

2
1 com.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**PROSPECCION MINERA Y PRINCIPIO DE EXPLOTACION
Y BENEFICIO PARA YACIMIENTOS DE TITANIO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

FALLA DE ORIGEN



INGENIERO DE MINAS Y METALURGISTA

P R E S E N T A :

R. ALBERTO FRIAS GHENO

1990



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 está 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.

INDICE

	Página
RESUMEN	1
CAPITULO I	
INTRODUCCION.	
I.1 OBJETO DEL TRABAJO	4
I.2 HISTORIA DEL TITANIO	6
I.3 QUIMICA DEL TITANIO	11
I.4 PROPIEDADES FISICAS DEL TITANIO	22
I.5 RESISTENCIA A LA CORROSION	24
I.6 EVOLUCION DEL MERCADO	31
CAPITULO II	
CLASIFICACION DE YACIMIENTOS MINERALES DE TITANIO.	
II.1 LINDGREN	40
II.2 BATEMAN, JENSEN Y BATEMAN	40
II.3 SMIRNOV	41
II.4 ROUTHIER	42
II.5 LEFOND	44
II.6 MITCHELL Y GARSUN	45
II.7 KUZVART Y EOHMER	46
CAPITULO III	
PRINCIPALES MODELOS DE LOS DEPOSITOS MINERALES DE TITANIO.	
III.1 ASOCIADOS A ROCAS BASICAS Y ULTRABASICAS	49
III.2 ASOCIADOS A ROCAS HIPERALCALINAS Y SUS CARBONATAS	70

III.3	ASOCIADOS A ROCAS METAMORFICAS	89
III.4	ASOCIADOS A PLACERES	94
III.5	ASOCIADOS A DEPOSITOS RESIDUALES.....	109

CAPITULO IV

CRITERIOS DE PROSPECCION MINERA.

IV.1	INTRODUCCION	116
IV.2	GUIAS GEOMORFOLOGICAS.....	117
IV.3	GUIAS LITOLOGICAS.....	119
IV.4	GUIAS GEOTECTONICAS	124
IV.5	METODOS GEOFISICOS	127
IV.6	GUIAS MINERALOGICAS	129

CAPITULO V

SINTESIS DE LOS METODOS DE EXPLOTACION

V.1	METODOS SUPERFICIALES DE EXPLOTACION DE MINAS ..	132
V.2	EXPLOTACION A TAJO ABIERTO	149
V.3	EXPLOTACION DE CANTERAS	161
V.4	GLORY-HOLE	162

CAPITULO VI

REVISION DE PROCESOS METALURGICOS.

VI.1	MINERALES Y PRODUCTOS DE TITANIO	173
VI.2	CONCENTRACION Y LIXIVIACION DE MINERALES DE TITANIO	177
VI.3	OBTENCION DEL TITANIO METALICO	183

CAPITULO VII

USOS, PRODUCCION Y POSIBILIDADES FUTURAS.

VII.1	USOS	193
	VII.2.1 Producción	195
	VII.2.2 Cotizaciones	197
VII.3	POSIBILIDADES FUTURAS	198
	CONCLUSIONES	199
	BIBLIOGRAFIA	206

R E S U M E N

La importancia que tiene el titanio en el presente siglo se debe principalmente a que se ha incrementado su uso. Independientemente de sus aplicaciones clásicas, tales como en la pigmentación de pinturas o blanqueadores, los avances en el campo científico y tecnológico han permitido aprovechar de mejor manera las importantes propiedades físicas y cualidades que presenta este metal, (alta resistencia a la corrosión y altas temperaturas entre otras); de esta manera se ha logrado una gran diversidad de aplicaciones en el terreno industrial. Claro ejemplo de esto es la industria aeroespacial que, en los últimos años, ha sido la principal y más importante consumidora de titanio. Esto ha propiciado que este metal se convierta en uno de los elementos del futuro próximo, tanto desde el punto de vista industrial como estratégico.

En el presente trabajo se lleva a cabo una integración de los conocimientos que se tienen acerca del titanio, y cuya finalidad será la de orientar hacia la prospección, explotación y beneficio de una manera racional de los yacimientos titaníferos. Una síntesis del contenido, es la siguiente:

Las propiedades físicas, químicas y geoquímicas que presenta el titanio, permitirán comprender y localizar los medios ambientes geológicos favorables para la formación de yacimientos titaníferos.

Las principales clasificaciones de los yacimientos de titanio, aunque manifiestan los diversos criterios utilizados por sus autores, ayudan al prospector minero a orientar adecuadamente sus exploraciones.

Los diferentes marcos geológicos que rodean a los yacimientos minerales de titanio de una manera constante, permiten agru

par sus principales características, con objeto de elaborar una clasificación de modelos. El conocimiento de cada modelo, es útil para entender mejor el yacimiento, así se podrá lograr un óptimo aprovechamiento de la mena.

Los yacimientos de titanio comercialmente más importantes son los asociados a rocas básicas y ultrabásicas y a placeres de playa; le siguen los depósitos asociados a rocas alcalinas y sus carbonatitas y algunas rocas metamórficas. En algunos países, los minerales del titanio se obtienen como subproducto de la bauxita en depósitos residuales.

Las guías de prospección son fundamentales en la búsqueda y localización de yacimientos minerales, ya que sugieren directa o indirectamente la presencia de un determinado yacimiento.

En la prospección de depósitos de placer de titanio, las guías geomorfológicas son las más indicadas. Para los yacimientos de titanio asociados a rocas, se utilizan las guías litológicas, geotectónicas, geofísicas y mineralógicas principalmente.

En la explotación de los yacimientos titaníferos se emplean métodos de minado superficial, utilizando principalmente el método de minado en tajos abiertos y el minado de depósitos de placer.

El beneficio de los minerales del titanio (sobre toda la ilmenita), requiere de técnicas muy sofisticadas, para lo cual se tiene el proceso Kroll, Hunter y/o una cloruración en combinación con una lixiviación.

Por otra parte, en lo que respecta a México, en cuanto al desarrollo, prospección y explotación de los yacimientos minerales de titanio, éste ha sido escaso; no obstante contar con las condiciones ambientales y geológicas adecuadas para la formación o existencia de depósitos titaníferos. Sin embargo, debido a las posibilidades futuras que presenta este metal, es posible que la exploración y explotación de estos yacimientos empiece muy pronto, sobre todo, porque es una alternativa económica muy importante.

CAPITULO 1

INTRODUCCION

- 1.1 OBJETO DEL TRABAJO
- 1.2 HISTORIA DEL TITANIO
- 1.3 QUJMICA DEL TITANIO
- 1.4 PROPIEDADES FISICAS DEL TITANIO
- 1.5 RESISTENCIA A LA CORROSION
- 1.6 EVOLUCION DEL MERCADO

1.1 OBJETO DEL TRABAJO.

En la economía de México la minería tiene una importancia capital, pues la explotación de la fluorita, oro, plata, plomo zinc, cobre, arsénico y mercurio, entre otros, genera ingresos por varios cientos de miles de millones de pesos.

