,515	97,150	128,420
aire-cinc	181,773	9,133	2,609	32,440	13,465
"Las demás pilas y baterías de pilas"	1,071,450	1,770,812	2,211,944	2,835,477	2,179,154
Suma pilas "no peligrosas"	7,245,160	6,970,926	8,755,191	11,051,107	10,709,744
óxido de plata	15,414	20,632	36,615	20,530	16,614
óxido de mercurio	6,272	17,406	11,444	11,103	58,107
níquel-cadmio	998,106	1,509,349	964,419	658,088	622,418
Suma pilas "peligrosas"	1,019,792	1,547,387	1,012,477	689,721	697,140
pilas primarias	7,266,846	7,008,964	8,803,250	11,082,740	10,784,465
pilas secundarias NiCd	998,106	1,509,349	964,419	658,088	622,418
TOTAL	8,264,952	8,518,313	9,767,668	11,740,828	11,406,883

Cuadro 65. Cantidad total de pilas desechadas por año (Escenario 2), restando la subpartida 850680 "Las demás pilas y baterías de pilas"

$$PC_{(I + i - \text{no usadas} - \text{gastadas almacenadas \% máximo})} = PC_{(I + i - \text{no usadas})} (1-0.62)$$

Descripción	2000	2001	2002	2003	2004
	(kg generados/año)				
dióxido de manganeso	5,950,198	5,120,360	6,471,123	8,086,040	8,388,704
litio	41,739	70,621	69,515	97,150	128,420
aire-cinc	181,773	9,133	2,609	32,440	13,465
Suma pilas "no peligrosas"	6,173,710	5,200,114	6,543,247	8,215,630	8,530,590
óxido de plata	15,414	20,632	36,615	20,530	16,614
óxido de mercurio	6,272	17,406	11,444	11,103	58,107
níquel-cadmio	998,106	1,509,349	964,419	658,088	622,418
Suma pilas "peligrosas"	1,019,792	1,547,387	1,012,477	689,721	697,140
pilas primarias	6,195,396	5,238,152	6,591,306	8,247,263	8,605,311
pilas secundarias NiCd	998,106	1,509,349	964,419	658,088	622,418
TOTAL	7,193,502	6,747,501	7,555,724	8,905,351	9,227,729

Cuadro 66. Cantidad total de pilas desechadas anualmente por habitante de acuerdo al Escenario 2

Descripción	2000	2001	2002	2003	2004
	(kg / enviados a basura/habitante/año)				
pilas "totales"	0.08	0.09	0.10	0.12	0.11
pilas "no peligrosas"	0.07	0.07	0.09	0.11	0.11
pilas "peligrosas"	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
pilas primarias	0.07	0.07	0.09	0.11	0.11
pilas secundarias	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01

Cuadro 67. Cantidad total de pilas desechadas anualmente por habitante de acuerdo al Escenario 2, excluyendo a las pilas de la subpartida 850680 "Las demás pilas y baterías de pilas"

Descripción	2000	2001	2002	2003	2004
	(kg / enviados a basura/habitante/año)				
pilas totales	0.07	0.07	0.07	0.09	0.09
pilas "no peligrosas"	0.06	0.05	0.06	0.08	0.08
pilas "peligrosas"	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
pilas primarias	0.06	0.05	0.07	0.08	0.08
pilas secundarias	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01

Cuadro 68. Cantidad de pilas desechadas anualmente por tonelada de basura húmeda (40% de humedad) de acuerdo al Escenario 2

Descripción	2000	2001	2002	2003	2004
	kg de pilas/tonelada de basura húmeda				
pilas totales	0.27	0.27	0.31	0.36	0.33
pilas "no peligrosas"	0.24	0.22	0.28	0.34	0.31
kg pilas "peligrosas"	0.03	0.05	0.03	0.02	0.02
kg pilas primarias	0.24	0.23	0.28	0.34	0.32
kg pilas secundarias	0.03	0.05	0.03	0.02	0.02

Cuadro 69. Cantidad de pilas desechadas anualmente por tonelada de basura húmeda (40% de humedad) de acuerdo al Escenario 2, excluyendo a las pilas de la subpartida 850680 "Las demás pilas y baterías de pilas"

Descripción	2000	2001	2002	2003	2004
	(kg de pilas/tonelada de basura húmeda)				
pilas totales	0.23	0.21	0.23	0.27	0.27
pilas "no peligrosas"	0.20	0.17	0.20	0.25	0.25
pilas "peligrosas"	0.03	0.05	0.03	0.02	0.02
pilas primarias	0.20	0.17	0.20	0.25	0.25
pilas secundarias	0.03	0.05	0.03	0.02	0.02

Cuadro 70. Cantidad de pilas desechadas anualmente por tonelada de basura (base seca) de acuerdo al Escenario 2

Descripción	2000	2001	2002	2003	2004
	kg de pilas/tonelada de basura seca				
pilas totales	0.45	0.46	0.51	0.60	0.56
pilas "no peligrosas"	0.40	0.37	0.46	0.57	0.52
kg pilas "peligrosas"	0.06	0.08	0.05	0.04	0.03
kg pilas primarias	0.40	0.38	0.46	0.57	0.53
kg pilas secundarias	0.05	0.08	0.05	0.03	0.03

Las cifras obtenidas bajo las primicias de este escenario son menores a las calculadas con base en el Escenario 1 pero siguen siendo mucho mayores que las reportadas en países de la Unión Europea (determinadas en directamente en campo), pues de acuerdo al Cuadro 71, se desechan en México 0.34 kg de pilas por tonelada de basura seca y en Europa en dos campañas realizadas se encontraron 0.073 kg de pilas /ton de basura seca. La única forma de poder dilucidar si en México el valor es menor es

realizar campañas en diversos basureros del país. Sin embargo el utilizar datos que se presuponen mucho mayores que los reales, le da certeza a las conclusiones sobre el riesgo que representan las pilas para el ambiente y la población.

Cuadro 71. Cantidad de pilas desechadas anualmente por tonelada de basura (base seca). Escenario 2, excluyendo a las pilas de la partida "Las demás pilas y baterías de pilas"

Descripción	2000	2001	2002	2003	2004
	(kg de pilas/tonelada de basura seca)				
pilas totales	0.39	0.36	0.39	0.45	0.44
pilas "no peligrosas"	0.33	0.28	0.34	0.42	0.41
kg pilas "peligrosas"	0.06	0.08	0.05	0.03	0.03
kg pilas primarias	0.34	0.28	0.34	0.42	0.41
kg pilas secundarias	0.05	0.08	0.05	0.03	0.03

Se observa un ligero aumento de la masa de pilas desechadas por tonelada de basura, que empieza a ser notorio en el año 2020 (Figura 52), suponiendo que en ese periodo no se implanten otros sistemas de manejo.

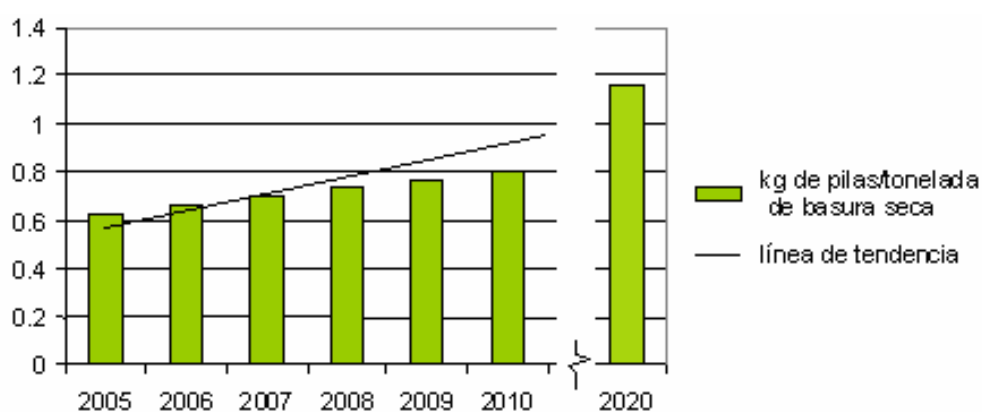


Figura 52. Proyección del volumen de las pilas desechadas (expresado como masa) por tonelada de basura, para el periodo 2005 a 2020 con base en el Escenario 2

Los porcentajes que representan estos volúmenes de pilas en el total de la basura, sin importar que estén sobrevalorados, son muy bajos. En el Cuadro 72 se observa que para el Escenario 1 es de 0.044% y para el Escenario 2 de 0.027% del total de la basura generada.

Cuadro 72. Porcentaje que representan las pilas en el total de la basura generada en México (año 2004)

Tipo de basura	Escenario 1		Escenario 2	
	Peso (tons)	%	Peso (tons)	%
Papel, cartón, productos de papel	5,160,000	14.9	5,160,000	14.9
Textiles	520,000	1.5	520,000	1.5
Plásticos	2,116,000	6.1	2,116,000	6.1
Vidrios	2,210,000	6.4	2,210,000	6.4
Aluminio	606,000	1.8	606,000	1.8
Ferrosos	329,000	1.0	329,000	1.0
Otros ferrosos¹	225,000	0.7	225,000	0.7
Basura de comida, de jardines y materiales orgánicos similares	17,441,000	50.4	17,441,000	50.4
Otro tipo de basura (residuos finos, pañal desechable, etc.)	5,980,701	17.3	5,986,772	17.3
Pilas	15,299	0.044	9,228	0.027
Total	34,603,000	100	34,603,000	100

Nota. Escenario 1 (37% de pilas se almacenan por lo usuarios) y Escenario 2 (62% de las pilas se almacenan por los usuarios)

4.4 Contribución de las pilas al contenido de metales de la basura

4.4.1 Contenido de metales en las pilas desechadas a la basura

La contribución de las pilas al contenido de metales en la basura, se calculó con base en los volúmenes de pilas desechadas a la basura anualmente establecidas de acuerdo a las condiciones fijadas en los Escenarios 1 y 2, descartando la subpartida 850680 "Las demás pilas y baterías", y en el contenido promedio de metales en cada tipo de pilas, reportados en el Cuadro 29 del Capítulo 3. En el Cuadro 73 se presenta en dos partes, de acuerdo al tipo de elemento que contienen las pilas, los kilogramos de metales que éstas aportaron en 2004 a la basura, informando la cantidad total y las contribuciones de cada tipo de pilas.

Cuadro 73. Contenido de metales (kg) aportados por las pilas gastadas a la basura en 2004, de acuerdo al Escenario 1, sin incluir la subpartida 850680 "las demás pilas y baterías de pilas"

Tipo de pila	TOTAL	Cantidad del elemento (kg)		
		Zn	Mn	Ni
- De dióxido de manganeso. Zn-C 23.7 % Alcalinas 76.3 %	13,907,588	789,964.9	828,968.8	16,480.5
- De óxido de mercurio.	96,336	12,041.9	963.4	963.4
- De óxido de plata.	27,545	2,479.0	550.9	550.9
- De litio.	212,907	0.0	38,323.2	2,129.1
- De aire-cinc.	22,324	7,813.4	0.0	0.0
- De níquel-cadmio.	1,031,904	619.1	856.5	203,801.0
TOTAL	15,298,603	3,090,851.6	2,461,386.2	223,924.8

Cuadro 73 (cont.). Contenido de metales (kg) aportados por las pilas gastadas a la basura en 2004, de acuerdo al Escenario 1, sin incluir la subpartida 850680 "las demás pilas y baterías de pilas"

Tipo de pila	Cantidad del elemento (kg)				
	Pb	Hg	Cd	Cr	Ag
- De dióxido de manganeso. Zn-C 23.7 %	1,318.4	0.0	243.9	131.8	0.0
Alcalinas 76.3 %	10,611.5	0.0	0.0	0.0	0.0
- De óxido de mercurio.	0.0	29,864.0	0.0	0.0	0.0
- De óxido de plata.	0.0	110.2	0.0	0.0	8,538.9
- De litio.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
- De aire-cinc.	0.0	223.2	0.0	0.0	0.0
- De níquel-cadmio.	0.0	0.0	182,303.0	175.4	0.0
TOTAL	11,929.9	30,197.5	182,546.9	307.3	8,538.9

En el Cuadro 74 se presentan de la misma forma los datos del contenido de metales en kg, aportados por las pilas gastadas a la basura, obtenidos aplicando el Escenario 2 sin incluir los datos de la subpartida 850680 "las demás pilas y baterías de pilas". Cabe señalar que las tendencias reportadas para 2004 bajo ambos escenarios, son similares a las de los otros años estudiados (2000 a 2003).