Históricamente, con la producción de plata, México se ha colocado como el primer productor mundial; con los metales plomo y zinc, también ocupa lugares de consideración en cuanto a la producción mundial (segundo y tercer lugar, respectivamente).

Es necesario incrementar la exploración y la explotación de los recursos mineros. La exploración sistemática de provincias metalogénicas podría contribuir al descubrimiento de yacimientos minerales que se integrarían como nuevos distritos mineros a la actividad económica.

Es imprescindible canalizar recursos a la exploración, minado y beneficio no sólo de los metales tradicionales sino también de los metales o materias primas cuya importancia actual y, especialmente, cuya demanda proyectada hacen de ellas materias estratégicas para el país.

Dentro de estos materiales, se encuentra el titanio, cuya aplicación y desarrollo en la tecnología es múltiple. Este metal se utiliza en aleaciones, cerámicos y materiales compuestos; la demanda mundial actual es de un millón seiscientos mil toneladas, la demanda proyectada (año 2001) es de cuatro millones de toneladas. Por su uso, el titanio se ha designado en un principio como el "metal para el aire" y en segunda etapa de utilización como "metal para el mar", estas designaciones caracterizan las metas tecnológicas de países como los Estados Unidos y Japón.

En México se hace necesario intensificar los pocos trabajos

de exploración y reconocimiento geológicos que a nivel paratectal (CRM) se han hecho sobre este metal. En el país se tienen determinadas zonas de interés; por ejemplo, los yacimientos en roca en la región de Pluma Hidalgo, Oax., en Coyutlán, Col., en yacimientos secundarios en la forma de arenas negras en los estados de Coahuila, Chihuahua, Guerrero y Oaxaca, entre otros.

Para compensar el atraso tecnológico del país se requiere de nuevas materias primas con las que se elaboren los instrumentos, maquinarias y bienes que den la posibilidad de mantenerse cerca de tecnologías-punta, y en los que ya se está trabajando a escala de laboratorio o en plan piloto en diversas partes del planeta. En estas materias primas participa, como ya se ha señalado, en gran medida el titanio.

El objeto de este trabajo es el de llevar a cabo un análisis, lo más exhaustivo posible, de los puntos más importantes para la prospección, así como también las características y necesidades de la explotación y beneficio del titanio. Se consideran su historia, sus propiedades químicas y físicas, también se tienen en cuenta los criterios y tipos de clasificación de los yacimientos minerales correspondientes al titanio, los principales modelos genéticos del mismo, y para finalizar, el enfoque geológico con los criterios o vías de prospección minera. La segunda parte del objetivo (y de lo que menos se ha hecho en el país) se compone de una presentación de los métodos de explotación y de los procesos metalúrgicos de beneficio del titanio.

1.2 HISTORIA DEL TITANIO.

El titanio fue identificado por primera vez como un constituyente de la corteza terrestre en la última década del siglo XVIII. En 1791 William Gregor, un clérigo mineralogista inglés descubrió una arena negra magnética (ilmenita) que él llamó meccanita. En 1795, un químico alemán, Klaproth, encontró que un mineral húngaro (rutilo) era el óxido de un nuevo elemento, que él denominó Titán en honor del héroe mitológico del mismo nombre de la Grecia Antigua. En los inicios del siglo XX se desarrolló un proceso de purificación de sulfato para obtener comercialmente TiO_2 de alta pureza, para la industria de los pigmentos y llegó a estar disponible tanto en Estados Unidos como en Europa; durante este período, también se utilizó como un elemento para aleaciones en hierro y acero. En 1910, 99.5% del titanio puro se produjo en la compañía General Electric a partir de tetracloruro de titanio y sodio en un recipiente de acero al vacío. Como el metal no tenía las propiedades deseadas se desaprobaron trabajos adicionales. Sin embargo, esta reacción formó la base para el proceso comercial de reducción de sodio. En los años veintes se preparó titanio dúctil con un método de disociación de yoduro combinado con el proceso de reducción de Hunter.

En los principios de los años 30 se desarrolló un proceso al vacío de magnesio para la reducción de tetracloruro de titanio ($TiCl_4$) a titanio metálico. Basado en este proceso el Buró de Minas de los Estados Unidos inició un programa, en 1940, para desarrollar la producción comercial. Algunos años después, el Buró de Minas publicó un trabajo sobre el titanio e hizo muestras disponibles para la comunidad industrial. Para 1948 produjo muestras de 104 Kg. En el mismo año E. I. Dupont de Nemours and Co. Inc., anunció la disponibilidad comercial de titanio; así la moderna industria de los metales de titanio comenzó.

Para la mitad de los años cincuenta, esta nueva industria de metales estaba bien establecida, con seis productores, otras dos compañías con plantas tentativas de producción y más de veinti cinco instituciones entregadas a proyectos de investigación. El titanio, llamado el metal maravilloso, fue anunciado como el sucesor del aluminio y del acero inoxidable. Cuando en los cin cuenta el DOD (el partidario más firme del titanio) cambió el énfasis de las aeronaves a los proyectiles dirigidos, la deman da por el titanio declinó fuertemente. Sólo dos de las plantas originales del metal titanio están en uso, la planta de la Ti tanium Metals Corporation of America (TMCA) en Henderson, Ne va da, y la planta de reducción de sodio de dos etapas de la Na tional Distiler and Chemical Corporation, construidas a fi nales de los años cincuenta en Ashtabulla, Ohio.

El exceso de optimismo seguido por la decepción ha caracterizado a la industria de los metales del titanio. En los fi nales de los años sesenta el futuro parecía de nuevo brillante, los transportes supersónicos y las plantas desalinadoras fue ron pensadas para utilizar grandes cantidades de titanio. La Oregon Metallurgical Corporation, un fundidor de ti tano, decidió en ese tiempo llegar a ser un productor completamente inte gral (i.e. desde la materia prima hasta la producción en fá bbrica).

Sin embargo, los transportes supersónicos y la industria de sa linadora no crecieron como se esperaba; no obstante, a fi nales de los setenta y principios de los ochenta la demanda del metal titanio de nuevo excedió la capacidad y tanto los Est ados Unidos como Japón ampliaron sus capacidades. Este cre cimiento fue estimulado por la enorme aceptación del titanio en la industria de procesos químicos, en las necesidades de la ind ustria generadora de energía para el enfriamiento de agua de ma r y las demandas de aeronaves comerciales y militares. Sin em bar go, con la recesión económica de 1981-83 la demanda descendió

muy por abajo de la capacidad y la industria una vez más se enfrentaba con tiempos difíciles.

Los cuerpos minerales de titanio están distribuidos uniformemente en todos los continentes. Ocurren ya sea como depósitos en roca dura, magnéticos en origen o como depósitos secundarios de placer. (Ver tablas I.1 y I.2).

TABLA I.1 DEPOSITOS MINERALES DE TITANIO EN ROCA DURA

Localidad	Compañía	Grado mineral % TiO_2	Recursos Cont. Ti millones ton.
BRASIL			
Minas Gerais		23-27	85
CANADA			
Allard Lake	QIT fer et Titane (b)	33.8	26
St. Urbain		38	5
Terrebone	Canadian Nickel Co. (c)	20	6
Alberta	Sun Corp. (d)	0.35	Muy grande
FINLANDIA			
Otarvaki	Reuraruuki	9-10	3
NORUEGA			
Tollnes	Titania A/S	18	33
ESTADOS UNIDOS			
Tahawas, N.Y.	NI Industries	17	6
Colorado	Dumas Oil & Gas Co. (e)	12	27
Minnesota		10	12
Wyoming		20	5
UNION SOVIETICA			
Verania	Verkhnedneprosk Ishansk		4

a.- Depósitos de anatasa.

b.- 75% mena de alto grado (33.8% de TiO_2) el resto mena de bajo grado (6% de TiO_2)

c.- 30% mena de alto grado (20% de TiO_2) el resto mena de bajo grado (6% de TiO_2).

d.- Arenas bituminosas de Alberta. Están estimadas 1500 millones de ton. - métricas de arenas bituminosas que tienen 0.17% de Ti como rutilo, anatasa e ilmenita. Este depósito contiene también alrededor de 500 millones de ton. de zr.

e.- Depósito de perovskita.

Fuente: Kilk, Othmer, 1983.

TABLA 1.2 DEPOSITOS MINERALES DE TITANIO EN PLACERES.

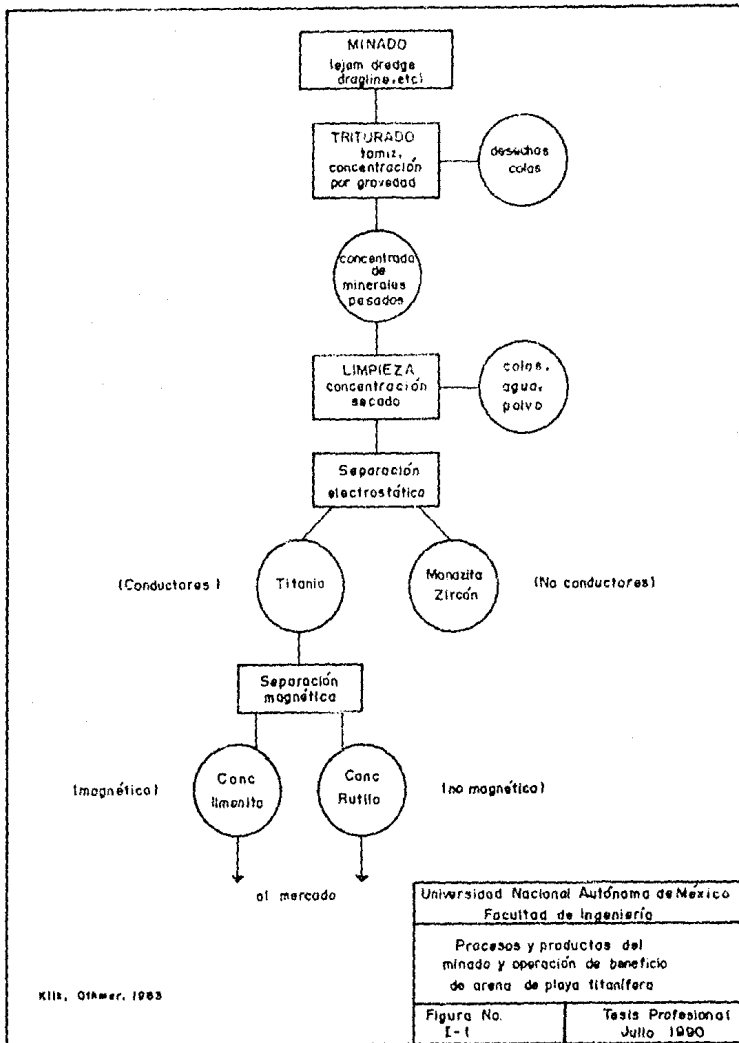
Localidad	Compañía	Reservas		
		Cont. de Ti y Zr mill. ton.		
		Ilmenita	Rutilo	Zircón
AUSTRALIA				
Costa Oriental	AMC, Ltd.		0.9	0.2
	MD, Ltd.	0.4	0.5	0.2
	CR, Ltd.		0.5	0.4
	RZ Mines, Ltd.	0.2	0.2	0.3
	MEP, Ltd.		0.2	
Costa Occidental	AMC, Ltd.	5.2	1.3	2.6
	WSTG	3.6	0.2	6.6
	Cable Sands, Ltd.	1.1		0.2
	Allied Encabba, Ltd.	1.6	0.5	1.1
	Western Mining, Ltd.	0.3		
Metals Exploration	0.2		0.3	
BRASIL				
Paraíba	Estatai	0.9	0.1	
INDIA				
Chavara	Kerala M & M, Co.	12.6	1.7	
Orissa	Indian RE, Ltd.	11.2	1.5	
Otras	Indian RE, Ltd.	22.0	2.3	5.0
SIERRA LEONA				
	Sierra Rutile, Ltd.		1.7	
SUDAFRICA				
Richards Bay	RB Minerals org.	7.3	1.4	1.8
Otras		23.0	1.8	1.8
SRI LANKA				
Pulmoddai	SL Mineral Sands	0.9	0.2	0.1
ESTADOS UNIDOS				
Florida, Georgia	E.I. du Pont	5.4		
Florida	AMC, Ltd.	0.3	0.2	
Nueva Jersey	Asarco, Inc.	1.5		
T O T A L		97.7	15.2	14.6

Fuente: Kilk, Othmer, 1983.

El titanio contenido en los depósitos de placer está próximo a los 100 millones de toneladas métricas como ilmenita y a las 15 millones de toneladas métricas como rutilo. Los depósitos de roca dura contienen más de 200 millones de toneladas métricas excluyendo a las arenas oleaginosas de Alberta, que contienen más de 2000 millones de toneladas métricas de titanio.

En 1972, alrededor de los dos millones de toneladas métricas de la capacidad minada de ilmenita se concentró en cuatro depósitos minerales de roca dura explotados por QIT Fer et Titane, Inc. (Allard Lake, Canada) y NL industries (Tollnes, Noruega; Tahawas, N.Y.; y Otanmaki, Finlandia). La mena de titanio es concentrada por gravedad y separada magnéticamente para producir un concentrado de 45% de TiO_2 . Todas las operaciones de minado de roca dura, excepto en Allard Lake; QIT Fer et Titane, Inc. embarcan concentrados de la mina con TiO_2 al 35% a una fundición donde la mena se reduce para producir lingotes de hierro y una escoria de TiO_2 al 71% (escoria Sorel). A esta escoria se le llama escoria titanífera. El 51% de la capacidad a minar de ilmenita está en depósitos de placer en Australia (42%) República de Sudáfrica (18%), India (18%), Estados Unidos (13%) y Sri Lanka y Malasia (9%). Todo el rutilo a minar se encuentra en depósitos de placer, 58% en Australia, 20% en Sierra Leona y 11% en la República de Sudáfrica.