Cuadro 74. Contenido de metales (kg) aportados por las pilas gastadas a la basura en 2004, de acuerdo al Escenario 2, sin incluir la subpartida 850680 "las demás pilas y baterías de pilas".

Tipo de pila	TOTAL	Cantidad del elemento (kg)		
		Zn	Mn	Ni
- De dióxido de manganeso. Zn-C 23.7 %	8,388,704	476,486.8	500,012.9	9,940.6
Alcalinas 76.3 %		1,373,991.4	960,087.2	0.0
- De óxido de mercurio.	58,107	7,263.4	581.1	581.1
- De óxido de plata.	16,614	1,495.3	332.3	332.3
- De litio.	128,420	0.0	23,115.6	1,284.2
- De aire-cinc.	13,465	4,712.8	0.0	0.0
- De níquel-cadmio.	622,418	373.5	516.6	122,927.6
TOTAL	9,227,729	1,864,323.2	1,484,645.7	135,065.7

Cuadro 74 (cont.). Contenido de metales (kg) en pilas a desecharse a la basura en el año 2004 de acuerdo al Escenario 2, sin subpartida 850680

Tipo de pila	Cantidad del elemento (kg)				
	Pb	Hg	Cd	Cr	Ag
- De dióxido de manganeso. Zn-C 23.7 %	795.2	0.0	147.1	79.5	0.0
Alcalinas 76.3 %	6,400.6	0.0	0.0	0.0	0.0
- De óxido de mercurio.	0.0	18,013.2	0.0	0.0	0.0
- De óxido de plata.	0.0	66.5	0.0	0.0	5,150.5
- De litio.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
- De aire-cinc.	0.0	134.7	0.0	0.0	0.0
- De níquel-cadmio.	0.0	0.0	109,960.5	105.8	0.0
TOTAL	7,195.8	18,188.5	109,960.5	185.3	5,150.5

4.4.2 Cálculo de la concentración total de metales en la basura

Los volúmenes totales de metales comercializados en México en 2004 se calcularon utilizando los datos de producción a los cuales se le sumaron los valores de importación y se restaron las exportaciones (Cuadro 75). Estos metales se utilizan en grandes cantidades para la fabricación de productos de uso común, por ejemplo en materiales de construcción, aleaciones diversas, fertilizantes e inclusive para suplementos alimenticios que se venden sin receta médica.

Los datos del consumo anual de metales en México que se reportan en el Cuadro 75, no incluyen los metales contenidos en las pilas, ya que se importan.

Cuadro 75. Cálculo del consumo anual de metales en México (toneladas) en el año 2004

Elemento	Producción (P)	Importación (I)	Exportación (E)	Volumen comercializado	% de metal comercializado en México con respecto al producido
Zn	426,360	42,546	374,952	93,954	20
Mn	135,893	153,457	14,572	274,778	95
Ni	0	3,759	1,276	2,484	66
Pb	118,484	84,374	42,589	160,269	79
Cd (1)	1,662	11	2,001	-328	0
Hg (2)	15	25	1	24	60

Fuente: Importaciones minero-metalúrgicas 2004-2006, Secretaría de Economía, México (2006)

Notas: (1) El valor del volumen de Cd en el mercado nacional da negativo pues en ese año se exportó mayor cantidad de la que se importó; se puede deber a que había remanentes de otros años o un error en los datos reportados.

(2) Los datos de producción de mercurio en México es un valor estimado por Brooks, 2005

En el Cuadro 76 se representa el porcentaje de los metales de las pilas con respecto al total consumido en el país. En el caso del cadmio no se presenta un valor ya que en las fuentes documentales citadas no se reportan datos de importaciones ni de producción, lo que implica que los volúmenes de producción y consumo son bajos, lo cual se debe a que el cadmio es un subproducto de la extracción de otros metales como zinc, plata y otros; y sus usos están muy restringidos.

Cuadro 76. Cálculo del contenido de metales en pilas y el porcentaje que representan respecto al total de los metales comercializado en México (datos del año 2004)

Metal	Contenido de metales en pilas comercializadas (kg)		Total de metal comercializado en México	% de metales de las pilas respecto al total	
	Escenario 1	Escenario 2		Escenario 1	Escenario 2
Zn	3,090,851.60	1,864,323.20	93,954,000.0	3.185	1.946
Mn	2,461,386.20	1,484,645.70	274,778,000.0	0.888	0.537
Ni	223,924.80	135,065.70	2,484,000.0	8.269	5.157
Pb	11,929.90	7,195.80	160,269,000.0	0.007	0.004
Hg	30,197.5	18,188.5	24,000.0	55.70	43.10
Cd	182,546.90	109,960.50	NR	100.00	100.00
Cr	307.3	185.3			
Ag	8,538.90	5,150.50			

NR = no reportado

Nota: No hay datos de producción de Cd en México por lo que considero =0
Los datos de producción de mercurio no son de fuentes oficiales mexicanas

En el Cuadro 77, se puede ver que el zinc de todas las pilas representa únicamente el 3 % del total comercializado, el manganeso menos del 1 %, el níquel 8 % y solamente el mercurio y el cadmio resultan significativos, aunque en ambos casos faltó información sobre la producción nacional.

Estos datos confirman que en México, al igual que en el resto del mundo (ver Capítulo 3), las pilas portátiles solamente se pueden considerar fuentes importantes de mercurio y de cadmio, y su participación en la dispersión de otros metales es ínfima. (Cuadro 77). Sin embargo, como se comentó en el capítulo 3 la quema de carbón y los plásticos, el procesamiento de fosfatos, la industria metalúrgica no ferrosa y la producción de hierro y acero son fuentes más importantes de dispersión de cadmio en el ambiente, que las pilas; y en el caso del mercurio hay otras fuentes como las lámparas (Vangheluwe, 2005).

Al comparar los datos del aporte de las pilas al respecto al consumo total, obtenidos para México con los reportados para otros países (Capítulo 3), se observa que aunque los porcentajes son muy bajos (con excepción de los de Hg y Cd), los valores en la Unión Europea y EEUUA son todavía menores, lo que posiblemente se debe a que el consumo de metales en esas regiones es mucho mayor, y cuentan con bases de datos más completas y precisas de los volúmenes comercializados.

4.4.3 Contribución de metales de las pilas al contenido total de la basura

Se calculó la contribución de metales de las pilas al contenido total de estos elementos presentes en la basura, con el fin de establecer la magnitud del impacto de estos dispositivos en la composición de la basura.

En el caso del año 2004, se utilizó el volumen generado de basura en México en ese año (34,603 kton/año), el contenido metales en las pilas de

acuerdo a los volúmenes de pilas enviadas a los basureros o rellenos sanitarios (Escenarios 1 y 2). El aporte de metales totales de otras fuentes a la basura, diferentes a las pilas, se calculó estableciendo 3 supuestos: 1) que se desecha el 100% del total de metales comercializado en un año, 2) el 50% y 3) el 25%.

Cuadro 77. Aportes de metales comercializados anualmente en basura húmeda considerando que se desechan diferentes porcentajes del total de metal comercializado, con los volúmenes de pilas obtenidas en el Escenario 1

Elemento	Concentración total de cada metal desechada a la basura (g/ton basura húmeda) ⁽¹⁾			Concentración de metal de las pilas a la basura (g/ton basura húmeda)	Aporte (%) del metal de las pilas con respecto a la cantidad total		
	100%	50%	25%		100%	50%	25%
Zn	2,804.5	1,446.9	768.1	89.3	3.18	6.17	11.63
Mn	8,012.0	4,041.6	2,056.4	71.1	0.89	1.76	3.46
Ni	78.3	42.4	24.4	6.5	8.27	15.28	26.50
Pb	4,632.0	2,316.2	1158.3	0.3	0.01	0.01	0.03
Hg	1.6	1.2	1.0	0.9	55.72	71.56	83.42
Cd	5.3	5.3	5.3	5.3	100.00	100.00	100.00

⁽¹⁾ Se consideraron tres posibilidades: a) se desecha a la basura el total comercializado cada año de cada metal (100%), b) se desecha a la basura el 50% de esta cantidad y c) únicamente se desecha el 25%.

Cuadro 78. Aportes de metales comercializados anualmente a en basura húmeda considerando que se desechan diferentes porcentajes del total y el aporte de metales de las pilas. Escenario 2

Elemento	Concentración de metal total desechado a la basura (g/ton basura húmeda)			Concentración de metal de las pilas a la basura (g/ton basura húmeda)	Aporte (%) del metal de las pilas con respecto a la cantidad total		
	100%	50%	25%		100%	50%	25%
Zn	2769.1	1411.5	732.7	53.9	1.95	3.82	7.35
Mn	7983.8	4013.3	2028.1	42.9	0.54	1.07	2.12
Ni	75.7	39.8	21.8	3.9	5.16	9.81	17.86
Pb	4631.9	2316.0	1158.1	0.2	0.00	0.01	0.02
Hg	1.2	0.9	0.7	0.5	43.11	60.25	75.19
Cd	3.2	3.2	3.2	3.2	100.00	100.00	100.00

Cuadro 79. Aportes de metales comercializados anualmente en basura seca considerando que se desechan diferentes porcentajes del total y el aporte de metales de las pilas. Escenario 1

Elemento	Concentración de metal total desechado a la basura (g/ton basura seca)			Concentración de metal de las pilas a la basura (g/ton basura seca)	Aporte (%) del metal de las pilas con respecto a la cantidad total		
	100%	50%	25%		100%	50%	25%
Zn	4674.2	2411.5	1280.2	148.9	3.18	6.17	11.63
Mn	13353.3	6735.9	3427.3	118.6	0.89	1.76	3.46
Ni	130.4	70.6	40.7	10.8	8.27	15.28	26.50
Pb	7720.0	3860.3	1930.4	0.6	0.01	0.01	0.03
Hg	2.6	2.0	1.7	1.5	55.72	71.56	83.42
Cd	8.8	8.8	8.8	8.8	100.00	100.00	100.00

Cuadro 80. Aportes de metales comercializados anualmente a en basura seca considerando que se desechan diferentes porcentajes del total y el aporte de metales de las pilas. Escenario 2

Elemento	Concentración de metal total desechado a la basura (g/ton basura seca)			Concentración de metal de las pilas a la basura (g/ton basura seca)	Aporte (%) del metal de las pilas como respecto a la cantidad total		
	100%	50%	25%		100%	50%	25%
Zn	4615.1	2352.5	1221.1	89.8	1.95	3.82	7.35
Mn	13306.3	6688.9	3380.2	71.5	0.54	1.07	2.12
Ni	126.1	66.3	36.4	6.5	5.16	9.81	17.86
Pb	7719.8	3860.1	1930.2	0.3	0.00	0.01	0.02
Hg	2.0	1.5	1.2	0.9	43.11	60.25	75.19
Cd	5.3	5.3	5.3	5.3	100.00	100.00	100.00

Los aportes relativos de Zn de pilas a la basura en relación al consumo anual total del metal en el país varía de 1.95 a 7.35 %, dependiendo de si se considera que se tira el 100% de toda la producción del metal en el país, en el mismo año o se desecha el 25%. De Mn los aportes relativos varían del 0.54 al 2.12 %, en el caso del Ni del 5.16 al 17.86%; del plomo del 0.00 al 0.02; del Hg del 43 al 75% y en el caso del Cd el 100% (ya que no hay datos de producción nacional de este metal). Se debe considerar que no se tienen datos de los objetos importados que se consumen y desechan anualmente en México.

Las cantidades absolutas de metales en pilas más altas corresponden al manganeso y al zinc, y las más bajas al Hg, Cd y Ni (Cuadros 79 y 80 y Figura 53); sin embargo sus aportes relativos son opuestos, lo que refuerza las evidencias internacionales de que las pilas no contribuyen con Zn, Mn y Ni en forma importante (Capítulo 3), pero son fuentes más importantes de mercurio y cadmio.