La recuperación de titanio a partir de los depósitos de placer se muestra en la figura I.1. La mena de titanio concentrada a partir de ilmenita varía desde 45% de TiO_2 en roca dura y en algunos depósitos de placer hasta el 64% de TiO_2 , (en algunos depósitos de placer en Florida). El rutilo tiene alrededor del 95% de TiO_2 . El análisis químico de algunas concentraciones seleccionadas de mineral titanio se dan en la Tabla I.3.



Klik, Qthwer, 1983

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Procesos y productos del
minado y operación de beneficio
de arena de playa titanífera

Figura No.
I-1

Tesis Profesional
Julio 1990

TABLA 1.3 ANALISIS DE CONCENTRADOS MINERALES DE TITANIO, PESO EN POR CIENTO.

Constituyente	Ilmenita					Rutilo Austr. Orien.
	Florida	Placeres		R. dura	Escoria Sorel	
		Austr. Occid.	Sri Lanka	Nueva York	Canadá	
TiO ₂	64.10	55.30	53.45	44.40	71.00	96.40
ZrO ₂		0.10	0.16	0.01		0.30
FeO	4.70	26.70	20.45	36.70	13.00	
Fe ₂ O ₃	25.60	15.40	22.18	4.40		0.25
P ₂ O ₅	0.21	0.04	0.21	0.07	0.33	0.02
SiO ₂	0.30	0.20	0.52	3.20		0.56
Cr ₂ O ₃	0.10	0.03	0.09	Traza	0.20	0.15
Al ₂ O ₃	1.50	0.38	0.58	0.19	5.70	0.17
V ₂ O ₅	0.13	0.08		0.24	0.59	0.61
MnO	1.35	1.64	0.93	0.35	0.22	Traza
CaO	0.13	0.17		1.00	1.00	0.05
MgO	0.35	0.29	1.46	0.80	5.00	0.04

Fuente: Kilik, Othmer, 1983.

I.3 QUIMICA DEL TITANIO.

En un estudio de la naturaleza del presente, es necesario analizar el esquema de clasificación, o forma de agrupación de los elementos de modo que sus propiedades puedan relacionarse a su comportamiento geológico.

La agrupación fundamental de los elementos es la clasificación periódica propuesta por Mendeleev en 1869. Basada originalmente en las propiedades químicas observadas en las reacciones comunes del laboratorio, especialmente en las propiedades de valencia; la clasificación de Mendeleev ha probado ser una expresión de las regularidades en el arreglo de los electrones en las estructuras atómicas. Su importancia en la química ha aumentado a través de los años y es apenas menos importante en

la geoquímica. Algunas relaciones geoquímicas sin duda, no son expresadas en la ley periódica pero en general ésta es la clasificación básica a la que se refieren todas las otras.

Las intrincadas relaciones entre las estructuras electrónicas de los átomos que formula la ley periódica puede expresarse de diversas maneras. En la tabla 1.4 se muestra un arreglo compuesto por secuencias horizontales de elementos; son las filas o períodos de las tablas y las secuencias verticales son las columnas o grupos. El número bajo cada símbolo es el número atómico que es igual al número total de electrones en el átomo neutro (y también al número total de cargas positivas en el núcleo atómico). El elemento titanio está localizado en el período 4 y pertenece además al grupo 4 b, su número atómico es 22, que expresa la cantidad de electrones ligados al núcleo por la influencia de estas cargas y que giran a su alrededor por distintas órbitas.

Los electrones están dispuestos en forma determinada alrededor del núcleo y dan lugar a una configuración electrónica característica: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^2$, es decir la llamada capa K, la más próxima al núcleo tiene dos electrones; la segunda denominada capa L tiene 8 electrones; le sigue la capa M también con 8 electrones y la capa N con 4 electrones.

Las propiedades químicas de los átomos las define principalmente la constitución de la capa electrónica más externa o cortical. Esta condición está indicada en la tabla por los números romanos colocados en la parte superior de las columnas; se refiere al número de electrones en las capas exteriores de los átomos o a los electrones de valencia, los electrones que se comparten o que se transfieren durante la formación de los enlaces químicos y por tanto son los más importantes en la determinación del comportamiento químico de un elemento.

En todos los elementos de los grupos I, II y III los elec-

	IA	IIA	METALES										IIIA	IIIA	IVA	VA	VA	VA	VA	0	
Grupo																					
Periodo																					
1	H																				He
2	Li	Be	METALES DE TRANSICION										B	C	N	O	F	Ne			
3	Na	Mg	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII B	IX B	X B	XI B	XII	I B	II B	Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Gd	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	(Tc)	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe			
6	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	(At)	Rn			
7	(Fr)	Ra		Ku	Hg																
	87	88		104	105																

Los elementos cuyos simbolos están entre paréntesis no ocurren en la naturaleza sino que han sido preparados artificialmente por medio de reacciones nucleares

Kraus, Konrad Eder, 1972

Tabla I-4 Clasificación Periódica de los elementos

UN AM	FACULTAD DE INGENIERIA	TESIS PROFESIONAL Julio de 1990
-------	------------------------	---------------------------------

trones de valencia están en los orbitales S y P. En el centro de la tabla periódica en los periodos 4, 5 y 6 hay diez elementos en cada uno donde los orbitales han sido ocupados. Estos elementos se llaman de transición.

El número cuántico principal N de los orbitales D de los elementos de transición tiene un valor de una unidad menor que la de los orbitales más elevadamente ocupados S y P. Por tanto los elementos de transición del cuarto periodo (en el que se encuentra el titanio) son elementos 3D.

El titanio tiene dos electrones de valencia y dos electrones en la capa debajo de la capa de valencia. Puesto que el número de valencia es bajo, se trata de un metal. Presenta tres estados de oxidación en sus compuestos químicos debido a los dos electrones del orbital D que tienen casi la misma energía que la de los electrones de la capa exterior y en algunos compuestos pueden actuar como electrones de valencia adicionales. Las propiedades químicas de los elementos en la columna IVB - presentan relaciones bastante próximas. Algunos de estos elementos tienen una relación débil con los elementos del grupo principal IV A.

El titanio es un metal de color argentino brillante, es más ligero que el acero pero más fuerte que éste y que el aluminio resiste a la corrosión y a las altas temperaturas; presenta alta conductividad para el calor y la electricidad. En la tabla 1.5 figuran algunas propiedades de los elementos de la transición del periodo 4.

TABLA 1.5 ALGUNAS PROPIEDADES DE LOS ELEMENTOS DE TRANSICION DEL PERIODO 4.

	Sc	Ti	V	Cr
Peso atómico (uma)	44.96	47.90	50.94	51.99
Punto de ebul. (°C)	2 730	3 260	3 450	2 665
Punto de fusión (°C)	1 530	1 668	1 900	1 875
H fusión (Kcal/mol)	3.8	3.7	4.2	3.3
Hvaporización (Kcal/mol)	81	106.5	106	72.97
Densidad (g/ml)	3.0	4.51	6.1	7.19
Radio atómico (A)	1.62	1.47	1.34	1.27

Fuente: Choppin, Jaffe y Jackson, 1975.

Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn
54.94	55.85	58.93	58.71	64.54	65.37
2 150	3 000	2 900	2 730	2 595	906
1 245	1 536	1 495	1 453	1 083	419.5
3.50	3.67	3.64	4.21	3.11	1.76
53.7	84.6	93	91.0	72.8	27.4
7.43	7.86	8.9	8.9	8.96	7.14
1.26	1.26	1.25	1.24	1.28	1.38

Obsérvese que estos metales son más densos y tienen puntos de fusión y ebullición, así como entalpías de fusión y de vaporización más altos que los elementos de los grupos I, II y III. Estos metales tienen gran resistencia a la tensión. Todas estas propiedades sugieren una covalencia entre los átomos de los metales en el estado sólido.

El titanio tiene una gran importancia práctica especialmente en metalurgia pues contribuye a la total eliminación del oxígeno y nitrógeno en la fundición de acero con lo cual se obtiene un acero perfectamente homogéneo transmitiéndole dureza

y elasticidad.

Se denomina diamagnética a una sustancia que no es atraída por un campo magnético. Los compuestos simples de los iones de los tres primeros grupos son todos diamagnéticos.

Una sustancia atraída por un campo magnético se llama paramagnética. Muchos compuestos de los elementos de transición son paramagnéticos. Un electrón que gira alrededor de su propio eje por ser una partícula con carga, produce un campo magnético. El campo magnético de un electrón desapareado y origina el paramagnetismo. Así los electrones desapareados en los orbitales de los elementos de transición causan su paramagnetismo.

El paramagnetismo no se debe confundir con el ferromagnetismo que presenta el hierro y sus compuestos. El ferromagnetismo es mucho más fuerte que el paramagnetismo y existe espontáneamente. El paramagnetismo sólo se manifiesta en presencia de un campo magnético.

Es más abundante que algunos de los metales más conocidos, como el plomo y el cobre. Es difícil encontrarlo en la naturaleza como metal libre; se necesitan agentes reductores tan fuertes como el sodio y el magnesio para desplazarlos de sus compuestos. Por tanto, puede ser prácticamente desconocido como elemento nativo.

El titanio tiene estados de oxidación $2+$, $3+$ y $4+$. Sin embargo, el estado de oxidación $2+$ se oxida al aire a Ti^{3+} . Las soluciones con iones Ti^{3+} son buenos agentes reductores por la tendencia de este ion a oxidarse al estado $4+$. Los iones $4+$ de este elemento se hidrolizan en soluciones acuosas para formar oxidaciones.

Los iones que resultan de la atracción intensa de los iones $4+$, de muy alta densidad de carga, y el oxígeno se llaman io-

nes titanilo TiO_2^+ . El titanio se encuentra bastante difundido en la tierra; ocupa un noveno lugar dentro de los elementos más abundantes de la corteza terrestre en una proporción de 0.6%; y el cuarto más abundante de los elementos estructurales. Sin embargo, no se le encuentra en estado metálico en su forma natural.

En los minerales formadores de roca el titanio forma en los silicatos el mineral accesorio esfena o titanita, su ocurrencia puede dar lugar a grandes masas que se trabajan como una mina de titanio; por ejemplo, en el granate andradita variedades melanita y schorlamita; en el piroxeno titanaugita; en la anfíbola kaersutita; con el sodio y el hierro la aenigmatita, la astrophillita; como reemplazamiento isomorfo (por Al octaedral) en la muscovita y en la serie flogopita-biotita. En la estructura de los silicatos el titanio participa desde la más simple: nesosilicatos, hasta la más complicada en los tectosilicatos.

En los óxidos el titanio forma con el magnesio una serie de soluciones sólidas cuyos miembros extremos son la ilmenita y la geikielita. La ilmenita es un producto de segregación de alta temperatura en rocas plutónicas, grandes concentraciones residuales se encuentran en arenas, especialmente en arenas marinas; los trimorfos rutilo (TiO_2), anatasa y brookita, de los cuales el más importante, desde el punto de vista económico, es el rutilo. Ocurren concentraciones con otros minerales pesados en arenas; en la perovskita, en el ulbospinel. Algunos de estos compuestos son considerados gemas por el hombre. Además el titanio entra en la composición (varía desde componente mayor a menor) de todas las rocas comunes.

La meta clásica de la geoquímica en las palabras de V. M. Goldschmidt (1954) es "descubrir las leyes que controlan la distribución de los elementos individuales". Para muchos de los elementos metálicos raros el hecho más sorprendente de la dis-

tribución es su concentración local en las rocas que se llaman menas. Las leyes que controlan esta concentración extrema son demasiado efímeras. Goldschmidt sugiere otra clasificación, en parte basada directamente en distribuciones observadas. Esta clasificación es una respuesta tentativa a la pregunta teórica si la tierra en algún tiempo en el pasado estaba en su mayor parte fundida y si el material fundido al enfriarse se separó en una fase metal, una fase sulfuro y una fase silicato; ¿cómo podrían los elementos distribuirse por sí mismos en las tres fases? Una respuesta puede buscarse partiendo de argumentos teóricos y también partiendo de tres tipos de observaciones: -

- 1.- De la composición de meteoritos; asumiendo que los meteoritos tienen una composición similar promedio a la de la tierra primitiva y que sufren una diferenciación similar;
- 2.- Del análisis de metales fases escoria (silicatos) y mate (sulfuro) en las operaciones metalúrgicas;
- 3.- De la composición de rocas silicatadas, de menas de sulfuro y de las raras ocurrencias de hierro nativo encontrado en la corteza terrestre.

Desde el punto de vista teórico, se puede considerar primero la distribución esperada de elementos entre el hierro metálico y los silicatos. Los metales químicamente más activos que el hierro podrían combinarse probablemente con el sílice, y el sílice remanente podría reaccionar tanto como le fuera posible con el hierro.