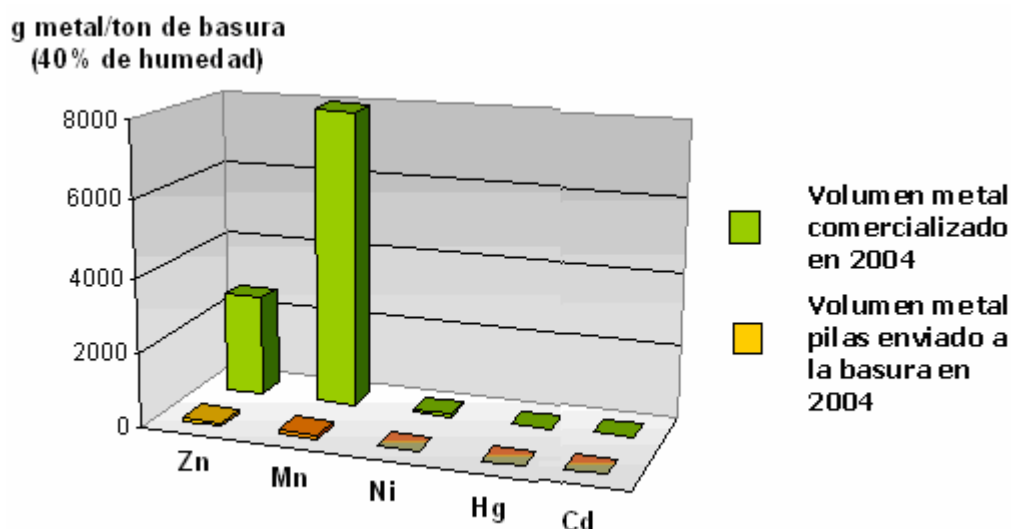


Figura 53. Volúmenes de metal comercializado en 2004 comparado contra los volúmenes del metal en las pilas que se dispone en la basura.

4.4.4 Concentración máxima de metales de pilas que puede disponibilizarse en el lixiviado de la basura

La basura biodegradable se descompone bajo las condiciones de los basureros y rellenos sanitarios, formando biogás y un lixiviado líquido, que dependiendo de diversos factores como el tiempo, puede ser ácido o neutro o inclusive básico, pero que, en todos los casos, contiene ligantes que se coordinan fácilmente con metales de transición como son el Zn, Mn, Ni, Pb, etc.

El impacto de la dispersión del lixiviado está relacionado con muchos factores físico-químicos y microbiológicos. Específicamente su toxicidad puede ser medida indirectamente a través de la cuantificación de cationes

básicos, sólidos suspendidos y compuestos no polares (Isidori, *et al.* 2003). Entre los cationes, se pueden encontrar los de los elementos potencialmente tóxicos contenidos en la basura, incluyendo los que aportan las pilas, cuando se disuelven por efecto de los protones (en lixiviados ácidos) o de los ligantes; o se encuentran como partículas sólidas muy pequeñas. En consecuencia, la ruta de dispersión más importante la constituye el transporte de lixiviado a través del suelo y subsuelo, con excepción del mercurio que puede formar compuestos volátiles que pueden dispersarse con el biogás.

La prueba a la que se sujetan los residuos para determinar si son peligrosos por contener metales tóxicos es simular las reacciones de disolución que pueden ocurrir al mezclarlos con basura biodegradable en descomposición. La extracción básicamente consiste de realizar una extracción, en caso de ser sólido, en una relación sólido: líquido de 1:20 durante 18 horas con una disolución amortiguadora de ácido acético (NOM-053), cuantificando los elementos señalados en la NOM-052, que en este caso son Hg, Cd, Pb, Ag y Ni²³.

A diferencia del contenido total de metales totales en una matriz, el contenido de metales que se pueden movilizar por acción de su solubilidad en algún medio acuoso es muy importante; a esta fase móvil se le denomina geodisponible, y puede ser un foco importante de riesgo para la salud humana y el ambiente.

²³ Considerado en la NOM-052-SEMARNAT-1993, pero no en la NOM-052-SEMARNAT-2005, que es más actual.

La norma NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece los criterios para identificar si un residuo es peligroso, considera a un residuo como tóxico ambiental cuando el extracto PECT, obtenido mediante el procedimiento establecido en la NOM-053-SEMARNAT-1993, contiene uno de los constituyentes considerados en su lista de constituyentes tóxicos por encima de los límites máximos permisibles (ver cuadro 20 legislación)

En la Figura 54 se muestra un diagrama de flujo del procedimiento para considerar un residuo como tóxico ambiental con el extracto PECT.

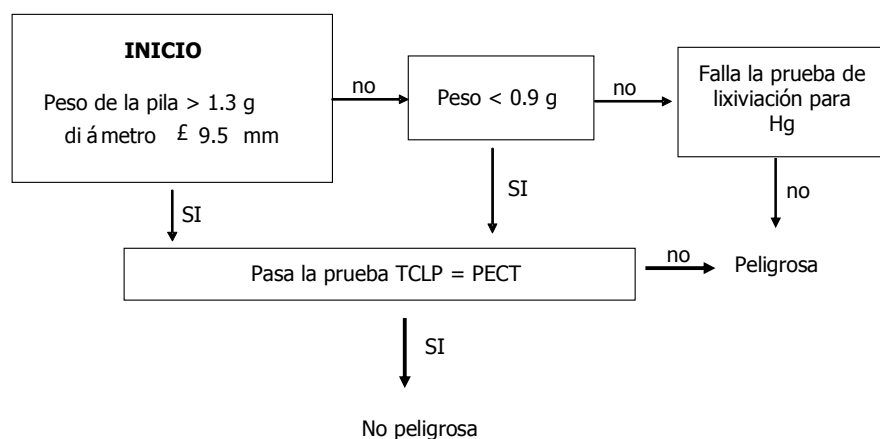


Figura 54. Diagrama con los pasos requeridos para determinar la toxicidad de una pila mediante la prueba de extracción PECT que simula el efecto del lixiviado de la basura

Con los datos obtenidos en los pasos anteriores, se realizó un cálculo teórico de la concentración máxima de los metales en el extracto PECT, considerando que todo el metal de las pilas en la basura se disuelve en el mismo año en que se desechan las pilas, sin tomar en cuenta que estos dispositivos son herméticos y su intemperismo es muy lento. Los datos se reportaron en base seca (Cuadro 81).

Cuadro 81. Valores máximos posibles de metales de las pilas en el extracto PECT de la base seca de la basura

Elemento	Concentración de los metales de las pilas en basura seca (mg/kg ó ppm)		Contenido de metales (mg) en 100 g de residuo		Contenido en 2 L de extracto PECT		Límite máximo permisible
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 1	Escenario 2	
	Ni	10.8	6.5	1.08	0.65	0.539	
Pb	0.6	0.3	0.06	0.03	0.029	0.017	5
Hg	1.5	0.9	0.15	0.09	0.073	0.044	0.2
Ag	0.41	0.25	0.04	0.025	0.021	0.012	5
Cd	8.8	5.3	0.88	0.53	0.440	0.265	1

Las cantidades máximas de metales en el extracto PECT quedan por debajo de los límites máximos permisibles por lo que este cálculo confirma nuevamente el que no representa un riesgo potencial para el ambiente.

Estos resultados son inclusive mayores a los experimentales, pues los datos que hay de análisis de lixiviados indican muy bajas concentraciones inclusive debajo de los límites de detección. Rosas, H. (2006) reporta datos de la concentración de Zn y Pb en lixiviados colectados en Bordo Poniente y Santa Catarina (Zona Metropolitana de la Ciudad de México), los cuales para el Zn varían de 0.2 a 0.9 mg/L y para plomo son menores al límite de detección analítico que es de 0.05 mg/L, (Cuadro 82).

Cuadro 82. Cuantificación de Zn y Pb en lixiviado en dos sitios de México

Muestra	Sitio de disposición	Unidades	Conc. metal	
			Zn	Pb
Lixiviado	Bordo Poniente	mg /L	0.9296	n.d
Lixiviado	Bordo Poniente	mg /L	0.2264	n.d
Lixiviado	Santa Catarina	mg /L	0.7934	n.d

n.d. = no detectado < 0.05 mg/L
Fuente: Rosas H. (2006)

González Herrera (2005) en su estudio de la dispersión del lixiviado de un basurero en Mérida, Yucatán, no detectó metales pesados; sin embargo, el contaminante predominante son los iones cloruro (Cl⁻), el cual es muy típico de este tipo de residuos (Cuadro 83)

Cuadro 83. Resultados de los análisis químicos del lixiviado para el basurero municipal de Mérida

Fecha	23 / 8 / 94		23 / 9 / 96	
Parámetro	Charca 1, extremo N	Charca 2, extremo S	Colector R- 2, Nivel 1	Charca, 20m de charca 1
Ca ²⁺	633	118	135	114
Mg ²⁺	108	146	67	65
Na ⁺	1220	4440	2941	2273
K ⁺	857	2740	1674	2016
N como NH ₄	13	610	58	527
Cl ⁻	3460	6880	4489	3065
SO ₄ ²⁻	633	118	121	335
HCO ₃ ⁻	722	5070	7747	4075
N como NO ₃ ⁻	108	146	<10	<10
N como NO ₂	59	<5	<2	<2
COT (carbono orgánico total)	244	1340	1478	2495
B	2.77	7.07	7.24	8.3
Br	6.51	14.6	6.95	7.87
Cu	0.394	0.144	<0.05	1.353
Zn	0.075	0.764	<0.05	1.526
Cr	<0.01	0.2	<0.1	0.85

Fuente: González Herrera, 2005.

CENICA (2006) publica los resultados de análisis realizados en lixiviados y biogás de distintos sitios de disposición de Desechos Sólidos Municipales de la zona Centro del país. En el caso de los lixiviados, el pH de todas las muestras varían de neutros a básicos (7.50-9.00) y la mayoría de las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos están por debajo de los límites máximos permisibles señalados en la NOM-052-SEMARNAT-

2005, e incluso, por debajo del límite de detección del método analítico utilizado.

Cuadro 84. Resultados de toxicidad por metales en lixiviados

SITIO	Muestreo	Concentración (mg/L)								
		As	Ba (Cd	Ni	Ag	Pb	Se	Cr ^(VI)	Hg
Santa Catarina	1 ^{er} muestreo	*	*	*	*	*	*	*	*	*
		*	*	*	*	*	*	*	*	*
	2 ^{do} muestreo	<LDM	*	<LDM	0.090	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
		<LDM	*	<LDM	0.017	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM
Tlalnepantla	1 ^{er} muestreo	<LDM	0.901	<LDM	0.554	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	
	2 ^{do} muestreo	<LDM	*	<LDM	0.057	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	
Chimalhuacán	1 ^{er} muestreo	<LDM	2.36	<LDM	1.324	<LDM	<LDM	0.015	<LDM	
	2 ^{do} muestreo	*	*	*	*	*	*	*	*	
Querétaro	1 ^{er} muestreo	<LDM	1.02	<LDM	0.732	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	
		<LDM	1.26	<LDM	0.056	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	
Puebla	2 ^{do} muestreo	*	*	*	*	*	*	*	*	
		<LDM	*	<LDM	0.303	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	
Tehuacán	2 ^{do} muestreo	<LDM	*	<LDM	0.122	<LDM	<LDM	0.215	<LDM	
San Andrés Cholula	2 ^{do} muestreo	*	*	*	*	*	*	*	*	
Jalapa	1 ^{er} muestreo	<LDM	0.246	<LDM	0.613	<LDM	<LDM	<LDM	0.03	
	2 ^{do} muestreo	*	*	*	*	*	*	*	*	
Poza Rica	1 ^{er} muestreo	<LDM	0.646	<LDM	0.473	<LDM	<LDM	<LDM	<LDM	
	2 ^{do} muestreo	*	*	*	*	*	*	*	*	
Límite de cuantificación		0.0005	0.005	0.02	0.004	0.004	0.02	0.013	0.014	*
Límite Máximo Permissible NOM-052-SEMARNAT-2005		5.0	100	1.0	NA	5.0	5.0	1.0	NA	0.2

Fuente: CENICA, 2006

Las bajísimas concentraciones de metales en el lixiviado puede explicarse por varios factores: a) la cantidad de residuos biodegradables es muy alto, b) la pepena es un sistema muy eficiente para la recolecta de desechos con valor económico, lo que disminuye el aporte de muchos metales; c) la geodisponibilidad de los elementos potencialmente tóxicos, con excepción del mercurio, en la mayoría de los residuos que los contienen, como pilas,

plásticos, pinturas, etc. es baja, ya que o están protegidos por empaques herméticos o sus formas químicas presentan muy baja solubilidad; y d) el pH de los lixiviados y los suelos varían de neutro a básico, y estos elementos forman compuestos insolubles.

Sin embargo, en el biogás producido en los basureros se encontraron altas concentraciones de mercurio: "De manera general, las concentraciones de mercurio gaseoso total (MGT) en biogás fueron mucho mayores a las concentraciones encontradas en aire, por lo cual existe una evidente emisión y no deposición de mercurio en los sitios de manejo de los desechos sólidos urbanos" (Cuadro 85)

Cuadro 85. Concentración promedio de mercurio gaseoso total (MGT) en aire ambiente en sitios de disposición de residuos sólidos urbanos en dos épocas de muestreo

Sitio	MGT en aire ambiente (ng/m ³) *	
	1er muestreo	2do muestreo
Tepetzotlán	103.86 ± 13.74	85.12 ± 18.32
Chimalhuacán	128.21 ± 44.34	188.57 ± 26.31
Tlalnepantla	38.78 ± 1.95	89.41 ± 21.24
Prados de la Montaña	133.67 ± 85.65	69.76 ± 21.32
Santa Catarina	747.94 ± 131.90	108.86 ± 38.80
Querétaro	179.91 ± 66.86	186.14 ± 60.76
Jalapa	53.51 ± 22.05	51.07 ± 28.50
Poza Rica	147.66 ± 117.46	85.27 ± 56.18
Tehuacán	-	138.52 ± 22.11
Puebla	-	157.94 ± 26.64
San Andrés Cholula	-	65.20 ± 32.30
San Pedro Cholula	-	46.45 ± 47.24
Huejotzingo	-	28.94 ± 3.16

* Valores promedio de los puntos muestreados en cada sitio

5 RESULTADOS GENERALES Y DISCUSIÓN

La composición de las pilas portátiles se ha modificado en los últimos años, reduciendo el uso de metales tóxicos, como el mercurio y el cadmio.

Hasta la década de 1990 todas las pilas contenían mercurio adicionado para evitar explosiones, pero en esos años se empezaron a prohibir y actualmente en la mayor parte de los países no se permiten su venta, excepto las de botón que pesan en promedio 1 g y contienen un máximo de 2% de mercurio en peso. En México todavía no está prohibida su venta, pero las empresas de marcas reconocidas de pilas no las comercializan. Sin embargo, se importan pilas que posiblemente contienen mercurio pues una de las subpartidas de importación de estos dispositivos se titula "pilas de óxido de mercurio". El precio unitario declarado en la aduana para estas pilas es muy bajo, por lo que es probable que contengan mercurio adicionado y provengan de China donde se fabrican a precios similares al reportado y se distribuyan a través del mercado informal.

Los metales más tóxicos de las pilas primarias han sido sustituidos por elementos más amigables como manganeso y zinc. En el caso de pilas secundarias de níquel cadmio (que en la Unión Europea van a prohibirse a partir de 2008), están siendo sustituidas por pilas de níquel-metal hidruro y litio.

En general en todas las pilas ha aumentado la vida útil, ya sean primarias (no reciclables) o secundarias (reciclables).

Se están desarrollando pilas basadas en sustancias orgánicas y en metales amigables con el ambiente. En México no se fabrican pilas portátiles desde el año 2000 y no hay investigación y desarrollo tecnológico sobre este tema. Sin embargo se prevee que en el momento que se introduzcan en los mercados de países económicamente desarrollados, se comercializarán en México.

El número promedio de pilas consumidas por habitante en México de 214 a 293 g del año 2000 al 2004 de acuerdo a los datos de la Secretaria de Economía. Considerando un peso promedio de 32 g/pila, se obtiene un consumo en unidades de 6.7 a 9.2; del cual el 88.25% son primarias. También es parecido al valor reportado por Castro y Díaz (2004) que es de 10 pilas por persona y que lo establece por analogía con el promedio de Argentina, España y EEUU; ya que el dato que obtiene utilizando datos de Bancomext es de 5.11 pilas/persona. La diferencia entre ambos valores que es de 4.89, la asigna a pilas de contrabando, aunque es una cifra no puede validarse fácilmente, pues utilizando los datos de investigaciones realizadas por "Energizer", el mercado de contrabando en México no es mayor al 11% del legal.

De acuerdo a Amexpilas se venden 6 pilas primarias/hab/año, mientras que en este estudio se reporta un intervalo de 5.9 a 8.1 pilas primarias. La diferencia entre ambos datos se debe a las pilas que aparecen registradas en la aduana de México pero no son distribuidas por Amexpilas, como son los dispositivos clasificados en la subpartida de óxido de mercurio. Es posible que una gran parte de las pilas que se venden en el mercado informal se importen legalmente y por su precio hayan sido fabricadas en

China, aunque se reporten otros países de origen como Guatemala o Bután.

El número de pilas consumidas por habitante en México es congruente con los datos reportados en otros países. En los países menos ricos de la Unión Europea cuyas condiciones socioeconómicas son más parecidas a México, el intervalo reportado es de 5 a 9 pilas que es casi igual al obtenido en este estudio.

El consumo de pilas crece rápidamente en México en forma similar a lo que observa en muchos otros países, ya que del año 2000 al 2003 aumentó un 10.5% anual (valor promedio).

Del total de pilas comercializadas en México, del 82 al 94.5% son primarias, el resto son pilas secundarias y del 60.1 al 73.54% son pilas alcalinas (Zn-Mn) y de zinc-carbón (Zn-C), las cuales se agrupan en la subpartida dióxido de manganeso. Del total de pilas (primarias y secundarias), el 82 al 94 % correspondió a las clasificadas como no peligrosas. La demanda de pilas peligrosas es del 6 % del total de pilas comercializadas anualmente en México. La similitud entre los valores de las pilas primarias y las no peligrosas se debe a que las pilas clasificadas como peligrosas en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos en México son las de níquel-cadmio (NiCd), de óxido de mercurio (HgO) y de óxido de plata (Ag₂O), ya que contienen elementos clasificados como tóxicos en la NOM-052-SEMARNAT-2005; de las cuales las que más se venden son las de NiCd que son secundarias.

En México se observa una tendencia al aumento de pilas secundarias (recargables), aunque el porcentaje que ocupan con respecto a las primarias es todavía muy bajo. Las cifras reportadas sobre el consumo de pilas en países económicamente desarrollados y los resultados obtenidos en este estudio, son similares. Por ejemplo, En EEUA el 98.11% de las pilas vendidas a menudeo corresponden a las primarias, en la UE en 2002 las pilas no recargables ocuparon un 90 % del mercado y el resto a las no recargables (en unidades); y las pilas alcalinas representaron del 62 al 65% del mercado y las de zinc carbón (Zn-C) del 25 al 27%.

La demanda de las pilas de NiCd a nivel mundial ha estado disminuyendo lentamente a partir de 1992 (Morrow, 2003) análogamente a lo que se observó en México, pues en el año 2000 representaban el 12.08% del mercado total y en el 2003 se redujo a 5.61%, que es un poco mayor que el de Canadá, en donde se reporta un valor promedio del 3% (2001 al 2010). Sin embargo algunos países reportan escenarios futuros con aumentos en el consumo de pilas NiCd, como en Asia y Canadá.

Los cálculos de los consumos en México de pilas de NiCd realizados con base en el Sistema de Información Arancelaria Vía Internet dan resultados exageradamente altos, pero esto se debe a que la mayor parte se utilizan en equipos electrónicos que se exportan (maquila). Sin embargo, en este estudio se utilizaron bases de datos en la Secretaría de Economía basados en información arancelaria, pero que consideran únicamente los volúmenes comercializados internamente.

Debido a la generalidad de los datos de las fracciones arancelarias no fue posible determinar específicamente el tipo de tecnología de todas las pilas.

Por ejemplo hay una partida denominada "las demás pilas y baterías de pilas". Estas limitaciones evitaron la determinación de las tendencias en el crecimiento del mercado para las pilas de ión-litio (ión-Li) y níquel metal hidruro (NiMH), las cuales están adquiriendo enorme importancia en la sustitución de las pilas de níquel cadmio (NiCd). Tampoco fue posible determinar el consumo de pilas tipo plomo-ácido, pues no aparecen descritas en forma particular en los aranceles. Sin embargo, dadas las analogías encontradas entre el comportamiento del mercado de las pilas en México y el de otros países, especialmente el de la Unión Europea, es posible considerar que se van a comportar en forma similar. Por ejemplo, la participación de las pilas de Pb-ácidas en el mercado mexicano debe ser muy limitado, pues en otros países se reportan cifras muy bajas, como es el caso de Canadá, para el año 2004 se reporta que representaron el 0.243% del total.

Las pilas de mayor venta, básicamente contienen hierro, zinc y manganeso; y también carbón y agua (5%). Las pilas de NiCd contienen alrededor de 17.7% de cadmio y 19.8 de níquel. Las pilas de NiMH contienen el 35 % de níquel y las de ión-litio un valor no mayor al 37%. Las de óxido de plata y óxido de mercurio contienen un 31% de metal.

En México bajo el escenario 1 (37% de las pilas gastadas son almacenadas por los usuarios) se obtuvo que se desechan de 0.75 kg de pilas /ton de basura húmeda a 1.00 kg de las cuales del 0.62 al 0.94 no son peligrosas. La cantidad de pilas desechadas anualmente bajo el escenario 2 (62% de las pilas gastadas son almacenadas por los usuarios), excluyendo a las pilas de la partida "Las demás pilas y baterías de pilas" varía de 0.36 a 0.45 kg/ton de basura seca. Al comparar los datos calculados con los

obtenidos directamente en rellenos sanitarios de países de la Unión Europea, resultan demasiado altos, pues en el año 2000 en Francia, de acuerdo a Screlslec y Ademe en Vangheluwe *et al.* (2005) se desecharon 0.073 kg de pilas primarias por tonelada de basura seca. La diferencia de casi una orden de magnitud se debe a que los supuestos considerados para los cálculos en México fueron muy conservadores. Especialmente se consideró una vida útil de un año para todas las pilas, incluyendo las reciclables, y los porcentajes de pilas guardadas por los usuarios pueden ser mayores, la cantidad de basura en México es mucho menor que los países ricos y en México no se incineran o reciclan las pilas.

Existen ciertos estudios que comprueban que las pilas usadas no son una fuente importante de emisión de metales en los rellenos sanitarios, comparado con otras fuentes. En esta investigación se encontró que las contribuciones de metales provenientes de las pilas usadas como zinc y manganeso es mínima con respecto a otras fuentes depositadas en la basura; sin embargo, metales como el níquel, mercurio y cadmio contribuyen en un porcentaje considerable al total, pero la concentración de estos metales en la basura en valores absolutos es pequeña. Comparando estos datos con los encontrados en estudios en otros países, las tendencias de las contribuciones son las mismas, pero las concentraciones encontradas en la basura son menores a los que se calcularon en esta investigación, por lo que se puede inferir que los supuestos usados en estos cálculos son muy conservadores.

La única forma de poder dilucidar cual es el valor en México es realizar campañas de recolecta de pilas en diversos basureros del país. Sin

embargo, aporta una gran seguridad el utilizar estos datos tan conservadores para la evaluación del riesgo potencial.

Los estudios de ciclo de vida de los metales de las pilas realizados en otros países han demostrado que su aporte en relación con otras actividades es muy bajo. Inclusive para elementos no tan utilizados como el cadmio, que es un producto secundario de la producción de zinc y se utiliza en los últimos años casi exclusivamente para la producción de pilas de NiCd, los principales aportes lo constituyen los fertilizantes y la quema de combustibles fósiles. En otros casos, como el zinc, plomo y níquel la contribución también es mínima y existen otras fuentes importantes.

La principal ruta de dispersión de metales en los basureros y rellenos sanitarios es el lixiviado. Para que los metales de las pilas se puedan dispersar, y por lo tanto considerarlos un foco de riesgo, tienen primero que abrirse por corrosión, los metales deben formar compuestos solubles y los lixiviados que los contienen deben llegar a los acuíferos. Para evaluar si existe este riesgo, se calculó la mayor cantidad posible de metales de las pilas que se pueden extraer de una muestra de basura, a través del método de obtención del extracto PECT sugerido por la NOM-053-SEMARNAT-1993. Se encontró que, suponiendo que las pilas no son herméticas y que la solubilidad de todos sus componentes en este extracto es total, las concentraciones de los metales provenientes de las pilas se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en la presente norma, con lo cual se puede concluir que esta muestra no es considerada un tóxico ambiental. Comparado con resultados de análisis de lixiviados de basura a nivel nacional, se encontró que la concentración de los metales como cadmio, plata, plomo y níquel están por debajo de los

límites máximos establecidos, e incluso debajo de los límites de detección del análisis. Por tanto, los resultados encontrados en el cálculo teórico se consideran también muy conservadores con respecto a la realidad, pero aún así los resultados son razonables y son los esperados.

Con base en los datos del periodo 2000 a 2004 se prevee que a partir del año 2020 el volumen de pilas gastadas por tonelada de basura, si no se implementan otros sistemas de manejo, empieza a ser más notorio. Sin embargo, las pilas solamente representan del 0.027 al 0.044% del total de la basura desechada.