Los metales menos activos que el hierro no tendrían oportunidad de formar silicatos, más bien permanecerían como metales libres con el hierro no combinado. En otras palabras, el destino de cualquier metal dado dependerá totalmente de la energía libre de formación de su silicato. Para la mayoría de los metales las energías libres de los silicatos no se conocen, pero en su lugar se puede utilizar, en una buena aproximación las energías libres de los óxidos, puesto que en la formación de un silicato la energía de la reacción $Me + 1/2 O_2 = MeO$

es siempre mucho mayor que la energía de la reacción



En la tabla 1.6 se enlistan las energías libres de formación de óxidos representativos. De la lista se puede predecir que los elementos por arriba del hierro irán preferentemente en la fase silicato (óxido) y aquéllos colocados debajo del hierro en la fase metálica. En teoría el metal titanio se encontrará en la fase silicato, pues el valor de la energía libre del óxido de titanio es mayor que la del óxido de hierro.

Si se considera el aspecto observación las composiciones de las tres fases (metal, sulfuro y silicato) en meteoritos y en productos de fundición son bien conocidos. En la tabla 1.7 se muestran algunos promedios generales para meteoritos, y un ejemplo de análisis de productos de fundición de una mena de cobre. La semejanza está lejos de lo perfecto, pero en general el comportamiento de los elementos menores es similar. La ocurrencia de los elementos en rocas silicatadas, en menas de sulfuro y en hierro nativo concuerdan bastante bien con la distribución observada en los análisis de meteoritos y fundición.

Esta clasificación usada en la tabla 1.8 es consistente claramente con los datos de las tablas 1.6 y 1.7. El titanio es un elemento que ocurre preferentemente con silicatos de acuerdo con los datos de la tabla 1.6, ya que está en su parte superior y está concentrado en las fases silicato de la tabla 1.7, por tanto es un elemento litófilo.

Tal agrupación de elementos puede a lo más expresar sólo tendencias, no relaciones cuantitativas. Los diferentes grupos se traslapan como le indica la ocurrencia de muchos elementos en más de una categoría. Es útil simplemente como una tosca expresión cualitativa del comportamiento geológico de los elementos.

TABLA 1.6 ENERGIAS LIBRES DE OXIDOS

	Energía libre de formación, kcal	
	A 25	A 827
CaO	- 144.4	- 124.7
ThO ₂	- 139.7	- 121.8
MgO	- 136.1	- 115.2
Al ₂ O ₃	- 126.0	- 105.7
ZrO ₂	- 123.9	- 105.8
UO ₂	- 123.3	- 107.0
TiO ₂	- 106.2	- 89.0
SiO ₂	- 102.3	- 85.2
VO	- 91.4	- 74.9
MnO	- 86.7	- 72.8
Cr ₂ O ₃	- 84.4	- 67.8
K ₂ O	- 77.0	- 48.6
ZnO	- 76.1	- 56.1
WO ₂	- 62.3	- 45.8
SnO ₂	- 62.1	- 42.1
FeO	- 60.1	- 48.0
MoO ₂	- 59.2	- 45.5
CoO	- 51.4	- 37.6
NiO	- 50.6	- 33.6
PbO	- 45.1	- 25.9
Cu ₂ O	- 35.0	- 21.8
PdO	- 16.8	- 1.1
HgO	- 14.0	
Ag ₂ O	- 2.5	

Fuente: Krauskopf, Konrad Bates, 1979.

Energías libres de formación por átomo de oxígeno, en kilocalorías. Los óxidos están dispuestos en orden de la disminución de la energía libre a 25°C.

TABLA I.7 CONCENTRACIONES DE ALGUNOS ELEMENTOS EN LAS FASES METÁLICAS, SULFURO, SILICATO DE METEORITOS Y EN LOS PRODUCTOS METALÚRGICOS DE LAS MENAS DE COBRE DE MANSFIELD.

	Meteoritos			Productos metalúrgicos			
	Fase metal	Fase Sulfuro (troilita)	Fase silicato	Metal hierro (lingotes)	Sulfuro (matecobre)	Silicato (escoria)	Polvo humero
Si	0.015	0	21.60	0.02	0.05	22.09	4.03
Al			1.83	0.05	0.00	9.11	
Fe	88.60		13.25	73.53	22.92	3.00	5.30
Mg			16.63	0.00	0.05	7.46	
Ca			2.07	0.003	0.001	13.50	
Na			0.82	0.10	0.10	0.64	
K			0.21		0.49	3.28	
P	1 800	3 000	700	18 400	0.00	300	50
Cr	3 000	1 200	3 900	0.00	0.00	40	0.00
Ni	84 900	1 000	3 300	17 200	2 800	500	20
Co	5 700	100	400	24 400	2 500	40	0.00
V	6		50	800	100	200	70
Ti	100	0.00	1 800	20	20	300	0.00
Zr	8	0.00	95				
Mn	300	460	2 050	0	6 400	2 000	10
Cu	200	500	2	64 400	462 000	2 340	30 000
Pb	56	20	2	20	2 200	200	100 000
Nz	115	1 530	76	8	16 800	3 700	400 000
Ag	5	19	0.00	150	2 520	0.00	300
Au	2	0.5	0.00	8	0.65	0.00	0.00
Pt	16	3	0.00	8	0.00	0.00	0.00
Sn	100	15	5	80	0.00	0.00	0.00
W	8	Traza	18	0.00	0.00	30	0.00
Mo	17	11	3	66 400	0.00	20	5

Fuente: Krauskopf, Konrad Bates, 1979.

TABLA 1.8 CLASIFICACION GEOQUIMICA DE GOLDSCHMIDT DE LOS ELEMENTOS.

Siderófilos	Calcófilo	Litófilo	Atmófilo
Fe Co N	Cu Ag(Au)	Li Na K Rb Cs	H N(C)(O)
Ru Rh Pd	Zn Cd Hg	Be Mg Ca Sr Ba	(F)(Cl)(Br)(I)
Re Os Ir Pt Au	Ga In Tl	B Al Sr ETR	Gases inertes
Mo Ge Sn C P	(Ce)(Sn)Pb	(C)Si Ti Zr Hf Th	
(Pb)(As)(W)	As Sb Bi	(P)V Nb Ta	
	S Se Te	O Cr W U	
	(Fe)(Mo)(Re)	(Fe)Mn	
		F Cl Br I	
		(H)(Tl)(Ga)(Ge)(N)	

Fuente: Krauskopf, Konrad Bates, 1979.

En la tabla 1.8 un símbolo entre paréntesis indica que el elemento pertenece primeramente a otro grupo, pero tiene algunas características que lo relacionan a ese grupo. Por ejemplo el oro es predominantemente siderófilo, pero (Au) aparece en el grupo calcófilo, puesto que el oro se encuentra con frecuencia en vetas de sulfuros.

ETR = Elementos de tierras raras.