El zinc de las pilas representa el 3 % del total comercializado, el manganeso menos del 1 %, el níquel 8 % y solamente el mercurio y el cadmio resultan significativos, aunque en ambos casos faltó información sobre la producción nacional. Las pilas portátiles solamente son fuentes importantes de mercurio y de cadmio pero inclusive en estos metales su aporte relativo es bajo, pues hay otras fuentes más importantes. Estos porcentajes son mayores a los reportados por EEUUA y UE.

Los aportes relativos de Zn de pilas a la basura en relación al consumo anual total del metal en el país varía de 1.95 a 7.35 %, dependiendo de si se considera que se tira el 100% de toda la producción del metal en el país en el mismo año o se desecha el 25%. De Mn, los aportes relativos varían del 0.54 al 2.12 %, en el caso del Ni del 5.16 al 17.86%; del plomo del 0.004 al 0.02; del Hg del 43 al 75% y en el caso del Cd el 100% (ya que no hay datos de producción nacional de este metal). Se debe considerar que no se tienen datos de los objetos importados que se consumen y desechan anualmente en México. Los valores son mucho más

altos que los medidos en basureros de la UE, con excepción del plomo que resulta menor y del zinc es similar. El aporte en UE de Cd es de 17%, de Ni 2.7%, Pb de 0.4% y de Zn del 2%. De todas maneras aunque los aportes calculados para México sean más altos que los de la UE, son poco importantes con excepción del Cd y Hg.

Las cantidades máximas de metales en el extracto PECT, que simula el comportamiento de un lixiviado de basura, quedan por debajo de los límites máximos permisibles señalados en la NOM-052-SEMARNAT-2005, al igual que los análisis que se realizaron de lixiviados de basura en el CENICA-INE de Semarnat, en los cuales todos los valores caen muy por debajo del valor máximo permisible señalado en la NOM-052-SEMARNAT-2005 y la mayoría por debajo del límite de detección.

Todos los datos analizados son opuestos a la percepción de que todas las pilas gastadas representan un riesgo. Para las pilas peligrosas se han emitido leyes y control que están estimulando la disminución o supresión del uso de metales tóxicos como mercurio y cadmio, mediante la sustitución de las tecnologías por otras basadas en elementos más amigables para el ambiente, como en el caso de la sustitución de las pilas de níquel cadmio con el surgimiento de pilas de níquel-hidruro metálico, ión-litio y ión-litio polímero, o la sustitución de las pilas de botón de óxido de mercurio por las de zinc-aire; o se ha hecho obligatorio su reciclado.

Otras acciones relevantes de manejo de pilas usadas hechas por otros países son la recolección separada de pilas gastadas y el reciclado de sus materiales; esta medida responde en primer término a la necesidad de minimizar el volumen de residuos generados que se envía a los rellenos

sanitarios por la falta de espacio, y principalmente para facilitar la incineración de la basura, pues se reduce el riesgo de emisiones de metales.

Otra justificación es que la obtención de los metales de las pilas por medio del reciclado es menos costosa económica y ambientalmente que la extracción de metales vírgenes de yacimientos mineros.

El reciclado de pilas se ha llevado a cabo en países desarrollados como Japón, Estados Unidos y la Unión Europea; en algunos casos sólo incluyen las pilas consideradas peligrosas como las de níquel-cadmio, plomo-ácido, óxido de mercurio o de óxido de plata, y en otros se hará obligatorio el tratamiento a todos los tipos de pilas, esta decisión es consecuencia de los altos costos de la clasificación de las pilas por tecnologías, ya que su recolección no es separada por los consumidores en tecnologías.

Los sistemas de reciclado que se han implementado a nivel mundial han demostrado que es posible acopiar y reciclar de manera eficiente las pilas y baterías de uso industrial, e incluso el proceso es sumamente rentable, pero éste no es el caso de las de uso doméstico, por varios factores:

- Los costos del sistema de recolección y clasificación de las pilas es alto, pero sobre todo el último, ya que las pilas son recolectadas juntas, y es muy difícil informar al público adecuadamente de cómo separar las pilas por tecnologías; la tecnología de clasificación de pilas es sumamente cara, incluso usando mano de obra también lo es.

- Los costos del reciclado son elevados, en la Unión Europea los precios oscilan entre 100 hasta 4,000 €/tonelada de pilas, dependiendo del tipo de pila y la tecnología de reciclado utilizada.

Los estudios de impacto de los sistemas de reciclado, concluyen que, si bien se puede evitar la acumulación de metales en el ambiente y fomenta la creación de empleos, el reciclado de pilas puede causar impactos negativos al ambiente, debidos al alto gasto energético y las posibles emisiones si los controles ambientales no son eficientes.

Hay que considerar también que la implantación del reciclado como una opción de manejo de pilas respondió, en el caso de la Unión Europea, a la necesidad de evitar que las pilas sean incineradas con los demás residuos domésticos ya que se corre el riesgo de que los metales contenidos en estos dispositivos, que inicialmente se encuentran en empaques herméticos, con su incineración se pueden emitir al ambiente más fácilmente en forma de polvos finos o de vapor, como en el caso del mercurio, y por lo tanto llegan a ser mucho más peligrosos para la biota porque están más disponibles para ellos. Además, la incineración es un plan de manejo desarrollado para que los volúmenes de desechos sólidos generados por los habitantes sean los mínimos, ya que el espacio disponible en los rellenos sanitarios de estos países es muy pequeño para una gran población, y no se pueden diseñar más rellenos porque el espacio territorial es limitado. Por todas estas razones, no sólo se han reciclado los componentes de las pilas, sino de otros residuos de productos de consumo, con el fin de disminuir los volúmenes generados al máximo.

Por ello, se deben estudiar muchos factores geográficos, económicos y sociales antes de la implantación de un sistema tan complejo como lo es el reciclado de pilas domésticas. En el caso de México, el espacio de los basureros no es un factor emergente, pero la preocupación se debe enfocar en el diseño de sistemas más controlados de manejo de basura, ya que los tiraderos abiertos de basura son muy abundantes en nuestro país, y son un foco de infección por la alta cantidad de organismos vectores que viven ahí, como contaminantes visuales, e incluso se encuentran muy cerca de asentamientos humanos. A pesar de las condiciones, los metales como el cadmio, plata, níquel y plomo no son considerados un peligro en este medio, porque las condiciones no son óptimas para solubilizar a estos metales (el pH mínimo alcanzado en un basurero es de 5, no es suficiente para lograr lo anterior), pero en el caso del mercurio sí es preocupante porque se han registrado emisiones de este elemento en el aire (ver sección 4.4.4), y no se conocen con exactitud las fuentes de este metal en la basura. En el ámbito económico, la recolección y reciclado de pilas no es nada accesible para México, los precios del proceso son sumamente altos. Sin embargo, para prever una futura escasez de yacimientos mineros, se propone una recolección separada de pilas.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de esta investigación sobre la situación en México del mercado de las pilas y la cuantificación y destino de los dispositivos gastados que se importan legalmente, permiten concluir que la disposición de las pilas portátiles clasificadas como no peligrosas, en los rellenos sanitarios y basureros no implica un riesgo potencial para el ambiente o la salud humana, por lo cual no se justifica la percepción social sobre el peligro que las pilas representan al ambiente. Esta aseveración se fundamenta principalmente en que:

1. Contienen elementos que son esenciales o benéficos, o que forman sustancias de baja geodisponibilidad (baja solubilidad) y su contribución al contenido total de metales de la basura es muy baja.
2. Las concentraciones máximas posibles de metales en la solución PECT que simula el lixiviado de un basurero (disolución total de los metales de las pilas), son menores a los límites máximos permisibles, y en la mayoría de los casos están por debajo de los límites de detección de los equipos analíticos.
3. Los análisis de metales realizados en lixiviados de basureros y rellenos sanitarios de México indican que las concentraciones están por debajo de los límites de detección de los equipos analíticos, con excepción del níquel. En todos los casos están por debajo de los límites máximos permisibles.
4. Las pilas conforman dispositivos herméticos que duran muchos años dentro de la basura sin intemperizarse

5. La formación de compuestos de coordinación, complejos de sorción y precipitados limitan la disolución y dispersión de los metales de las pilas en el ambiente. Los procesos de atenuación natural ocurren en el lixiviado, suelo, subsuelo y sedimentos de los cuerpos de agua.

Las pilas que contienen óxido de plata son apreciadas por su valor y, en general, cuando terminan su vida útil no se tiran a la basura. Las pilas peligrosas de NiCd, Pb-ácidas y HgO tampoco representan un riesgo para la salud, pues aunque contienen elementos que son más tóxicos a dosis menores que los otros elementos, los volúmenes de consumo son muy bajos y en consecuencia, sus aportes al contenido de metales en la basura no son significativos; están siendo sustituidas por otros tipos menos agresivas para el ambiente, y los mecanismos de atenuación natural funcionan para inmovilizarlos. Sin embargo, se debe considerar en el caso del mercurio, pueden formar compuestos volátiles y afectar la calidad del aire por lo que convendría prohibirlas al igual que otros productos que utilizan este metal, con excepción de los usos médicos donde debe implementarse un sistema de recolecta y reciclado. Estas restricciones a su uso ya han sido implantadas en muchos países.

Se requiere realizar un estudio complementario para evaluar el riesgo para salud y ambiente que representan las pilas de imitación que se comercializan en el mercado informal; para determinar el tipo, volúmenes y composición de las pilas (especialmente su contenido de mercurio), su vida útil, hermeticidad, así como su origen (legal o ilegal) y su destino en el ambiente. Además, estos datos deben ser utilizados para retroalimentar este estudio.

No se considera viable emitir normas que obliguen a reciclar las pilas, ya que el costo de un sistema que opere correctamente (recolecta, separación por tipos, transporte y procesamiento), es muy caro y complicado, y su implementación sin las debidas condiciones puede resultar una fuente de impacto y riesgo para el ambiente. En el caso de que en México la basura municipal se empiece a incinerar para minimizar los volúmenes que se disponen en rellenos sanitarios, será necesario como está sucediendo en la UE, Japón, etc. establecer programas de reciclado de pilas.

El costo ambiental y económico de enviar las pilas a un confinamiento controlado no se justifica pues, como ya se demostró, no conforman un riesgo para la salud, y no resuelve el impacto general que representa el aumento de la concentración de todo tipo de metales en la superficie terrestre.

A pesar de la notable extensión de sus vidas útiles, el crecimiento del consumo obliga a contar con sistemas adecuados a las características geográficas de cada sitio para disponer los cada vez mayores volúmenes de pilas gastadas (*post*-consumo). Por lo tanto, es recomendable e inclusive necesario evaluar la posibilidad de establecer celdas de disposición para pilas en los rellenos sanitarios y basureros, especialmente en los que estén en zonas vulnerables. Estas celdas, que funcionarían como minas posibles de explotar cuando los métodos de reciclado sean más baratos y limpios, pueden ser muy simples, pues únicamente requieren ser impermeables (suelo con arcillas básicas) y crear un ambiente aislante para evitar cualquier posible corriente eléctrica (cubrir

las capas con arena). El acopio y transporte quedaría a cargo del sistema de recolecta municipal y únicamente se solicitaría su entrega separada.

Por otro lado, dado el aumento de la concentración de metales en la zona de la superficie terrestre donde hay vida, convendría establecer planes de reducción, minimización, reuso y reciclado, pero incluyendo a todos los residuos que los contienen, pues las pilas representan solamente una mínima parte. Asimismo, se deben controlar fuentes de emisiones a la atmósfera y cuerpos de agua de metales, que son más importantes que los basureros, como procesos térmicos oxidantes, vehículos automotores, plantas tratadoras de agua, etc.

Finalmente, es muy importante difundir información científica a la población sobre el nivel real de riesgo de las pilas, y explicar cuales son las fuentes más importantes de contaminación.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Agencia de Cooperación Internacional del Japón, JICA (1999): Estudio Sobre el Manejo de Residuos Sólidos para la Ciudad de México de los Estados Unidos Mexicanos. Informe Final, Volumen I, México, D.F.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, ATSDR (2000): Reseña Toxicológica del Manganeso. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, ATSDR (2005). Reseña Toxicológica del Níquel. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU., Servicio de Salud Pública.
- Abernathy, CO; Cantilli, R; Du, JT; et al. (1993): Essentiality versus toxicity: some considerations in the risk assessment of essential trace elements. In: Saxena, J.; ed. Hazard Assessment of Chemicals. Vol. 8. Bristol, PA: Taylor & Francis Inc; pp. 81-113.
- Ahnert A, Borowski C (2000) Environmental risk assessment of anthropogenic activity in the deep sea. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery*, **7(4)**:299-315.
- Almeida M. F., Xará S. M., Delgado J., Costa C. A. (2006): Characterization of Spent AA Household Alkaline Batteries. *Waste Management*, Vol. **26(5)** pp. 466-476.
- Arnold, O. (2006): Efficiency of the Battery Channel. Serie E Tudes 05-E02, Ministère de l'Écologie et du Développement Durable
- Arredondo, C. (2001): Recuperación de Metales Contenidos en Pilas y Baterías Domésticas. Tesis Ingeniero Químico. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Asamblea Legislativa del Distrito Federal (2006): Foro Sobre Manejo y Disposición Final de Pilas y Baterías en la Ciudad de México. Documento interno. México, D.F.
- Asociación Mexicana de Pilas, AMEXPILAS (2006): Pilas y Baterías Primarias en México. Presentado en el Foro sobre el Manejo y Disposición Final de Pilas y Baterías en la Ciudad de México. Cámara de Diputados, México, D. F., 7 de marzo del 2006.

- Aucott, M. (2006): *The Fate of Heavy Metals in Landfills: A Review.* Proyecto de la Academia de Ciencias de Nueva York.
- Aumônier, S., Fraser, S., Cupit, M., Allison, W. Robb, B. Robb, A. (2000): *Analysis of the Environmental Impact and Financial Costs of a Possible New European Directive on Batteries;* estudio realizado para el Reino Unido, DTI.
- Avraamides, J., Senanayake, G., Clegg, R. (2006): *Sulfur Dioxide Leaching of Spent Zinc-Carbon-Battery Scrap.* Journal of Power Sources **159(2)**, 1488-1493.
- Badillo, F. (1985): *Plomo,* en: Curso Básico de Toxicología Ambiental, Albert, L. (ed). Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud, pp. 165-181 (1985)
- Badillo, F. (1985): *Cadmio,* en: Curso Básico de Toxicología Ambiental, Albert, L. (ed). Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud, pp. 205-229 (1985)
- Badillo, F., Pomares, G. L.(1985): *Metales,* en: Curso Básico de Toxicología Ambiental, Albert, L. (ed). Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud, pp. 161-163 (1985).
- Banerjee, D. y H.W. Nesbitt (1999). *Oxidation of aqueous Cr(III) at birnessite surfaces: Constraints on reaction mechanism.* Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 63, No. 11/12, pp. 1671-1687.
- Battery Association of Japan (2003): *Comment on Consultation Document on the Battery Directive Revision,* en: Associação Portuguesa dos Grossistas e Importadores de Material Eléctrico, Electrónico, Electrodoméstico, Fotográfico e de Relojoaria, AGEFE (2003): *AGEFE 's Oficial Statement on the Consultation of European Comisión DG ENV on Battery Directive.* Lisboa, Portugal.
- Beede, D.N., Bloom, D.E. (1995): *The Economics of Municipal Solid Waste.* The World Bank Research Observer, **10(2)**, 113-150.
- Bernard, C., Colin, J. R, Le Dü-Delepierre A. (1997): *Estimation of the Hazard of Landfills through Toxicity Testing of Leachates 2: Comparison of Physico-Chemical Characteristics of Landfill Leachates with their Toxicity Determined with a Battery of Tests.* Chemosphere, Vol. **35(11)**, pp. 2783-2796.

- Besenhard, J. O. (1999): Handbook of Battery Materials. Wiley-VCH.
- Bolaños-Berruecos, J. L. (2004): Manejo de Residuos Peligrosos de Pilas y Baterías de Uso Doméstico en el Municipio de Puebla. Tesis con el que se obtuvo el grado de Ingeniero Ambiental. Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Bradford, S. (2004): Rechargeable Batteries, Keeping Pace with the Digital Age? Battery Power Products and Technology. Webcom Communications Corp., EEUU. Obtenido de www.infowebcom.com.
- Brooks, W. E. (2002): Mercury. U.S. Geological Survey Minerals Yearbook, 2002, U.S.A. pp. 50.1-50.6.
- Buenrostro Delgado O., Ojeda-Benítez S., Márquez-Benavides L. (2006): Comparative Analysis of Hazardous Household Waste in Two Mexican Regions. Waste Management. In Press, Corrected Proof, Available Online in July, 2006, en www.sciencedirect.com.
- Castro Díaz, J. y Díaz Arias, M. L. (2004): La Contaminación por Pilas y Baterías en México. Gaceta Ecológica Núm. **72** pp. 53-74. INE-Semarnat. México.
- Cenica, (2006). Caracterización de Lixiviados y biogás generados en sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en lugares seleccionados de la zona centro de México. Informe Final (2ª Etapa). Documento interno de trabajo. Dirección de Investigación en Residuos y Sitios Contaminados, Subdirección de Investigación sobre el Manejo Integral de los Residuos. Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental, Instituto Nacional de Ecología, Semarnat. México.
- CENICA (2006). Informe del Estudio de Medición de Metales Totales en Pilas Alcalinas. Subdirección de Investigación y Caracterización Analítica de Contaminantes. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Semarnat, Instituto Nacional de Ecología, INE, pp. 1-15.
- Christensen, T., Cossu, R. Stegtman, R. (1995): Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact.
- Cockerham, L., Shane, B. (1994): Basic Environmental Toxicology. Lybrary for Congress. CRC Press, Inc. EEUU.
- Comisión de las Comunidades Europeas (2003). Propuesta de la Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo Relativa a las Pilas y Acumuladores y a las Pilas y Acumuladores Usados. Bruselas, Bélgica.

- Comisión Nacional del Medio Ambiente, Gobierno de Chile (2001a): Guía de Disminución de Residuos que van a Disposición Final.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente, Gobierno de Chile (2001b): Antecedentes. Tecnologías de Tratamiento y Disposición Final de Residuos Sólidos Domiciliarios. Documento oficial. Santiago de Chile.
- Comité de Expertos (2000): Transporte de Pilas de Litio. Lineamientos de la ONU. Informe, 21º Período de Sesiones, Ginebra. Suiza.
- Council of the European Union (2004): Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on Batteries and Accumulators and Waste Batteries and Accumulators.
- Criado, A., Gomez-Arnaud, J., Luengo, C., Gil-Sanz, F., Domínguez, E., Abello, F. (1991): Acute Pulmonary Oedema Due to Lithium Intoxication. Resuscitation. **9(4)**, pp. 353-357.
- Daniels, F., Alberty, R. (1995): Physical Chemistry. John Wiley and Sons, Estados Unidos.
- Davis G., Phillips, P. S., Read, A. D., Iida, Y., (2006): Demonstrating the Need for the Development of Internal Research Capacity: Understanding Recycling Participation Using the Theory of Planned Behaviour in West Oxfordshire, UK. Resources, Conservation and Recycling, **46(2)**, 115-127.
- Comunicación C 264 E (2005). Comunicaciones e Informaciones del Diario Oficial de la Unión Europea, 48º año, 25 de octubre de 2005.
- Dominey, L. A., Pistoia, I. G. (1994): Lithium Batteries, Elsevier, Amsterdam, p. 137.
- Earle, C. (1997): The Fate and Transformation of Mercury in Municipal Solid Waste Landfills. Documento interno. Universidad de Florida. 265 pp.
- Emsley, J. (1998): The Elements, 3a Edición, Clarendon Press, Oxford, Inglaterra, en: web2.airmail.net/uthman/elements_of_body.htm.
- Eloy, R. (2002): Importing batteries in EU Member States. SAFT, Paris, Francia, en: www.rechargebatteries.org.
- EPA/635/R-05/002 (2005). "Toxicological Review of Zinc and Compounds" (CAS No. 7440-66-6). In support of Summary Information on the Integrated Risk Information System (IRIS). U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C. USA.

- Ettler, V., Mihaljevič, M., Šebek, O., Molek, M. I., Grygar, T., Zeman, J. (2006): Geochemical and Pb Isotopic Evidence for Sources and Dispersal of Metal Contamination in Stream Sediments from the Mining and Smelting District of Příbram, Czech Republic. Environmental Pollution, **142 (3)**, 409-417.
- European Battery Recycling Association, EBRA (2003): EBRA's Response to the Consultation Document for the Revision of the Battery Directive, en: Associação Portuguesa dos Grossistas e Importadores de Material Eléctrico, Electrónico, Electrodoméstico, Fotográfico e de Relojoaria, AGEFE (2003): AGEFE 's Oficial Statement on the Consultation of European Comisión DG ENV on Battery Directive. Lisboa, Portugal.
- European Commission (2002): Heavy Metals in Waste. DG ENV. E3 Project ENV.E.3/ETU/2000/0058. Final Report.
- European Commission, Directorate General for Environment, DG Env (2004): Mercury Flows in Europe and the World: The Impact of Decommissioned Chlor-Alkali Plant. Rue de la Loi, 200B-1049, Bruselas.
- Fahrni, H. P. (1995): Battery-recycling as a part of the Swiss waste management concept. Journal of Power Sources **57**, 47-49.
- Fatta, D., Papadopoulos, A., Loizidou, M. (2006): A Study on the Landfill Leachate and its Impact on the Groundwater Quality of the Greater Area. Environmental Geochemistry and Health, **21(2)**, pp. 175-190.
- Figueroa, A. (1985): Mercurio y Metilmercurio, en: Curso Básico de Toxicología Ambiental, Albert, L. (ed). Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud, pp. 183-204 (1985).
- Finnveden, G., Nielsen, P. H. (1999): Long-Term Emissions from Landfills Should Not be Disregarded. Int. J. LCA **4(3)** 125-126 (1999).
- Fisher, K. Wallén, E., Laenen, P. P., Collins, M. (2006): Battery Waste Management Life Cycle Assessment. Final Report for Publication ERM. UK Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA).
- Flyvholm, M., Nielsen, G. D., Andersen, A. (1984): Nickel Content of Food and Estimation of Dietary Intake. Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und Forschung, Vol. **179(6)** pp 427-431.

- Fosmire, G. J. (1990): Zinc Toxicity. American Journal of Clinical Nutrition, **51**, 225-227.
- Friedrich, B., Klammer, H., Sanchez, R. (2004): Ferromanganese Production from Spent Primary Batteries: Feasibility of an DC-EAF Process. International Congress for Battery Recycling.
- Fujisawa T. (2005): The Non-Ferrous Metals Industry and Social Sustainability in Japan. World of Metallurgy-ERZMETALL **58(5)**, 263-268.
- Gamo T, Chiba H, Yamanaka T, Okudaira T, Hashimoto J, Tsuchida S, Ishibashi J, Kataoika S, Tsunogai U, Okamura K, Sano Y, Shinjyo R (2001) Chemical characteristics of newly discovered black smoker fluids and associated hydrothermal plumes at the Rodrigues Triple Junction, Central Indian Ridge. Earth & Planetary Science Letters, 193:371-379.
- García-Sayago, F. (2000): Monitorización de Metales de Interés Medioambiental en la Población de Tarragona. Niveles en Tejidos de Autopsia. Tesis doctoral. Universitat Rovira I Virgili, España.
- González-Herrera, R. A. (2005): Evaluación del Impacto y Afectación Hidrogeológica del Basurero de Mérida, Yucatán. Tesis de Doctorado. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y de Sistemas, Instituto de Geofísica, Instituto de Geología e Instituto de Geografía, UNAM. Pp. 2-4, 11-23, 54-68, 95-150, 160-170, 204-230.
- Graedel T. E. (1978) Inorganic elements, hydrides, oxides, and carbonates. In: Chemical compounds in the atmosphere. New York, NY, Academic Press, pp. 35-41, 44-49.
- Greer, L. (2006): S-1056 US and China Role in Global Trade of Mercury. 8th International Conference on Mercury as a Global Pollutant, en www.mercury2006.org.
- Gutiérrez Ruíz M. y Macías Guzmán P. (1999). "Sistemas Integrales de Valorización de Desechos". Rev. Panorama Ambiental, Vol. 4, No. 1, AIDIS-Puerto Rico. pp. 21-27. Diciembre.
- Gutiérrez R. M. (2000). Residuos Peligrosos. Proyecto Residuos Peligrosos LAFQA-IGg-UNAM y Centro de Educación y Capacitación para el Desarrollo Sustentable-Semarnat. Diciembre. 83 pp.
- Haight, M., Kofi Asanti-Duah, D., Craig, L. (1992): Assessing the Environmental Effects of Disposal Alternatives for Household Batteries.

Universidad de Waterloo, preparado para la Asociación Canadiense de Manufactureros de Pilas (CBMA).