1.4 PROPIEDADES FISICAS DEL TITANIO.

En la tabla 1.9 se dan las propiedades físicas del titanio. La propiedad física más importante desde el punto de vista comercial es la razón de su resistencia [resistencia última 690 Mpa, (1000 psi)] en una densidad de 4.507 g/cm^3 . Las aleaciones del titanio tienen un rendimiento más alto en la relación resistencia/densidad (varía entre -200 y 540°C) que las aleaciones del aluminio o las del acero. Las aleaciones del titanio pueden hacerse con resistencia equivalente a la alta resistencia del acero, aun con una densidad del orden del 60 por ciento que las aleaciones del hierro. A temperatura ambiente la razón resistencia/peso del titanio es igual a la del magnesio, 1.5 veces más grande que la del aluminio, dos veces más grande que la del acero inoxidable y tres veces más grande que la del níquel. Las aleaciones del titanio tienen cocientes de mucho más alta resistencia que las aleaciones del níquel, del aluminio o del magnesio y del acero inoxidable. Debido a su alto poder de fusión, el titanio puede alearse para mantener buena resistencia por arriba de los límites útiles de las aleaciones del magnesio y del aluminio. Esta propiedad da al titanio una posición única en las aplicaciones entre 150 - 550°C donde el cociente resistencia: peso, es el criterio exclusivo.

TABLA 1.9 PROPIEDADES FISICAS DEL TITANIO.

Propiedad	Valor
Punto de fusión, °C	1668+-5
Punto de ebullición, °C	3260
Densidad, g/cm ³	
Fase a 20°C	4.507
Fase a 885°C	4.35
Transformación alotrópica, °C	882.5
Calor latente de fusión, KJ/Kg	440
Calor latente de transición, KJ/Kg	91.8
Calor latente de vaporización, MJ/Kg	9.83
Entropía a 25°C, J/mol	30.3
Coefficiente de expansión térmica a 20°C	8.4 x 10 ⁻⁶
Conductividad térmica a 25°C, W/(m.K)	21.9
Emisividad	9.43
Resistividad eléctrica a 20°C, n.m.	420
Susceptibilidad magnética, mks	180 x 10 ⁻⁶
Módulo de elasticidad, GPa	
Tensión	Aprox. 101
Compresión	103
Cizalla	44
Razón de Poisson	0.41
Constante reticular, nm	
,25°C	a=0.29503
	c=0.46531
,900°C	a=0.332
Presión de vapor, kPa	log P kPa=5.7904-240644/T- -0.000227(T)
Calor específico, J/(Kg.K)	C _p =669.0-0.037188T- -1.080(10) ⁷ /T ²

Fuente: Kilk, Othmer, 1983.

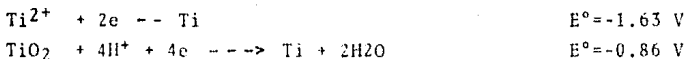
El titanio existe en dos formas cristalinas alotrópicas. La fase α estable bajo los 882.5°C es una estructura exagonal de empaquetamiento cerrado, mientras que la fase β , una estructura cristalina cúbica de cuerpo descentrado que es estable entre 882.5°C y el punto de fusión de 1668°C . La fase β de alta temperatura puede encontrarse a temperatura ambiente cuando los elementos estabilizantes β se presentan como impurezas o adiciones. Las fases α y β pueden distinguirse examinando una superficie pulida con luz polarizada. La fase α es ópticamente activa y cambia de claro a oscuro mientras la platina del microscopio se gira. Es difícil de interpretar la microestructura del titanio sin el conocimiento del contenido de la aleación, la temperatura de elaboración y el tratamiento térmico.

Las cualidades de transferencia de calor del titanio están caracterizadas por el coeficiente de conductividad térmica. Aun cuando éste es bajo, la transferencia de calor en servicio se aproxima a los mejores metales conductores (la conductividad térmica es siete veces más grande) debido a que la mayor resistencia del titanio permite la habilitación de pared más delgada, ausencia relativa de corrosión, resistencia a la erosión corrosión permitiendo velocidades más altas de operación y la inherente película pasiva.

1.5 RESISTENCIA A LA CORROSION.

El titanio es inmune a la corrosión en todos los ambientes de ocurrencia natural. No se corroe en aire, aun si es contaminado o humedecido con espuma de mar. No se corroe en el suelo ni aun en ambientes del tipo de mina salina profunda donde pudieran enterrarse desechos nucleares. No se corroe en ningún agua de ocurrencia natural ni en la mayoría de las corrientes de aguas residuales industriales. Por esta razón el titanio se ha denominado el metal para la tierra y del 20 al 30 por ciento del consumo se utiliza en aplicaciones de resistencia a la corrosión,

Aun cuando el titanio es un metal activo



resiste a la descomposición debido a la tenaz película protectora de óxido. Esta película es insoluble, reparable y no porosa en muchos medios químicos y proporciona una excelente resistencia a la corrosión. Sin embargo, cuando esta película se rompe, la velocidad de corrosión es muy rápida. No obstante, por lo general, la presencia de una pequeña cantidad de agua es suficiente para reparar la película de óxido dañada. En una solución de agua de mar, esta película se mantiene en la región pasiva en un orden de -0.2 a 10 voltios contra el electrodo de calomel saturado.

El titanio es resistente al ataque por corrosión en condiciones oxidantes, neutras e inhibe condiciones reductoras. Ejemplos de medios oxidantes son el ácido nítrico, soluciones de cloruro oxidante (FeCl_3 y CuCl_2) y gas cloro húmedo. Las condiciones neutras incluyen todas las aguas neutras (dulce, salada y salobre) soluciones salinas neutras y ambientes de suelo natural. Ejemplos de condiciones reductoras inhibitorias están en los ácidos clorhídrico y sulfúrico con inhibidores oxidantes y en ácidos orgánicos se inhibe con pequeñas cantidades de agua. Las resistencias a la corrosión para una variedad de medios se dan en la tabla 1.10. La resistencia del titanio a las soluciones de cloruro acuoso y cloro cuenta para la mayoría de su uso en las aplicaciones resistencia-corrosión.

El titanio se corroe muy rápidamente en medios de ácido fluorhídrico. Es atacado en HCl o ácido sulfúrico en ebullición en concentraciones ácidas mayores del 1% o del orden del 10% en peso de concentración ácida a temperatura ambiente. El titanio también es atacado por soluciones cáusticas calientes, soluciones de ácido fosfórico (concentraciones arriba del 25% en pe-

so), en AlCl_3 en ebullición (concentraciones mayores del 10% en peso), gas cloruro seco, anhídrido de amoníaco arriba de 150°C y en sulfato de hidrógeno-dihidrógeno arriba de 150°C .

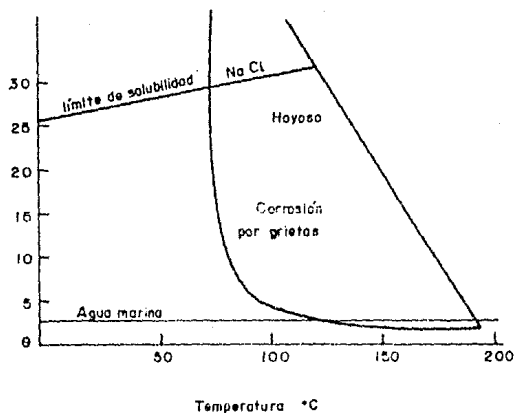
El titanio es susceptible a corrosión por marcas de hoyos y grietas en medios ambientes de cloruro acuoso. El área de susceptibilidad se muestra en la figura 1.2 como una función de la temperatura y el contenido de cloruro de sodio. La susceptibilidad también depende del pH. La temperatura de susceptibilidad aumenta parabólicamente desde 65°C mientras el pH aumenta desde cero. Con los grados 7 ó 12 ASTM. El ataque de corrosión por grietas no se observa por encima de un pH 2 hasta casi 270°C . Los elementos de aleación noble cambian el potencial de equilibrio en la región pasiva donde una película protectora se forma y se mantiene.