- Hammami, A., Raymond, N. and Armand, M. (2003). Runaway Risk of Forming Toxic Compounds. *Nature* **424**, 635-636.
- Hansmann, R., Bernasconi, P., Smieszek, T., Loukopoulos, P., Scholz, R.W. (2006): Justifications and Self-Organization as Determinants of Recycling Behavior: The Case of Used Batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, **47(2)**, pp. 133-159.
- Hardman, J. G., Limbird, L. E., Molinoff, P. B., Ruddon, R. W., Goodman, A. G (1996): Goodman and Gilman's: The Pharmacological Basis of Therapeutics. 9th Ed., New York, NY: McGraw-Hill.
- Hawkins, R. T., Matthews, S. H., Hendrickson, C. (2006): Closing the Loop on Cadmium: An Assessment of the Material Cycle of Cadmium in the U.S. *Metals. Int. J. LCA*. **11(1)**, 38-48.
- Heck, H., Korzun, E., Shieh, C., Archer, J. (1993): Sources and Fates of Lead, Cadmium and Mercury in the Resource Recovery Process. Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management, en: www.hinkleycenter.com
- Hirano, S., Suzuki, K. T. (1996): Exposure, Metabolism and Toxicity of Rare Earths and Related Compounds. *Environmental Health Perspectives* **104**, 85-95.
- Household Universal Waste Generation in California, en: www.cawrecycles.org.
- Howe, P.D., Mr H.M. Malcolm, and Dr S. Dobson (2004). Manganese and its Compounds: Environmental Aspects. Concise International Chemical Assessment Document 63. World Health Organization, United Nations Environment Programme, the International Labour Organization.
- HSDB (1998) Hazardous substances data bank. Bethesda, MD, National Institutes of Health, National Library of Medicine.
- Hutchinson, T. C., Meema, K. M. (1987): Lead, Mercury, Cadmium and Arsenic in the Environment (Scope 31) Johan Wiley and Sons. Gran Bretaña.
- Ilustre Municipalidad de Valparaíso (1999): Diagnóstico y Manejo de Pilas. Secretariado de Manejo del Medio Ambiente para América Latina y el Caribe.

- Isidori, M., Lavorgna, M., Nardelli, A., Parrella, A. (2003): Toxicity identification evaluation of leachates from municipal solid waste landfills: a multispecies approach. Chemosphere **52(1)** 85-94.
- Jackson, A. P., Alloway, B. J. (1991): The Transfer of Cadmium from Agricultural Soils to the Human Food Chain, en: Biogeochemistry of Trace Metals, Adriano, D. C. (ed), Lewis Publishers pp. 109-158 (1992).
- Jarup, L., Berglund, M., Elinder, C. G., Nordberg, G. (1998): Health Effects of Cadmium Exposure: A Review of the Literature and a Risk Estimate. Scand. J. Work. Environ. Health, Jun; **24(3)** p. 240.
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H. (1984): Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Boca Ratón.
- Kiehne, H. A. (2003): Battery Technology Handbook, 2a edición, Marcel Dekker Inc., EEUU.
- Kirk, R. E., Othmer, D. F., Grayson, M., Eckroth, D. (1985) Kirk-Othmer Concise Encyclopedia of Chemical Technology. John Wiley and Sons.
- Labouze, E., Monier, V. (2003): Impact Assessment on Selected Policy Options for Revision of the Battery Directive. European Commission, Directorate General Environment A2 Consumption, Production & Waste. Bio-Intelligence Service.
- Lancry, E., Levi, E., Gofer, Y., Levi, M., Salitra, G., Aurbach, D. (2004): Leaching Chemistry and the Performance of the Mo6S8 Cathodes in Rechargeable Mg Batteries. Chem. Mater., **16**, pp. 2832-2838.
- Lankey, R., McMichael, F. (2000): Life-Cycle Methods for Comparing Primary and Rechargeable Batteries. Environ. Sci. Technol., **34**, pp. 2299-2304.
- Leea, C. K., Rhee, K. (2003): Reductive Leaching of Cathodic Active Materials from Lithium Ion Battery Wastes. Hydrometallurgy, **68**, pp. 5-10.
- Lin, S. L., Cross, W. H., Chian, E. S. K., Lai, J. S., Giabbai, M., Hung, C. H. (1996): Stabilization and Solidification of Lead in Contaminated Soils. Journal of Hazardous Materials **48(1-3)**, pp. 95-110.
- Lindberg, S. E., Wallschlager, D., Prestbo, E. M., Bloom, N. S., Price, J., Reinhart, D. (2001): Technical Note Methylated Mercury Species in Municipal Waste Land. Gas Sampled in Florida, USA. Atmospheric Environment **35**, 4011-4015.

- Linden, D., Reddy, T. (2002): *The Handbook of Batteries*. 3a. Edición. The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Lindqvist, O. (1995): *Environmental Impact of Mercury and Other Heavy Metals*. Journal of Power Sources. Proceedings of battery recycling '95, **57(1-2)** , pp. 3-7.
- Lobo García de Cortázar, A., Tejero-Monzón, I. (2006): *Application of Simulation Models to the Diagnosis of MSW Landfills: An Example*. Waste Management. Article in Press, Corrected Proof.
- Lohse, K., Sander J., Wirts Ökopol, M. (2001): *Heavy Metals in Vehicles II Final Report*. Institut für Ökologie und Politik GmbH Nernstweg 32-34, Hamburg, Germany.
- Mahomed, K; James, DK; Golding, J; et al. (1989) *Zinc supplementation during pregnancy: a double blind randomized controlled trial*. Br Med J 299:826-830.
- Maslanski, J. A., Leshko, L., Busa, W. B. (1992): *Lithium-sensitive Production of Inositol Phosphates During Amphibian Embryonic Mesoderm Induction*. Science **256** (5054): 243-5.
- Matlock, M., Howerton, B., Atwood, D. (2002): *Chemical Precipitation of Lead from Lead Battery Recycling Plant Wastewater*. Ind. Eng. Chem. Res., **41**, pp. 1579-1582.
- Maxson P. (2006): *Mercury Consumption in China. Eighth International Conference on Mercury as a Global Pollutant*. Madison, Wisconsin, USA.
- Ménard M., Chevalier C. (1991): *Used Batteries and the Environment: a Study on the Feasibility of their Recovery*. Environmental Protection Series Report EPS4/CE/1.
- Miles, H. (2001): *Recent Advances in Lithium Battery Technology*. Naval Air Wadare Center Weapons.
- Monk, P. (2004): *Physical Chemistry: Understanding our Chemical World*. John Wiley & Sons.
- Morales-Aguilar, J. C. (2002). *Análisis del Problema Ambiental que se Presenta por Lixiviados de un Relleno Sanitario en los Mantos Acuíferos*. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQUIE) IPN, pp. 22-25.

- Morrow, H. (2003): Cadmium 2003: Batteries, China and the European Commission. Metal Bulletin 14th International Minor Metals Seminar, International Cadmium Association.
- Mukherjee, A., Zevenhoven, R., Brodersen, J., Hylander, L., Bhattacharya, P. (2004): Mercury in Waste in the European Union: Sources, Disposal Methods and Risks Resources. Conservation and Recycling **42(2)**, 155-182.
- Muñoz-Sánchez, A. (1980). Residuos Sólidos Plásticos: Tratamiento y Reciclado. Centro Internacional de Formación de Ciencias Ambientales (CIFCA). Madrid. 77 pp.
- Muruglath, C. (2003): Imitation batteries in the market. New Straits Times, en: www.batteriesdigest.com.
- Nan, J., Han, D., Cui, M., Yang, M., Pan, L. (2006): Recycling Spent Zinc Manganese Dioxide Batteries through Synthesizing Zn-Mn Ferrite Magnetic Materials. Journal of Hazardous Materials, **133(1-3)**, pp. 257-261.
- NAS (1973): Medical and biological effects of environmental pollutants: manganese. Washington, DC, National Academy of Sciences, National Academy Press.
- National Electrical Manufacturers Association, NEMA (2001): Sound Environmental Management of Spent Primary Batteries, en www.nema.org, EEUUA.
- National Electrical Manufacturers Association, NEMA (2002): Household Batteries and the Environment. The Dry Battery Section of the National Electrical Manufacturers Association (NEMA), Trade Association for United States Manufacturers of Dry Cell Batteries, en www.nema.org, EEUUA.
- National Electrical Manufacturers Association, NEMA (2003): Button Cell Battery Collection: Why it does not make sense, en www.nema.org, EEUUA.
- NRDC (2006): NRDC Submission to UNEP in Response to March 2006 Request for Information on Mercury Supply, Demand and Trade, en www.chem.unep.ch, China.
- Noréus D. (2000): Substitution of Rechargeable NiCd Batteries: A Background Document to Evaluate the Possibilities of Finding

- Alternatives to NiCd Batteries. Arrhenius Laboratory, Stockholm University, pp. 5-35.
- OECD (1999): Proceedings of the OECD Workshop on the Effective Collection and Recycling of Nickel-Cadmium Batteries. ENV/JM/MONO (99)17.
 - Ometto, A., Guelere, R., Filho, A, Souza, M. (2006): Implementation of Life Cycle Thinking in Brazil's Environmental Policy. Environmental Science & Policy, **9(6)** 587-592 .
 - Organización Mundial de la Salud, OMS (1981): Environmental Health Criteria 17: Manganese. WHO Library Cataloguing in Publication Data.
 - Organización Mundial de la Salud, OMS (1989): Environmental Health Criteria 86: Mercury, Environmental Aspects. WHO Library Cataloguing in Publication Data.
 - Organización Mundial de la Salud, OMS (1991): Environmental Health Criteria 108: Nickel. WHO Library Cataloguing in Publication Data.
 - Organización Mundial de la Salud, OMS (1992): Environmental Health Criteria 135: Cadmium, Environmental Aspects WHO Library Cataloguing in Publication Data.
 - Organización Mundial de la Salud, OMS (2000): Air Quality Guidelines for Europe. 2nd Edition. WHO Regional Publications, European Series Num 91. World Health Organization, Regional Office for Europe, Copenhagen.
 - Organización Mundial de la Salud, OMS (2001): Environmental Health Criteria 221: Zinc; WHO Library Cataloguing-in-Publication Data.
 - Organización Mundial de la Salud, OMS (2004): Manganese in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.
 - Ortiz, A. (1995): Carcinogenesis por óxido de níquel en 2 líneas de ratones consanguíneos. Revista Cubana de Oncología, enero-junio, 1995.
 - Panasonic (2005): NiCd Handbook. Panasonic Inc. U.S.A.
 - Panero, S., Romoli, C., Achilli, M., Cardarelli, E., Scrosati, B. (1995): Impact of Household Batteries in Landfills. Journal of Power Sources. Proceedings of Battery Recycling '95, **57(1-2)**, 9-12.

- Park, P., Tahara, K., Inaba, A.(2006): Product Quality-based Eco-Efficiency Applied to Digital Cameras. Journal of Environmental Management. In Press, Corrected Proof, available online 12 May 2006.
- Pennington, JA; Young, BE; Wilson, DB. (1989) Nutritional elements in U.S. diets: results from the Total Diet Study, 1982 to 1986. J Am Diet Assoc 89:659-664.
- Philippe, A. (2001): Possible Substitution of the Nickel-Cadmium Batteries. CollectNiCad AISBL, University of Liege, Bruselas, Bélgica, en: Associação Portuguesa dos Grossistas e Importadores de Material Eléctrico, Electrónico, Electrodoméstico, Fotográfico e de Relojoaria, AGEFE (2003): AGEFE 's Oficial Statement on the Consultation of European Comisión DG ENV on Battery Directive. Lisboa, Portugal.
- Pietrelli, L., Bellomo, B., Fontana, D., Montereali, M. (2005): Characterization and Leaching of NiCd and NiMH Spent Batteries for the Recovery of Metals. Waste Management, 25(2), 221-226.
- Plachy, J. (2003): Cadmium. U.S. Geological Survey Minerals Yearbook, 2003.
- Prasad, A. (1993) Essentiality and toxicity of zinc. Scand J Work Environ Health 19(Suppl 1):134-6.:134-136.
- Primary Batteries (2003) en: www.ecolabel.dk.
- PROFECO (2006): El laboratorio PROFECO reporta: Pilas recargables. Revista de la Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO), julio 2006, pp. 48-51.
- PROFECO (2006): Eco consumo Pilas: ¿Las tiro o las acopio? Revista de la Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO), julio 2006, pp. 66-70.
- PROFECO (2006): Pilas Alcalinas. Revista de la Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO), marzo 2004, pp. 22-29.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, PNUMA (2002): Evaluación Mundial sobre el Mercurio. Programa Interorganismos para la Gestión Racional de las Sustancias Químicas.
- Proyecto de Norma Mexicana PROY-NMX-AA-000-SCFI-2006 (2006): Procedimiento para la obtención de muestras representativas y su manejo para el análisis de residuos en pilas con objeto de determinar su peligrosidad-certificación. Diario Oficial de la Federación.

- Public Law 104-142 (1996), 110 STAT. 1329. 104th US Congress.
- Rapti-Caputo, D., Vaccaro, C. (2006): Geochemical Evidences of Landfill Leachate in Groundwater. Engineering Geology **85**, 111-121.
- Rayner-Canham, F. (2000): Química Inorgánica Descriptiva. Segunda Edición. Pearson Education, México.
- Reh C, Kang D, Herrera-Moreno V. (2001). Mercury Exposures During the Recycling/Reclamation of Household-type Alkaline Batteries. Applied Occupational and Environmental Hygiene **16(11)**, pp. 993-1005.
- Reimer P. S. (1999) Environmental effects of manganese and proposed freshwater guidelines to protect aquatic life in British Columbia [MSc thesis]. Vancouver, B.C., University of British Columbia.
- RIS International Ltd (2007): Canadian Consumer Battery Baseline Study.
- Robinson, J. (2003): Alkaline Battery Recycling At The University Of Waterloo. University Of Waterloo. Department Of Environmental Studies.
- Roll, M (2001): Battery Stewardship Duracell, The Gillette Company.
- Rogich, D. G. (2005): Research and Policy Implications of Material Flows. Presentación de la International Sustainability Workshop: 18-20 de mayo, 2005, Washington, D. C.
- Rondia, D. De Graeve, J. (1994): Environmental Risk Assessment of Zinc Arising from Disposal of Used Batteries with Municipal Solid Wastes. Environmental Toxicology Unit, University of Liege, Faculty of Medicine, Bélgica.
- Rosas, H. (2005): Valorización de Desechos Sólidos Municipales con Alto Poder Calorífico. Tesis de Licenciatura para obtener el título de Ingeniero Químico. Facultad de Química, UNAM.
- Ross & Associates Environmental Consulting, Ltd. (2006): Mercury Sources and Regulations. Appendix C: Regulations on Products that Contain Mercury.
- Rossouw, M., Thackeray, M. (1991): Lithium Manganese Oxides from Li_2MnO_3 for Rechargeable Lithium Battery Applications. Materials Research Bulletin, 26(6), 463-473.

- Rydh C., Sun M. (2005): Life Cycle Inventory Data for Materials Grouped According to Environmental and Material Properties. Journal of Cleaner Production **(13)** 1258-1268.
- Rydh C., Svard B. (2003): Impact on global metal flows arising from the use of portable rechargeable batteries. The Science of the Total Environment **302** 167-184.
- Rydh, C. (2001): Life Cycle Inventory of Recycling Portable Nickel-Cadmium Batteries. Resources, Conservation and Recycling 34, 289-309.
- Sandstead, H. (1994) Understanding zinc: recent observations and interpretations. J Lab Clin Med 124:322-327.
- Schroeder WH, Dobson M, Kane DM (1987) Toxic trace elements associated with airborne particulate matter: a review. Journal of the Air Pollution Control Association, 37:1267-1285.
- Secretaría de Economía (2005): Decreto por el que se Modifican Diversos Aranceles de la Tarifa de Ley de los Impuestos Generales de Importación y Exportación. Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría de Economía (2007): Sistema de Información Arancelaria Vía Internet (SIAVI) en www.economia.gob.mx.
- Semarnat (1999): Minimización y Manejo Ambiental de los Residuos Sólidos. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Dirección General de Manejo Integral de Contaminantes, primera edición. México.
- Semarnat (2005): NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Diario Oficial de la Federación.
- Semarnat (2005): NOM-053-SEMARNAT-2005, Norma Oficial Mexicana que Establece el Procedimiento para Llevar a Cabo la Prueba de Extracción para Determinar los Constituyentes que Hacen a un Residuo Peligroso por su Toxicidad al Ambiente. Diario Oficial de la Federación, fecha de publicación 22 de octubre de 1993.
- SEMARNAT (2006): Reforma a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.
- Shapek R. A (1995): Local Government Household Battery Collection Programs: Costs and Benefits. Resources, Conservation and Recycling **15**, pp. 1-7.

- Sharma, C., Pipatti, R., Yamada, M. (2006): Waste Generation, Composition and Management Data. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- Slack, R., Panagoula, Z., Janr, G., Nikolaos, V. (2005): Assessing Quantities and Disposal Routes for Household Hazardous Products in the United Kingdom. Environ. Sci. Technol., **39(6)**, pp. 1912-1919.
- Slack, R., Gronow, J., Voulvoulisa, N. (2005): Review Household Hazardous Waste in Municipal Landfills: Contaminants in Leachate. Science of the Total Environment **337**, 119– 137.
- Solórzano, G. (2002): Revisión y Análisis de las Experiencias de Argentina, Brasil, Colombia, Ecuador y México Respecto de los Cinco Elementos Claves para el Manejo Ambiental de Pilas y Baterías. Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental, CENICA MEXICO. Reporte final.
- Soto, S. (2005): Situación del Manejo de Desechos Sólidos en Costa Rica. Undécimo Informe sobre el Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible, en: www.estadonacion.or.cr.
- Spotniz, R., Juzkov, M. (1998): PolyStor Bets On Lithium-Ion An Interview. OMAHA, Nebraska, en: www.evworld.com
- Stokes PM, Campbell PGC, Schroeder WH, Trick C, France RL, Puckett KJ, LaZerte B, Speyer M, Hanna JE, Donaldson J (1988) Manganese in the Canadian environment. Ottawa, Ontario, National Research Council of Canada, Associate Committee on Scientific Criteria for Environmental Quality (NRCC No. 26193).
- Streets, D., Hao, J., Wu, Y., Jiang, J., Chan, M., Tian, H., Feng, X. (2005): Anthropogenic Mercury Emissions in China. Atmospheric Environment, **39** (40), 7789-7806.
- Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape, SAEFL (2001): Swiss Contribution to the Global Mercury Assessment as Initiated by UNEP en: www.unep.org.
- Tharr, D. (2001): Mercury Exposures During the Recycling/ Reclamation of Household-type Alkaline Batteries. Applied Occupational and Environmental Hygiene Vol. **16(11)** 993-1005.
- Ticianelli, E. (2001): Baterías de Níquel-Hidruro Metálico, una Alternativa para las Baterías de Níquel-Cadmio. Química Nova.

- Trade statistics, Ministry of Finance Japan (2006): Monthly Battery Export and Import Statistics by Region. Battery Association of Japan, en: www.baj.or.jp.
- Tromans, D., Meech, J., Veiga, M. (1996): Natural Organics and Environmental Stability of Mercury, Electrochemical Considerations. J. Electrochem. Soc., **143(6)**, 123-126.
- Tuxen, L. (2005): Framework for Inorganic Metals Risk Assessment (External Review Draft), US EPA.
- University of South California (2002): The Recycling: a Proper Disposal of Batteries. Institute for Public Service and Policy Research **4(1)**, 1-28.
- US-Environmental Protection Agency (1999): Cutting the Waste Stream in Half: Community Record-Setters Show How, EPA-530-F-99-017 en www.epa.gov.
- US-Environmental Protection Agency (1997): Implementation of the Mercury-containing and Rechargeable Battery Management. Act. US-EPA.
- US-Environmental Protection Agency (2005): Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States. EPA530-F-05-003.
- US-Environmental Protection Agency (2005): Introduction to treatment, storage and disposal facilities (40 CFR parts 264/265, subpart A-E). EPA530-K05-017.
- Vallee, BL; Falchuk, K. H. (1993): The Biochemical Basis of Zinc Physiology. *Physiol Rev* 73:79-118.
- Van Cauwenbergh, R., Hendrix, P., Robberecht, H., Deelstra H. (2004): Daily Dietary Lithium Intake in Belgium Using Duplicate Portion Sampling. *Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und -Forschung A*. Volumen 208(3) pp 153-155.
- Van Velzen, D., Herb, G. (2002): Mercury in Waste Incineration. *Waste Management and Research* **20**, 556-568.
- Vangheluwe, M., Verdonck, F., Versonnen, B. (2005): Contribution of Spent Batteries to the Metal Flows of Municipal Solid Waste. Final Report EURAS.

- Walsh, CT; Sandstead, H; Prasad, A; *et al.* (1994) Zinc: health effects and research priorities for the 1990s. Environ Health Perspect 102(Suppl 2):5-46.:5-46.
- Waste Watch (2002): Battery Recycling Information Sheet en: www.wasteonline.org.uk.
- Wichmann H. Kolb, M., Jopke, P., Schmidt, C., Alawi, M., Bahadir, M. (2006): Assessment of the Environmental Impact of Landfill Sites with Open Combustion Located in Arid Regions by Combined Chemical and Ecotoxicological Studies. Chemosphere, Article in press.
- Winder, M., Thornton, N., O'Melia, B., Henderson, S., Ferenz, D., David, M., Gute, P., Goldberg, T. (1992): Lead, Cadmium and Mercury in Hospital Solid Waste: A Scoping Study. Northeast Waste Management Officials' Association (NEWMOA).
- Windholz M, ed. (1983) The Merck index: An Encyclopedia of Chemicals, Drugs and Biologicals. Rahway, NJ, Merck and Company.
- Wittman, R., Hu, H. (2002). Cadmium Exposure and Nephropaty in a 28-year-old Female Metals Worker. Environmental Health Perspectives **110**, pp. 1261-1266.
- Yanase, R., Oho, S., Matsufuji, Y. Hanashima, M. (1996): Behavior of Mercury in Used Dry Batteries Buried in Landfill Sites. Urban City Cleaning vol. 49, 212 (Junio, 1996) p. 47 Universidad de Fukuoka.
- Zakrzewski, S. (1991): Principles of Environmental Toxicology. American Chemical Society Professional Reference Books, EEUU.
- Zenz, C., Dickerson, O.B , Horvath, E.P.(1994): Occupational Medicine. 3rd ed. St. Louis, MO.
- Zhang L., Wong M. (2006): Environmental Mercury Contamination in China: Sources and Impacts. Environment International. In Press, Corrected Proof, Available online 17 August 2006.
- Zhu N., Zhang L., Li C., Cai C. (2003): Recycling of Spent Nickel-Cadmium Batteries Based on Bioleaching Process. Waste Management **23(8)**, 703-708.

Páginas consultadas en la Internet

- rais.ornl.gov/tox/profiles/lith.shtml
- web2.airmail.com.net/uthman/elements_of_body.html
- www.ahkecuador.org
- www.ambiente-ecologico.com
- www.atsdr.cdc.gov
- www.bancomext.gob.mx
- www.batterydigest.com
- www.batterypoweronline.com
- www.batteryuniversity.comwww.blonnet.com
- www.britannica.com
- www.cawrecycles.orgwww.census.gov
- www.cepis.ops-oms.org
- www.cienciateca.com
- www.cristinacortinas.com
- www.depts.washington.edu
- www.des.state.nh.us
- www.diagnose-me.com
- www.drscope.com
- www.dti.gov.uk
- www.duracell.com
- www.economia-snci.gob.mx:8080/siaviWeb/siaviMain.jsp
- www.ecy.wa.gov
- www.ehso.com
- www.energizer.com
- www.envirogreen.co.uk
- www.epa.gov
- www.epbaeurope.net

- www.es.wikipedia.org
- www.euras.be
- www.evworld.com
- www.freedoniagroup.com
- www.gamatea.com
- www.gemi.org.mx
- www.globalsources.com
- www.hardingenergy.com
- www.home.howstuffworks.com
- www.ieeexplore.ieee.org
- www.inchem.org
- www.inegi.gob.mx
- www.informinc.org
- www.innovations-report.de
- www.intelegen.com
- www.iopa.sc.edu
- www.lenntech.com
- www.marvistavet.com
- www.metro-region.org
- www.monografias.com
- www.mpoweruk.com
- www.nema.org
- www.noharm.org
- www.pcmag.com
- www.profeco.gob.mx
- www.professional.duracell.com
- www.rbrc.org
- www.rosebatteries.org
- www.rsc.org/jem

- www.springboard4health.com
- www.the-infoshop.com
- www.unep.or.jp
- www.vdh.state.va.us/epi/publichealthtoxicology
- www.wasteonline.org.uk
- www.wikipedia.org
- www.wisegeek.com