TABLA 1.10 DATOS DE CORROSION PARA EL TITANIO ASTM GRADO 2.

Medios	Conc. peso %	TC	Vel. corro- sion mm/año
Acetaldehído	100	149	0.0
Acido acético	5-99,7	124	0.0
Acido adipico	67	232	0.0
Cloruro de aluminio aereado	10	100	0.002
	10	150	0.03
	20	149	16
	25	20	0.01
	25	100	6.6
	40	121	109
Amoniaco + 28% de urea + 20.5% de H ₂ O+19%CO ₂ +0.3% inertes**aire	32.2	182	0.08
Amónico	50	100	0.0
Perclorato amónico aereado	20	88	0.0
Hidrocioruro de anilina	20	100	0.0
Agua regia	3:1	RT	0.0
	3:1	79	0.9
Cloruro de bario aereado	5-20	100	0.003
Solucion bromo-agua		RT	0.0
Cloruro de calcio		RT	0.0
	5	100	0.005
	10	160	0.007
	20	100	0.02
	55	104	0.0005
	60	149	0.003
	62	154	0.05-0.4
	73	177	2.1
Hipoclorito de calcio	6	100	0.001
Gas cloro húmedo	0.7 H ₂ O	RT	0.0
	1.5 H ₂ O	200	0.0
Gas cloro seco	0.5 H ₂ O	RT	Pos. reac
Dióxido de cloro en vapor	5	99	0.0
Acido cloracético	100	189	0.1
Acido crómico	50	24	0.01
Acido cítrico	25	100	0.0009
Sulfato de cobre +2% H ₂ SO ₄	Sat	RT	0.02
Cloruro cúprico aereado	1-20	100	0.01
Ciclohexano (más trazas de ácido fórmico)		150	0.003
Dicloruro de etileno	100	Ebull.	0.005-0.1
Cloruro férrico	10-30	100	0.1
Acido fórmico sin aerear	10	100	2.4
Acido clorhídrico aereado	5	35	0.04
	20	35	4.4

Medios	Conc. peso %	TC	Vel. corro- sión mm/año
Cloro saturado HCl	5	190	0.03
HCl + 10% HNO ₃	5	38	0.0
HCl + 1% CrO ₃	5	93	0.03
Acido fluorhídrico	1-48	RT	Rápida
Peróxido de hidrógeno	3	RT	0.1
Sulfuro de hidrógeno, vapor y 0.077% mercaptans			
Acido hipocloroso + Cl ₂ O y Cl ₂	17	35	0.00003
Acido Láctico	10	Ebull.	0.1
Cloruro de manganeso aerado	5-20	100	0.0
Cloruro de magnesio	5-40	Ebull.	0.0
Cloruro mercuríco aerado	1	100	0.0003
	5	100	0.01
	10	100	0.001
	55	102	0.0
Mercurio	100	RT	0.0
Cloruro de níquel aerado	5-20	100	0.0004
Acido nítrico	17	Ebull.	0.38-0.1
	70	Ebull.	0.05-0.9
Acido nítrico, gas rojo	2% H ₂ O	RT	Sen. ign.
	2% H ₂ O	RT	No ignic.
Acido oxálico	1	37	0.3
Oxígeno puro			Ign. sen.
Fenol	Saturado	21	0.1
Acido fosfórico	10-30	RT	0.02-0.05
	10	Ebull.	10
Cloruro de potasio	Saturado	60	0.0002
Dicromato de potasio			0.0
Hidróxido de potasio	50	27	0.01
	50	Ebull.	2.7
Agua de mar, prueba 10 años			0.0
Clorato de sodio	Saturado	Ebull.	0.0
Cloruro de sodio	Saturado	Ebull.	0.0
Cloruro de sodio-titanio en contacto con teflón	Saturado	RT	0.0
Hipoclorito de sodio de +12-15%			
cloruro de sodio +1% hidróxido de sodio + 1-2% carbonato de sodio	1.5-4	66-93	0-0.3
Cloruro estánico	5	100	0.003
	24	Ebull.	0.04
Acido sulfúrico	1	Ebull.	2.5
Acido sulfúrico + 0.25 CuSO ₄	5	93	0.0
Acido tereftálico	77	218	0.0
Reacción másica urea-amoniaco		T Y F	S/ataque
		Elevada	
Cloruro de zinc	20	104	0.0
	50	150	0.0
	75	200	0.5
	80	200	203

Fuente: Nix, Ohmer, 1983.



KEIL, Ottmer, 1983

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Características de la corrosión del
titanio en solución de NaCl acuoso

Figura No.
I-2

Tesis Profesional
Julio 1990

El titanio no se agrieta por tensión en ambientes que causan agrietamiento por el esfuerzo de otras aleaciones metálicas (i.e. ebullición de $MgCl_2$ al 42%, NaOH, sulfuros, etc.). Algunas de las aleaciones son susceptibles al agrietamiento por esfuerzo de sales calientes; sin embargo, es una observación de laboratorio y no se ha confirmado en la práctica. El titanio se agrieta por esfuerzo en metano que contenga cloruros o sulfatos ácidos, ácido nítrico, tetróxido de nitrógeno, tricloroetileno.

El titanio es susceptible a quebrarse por el desquebrajamiento del hidrógeno. El ataque del hidrógeno se inicia en lugares de contaminación de hierro superficial o cuando el titanio es unido por galvanizado con el hierro. En medios que contienen hidrógeno el titanio lo absorbe por arriba de los $80^{\circ}C$ o en áreas de alto esfuerzo. Si la superficie de óxido se remueve por ablandamiento al vacío o por abrasión, el hidrógeno puro seco reacciona a bajas temperaturas. Pequeñas cantidades de oxígeno o de vapor de agua reparan la película de óxido y previenen esta ocurrencia. Las aleaciones de molibdeno son menos susceptibles al ataque por hidrógeno. El titanio resiste a la oxidación en aire arriba de los $650^{\circ}C$. Notables condiciones de desquebrajamiento y descoste ocurren a altas temperaturas. La superficie contaminada acelera la oxidación. En presencia de oxígeno el metano reacciona significativamente con el hidrógeno. Ignición espontánea ocurre en mezclas de gas que contienen más del 40% de oxígeno bajo el impacto por carga o abrasión. Ocurre la ignición en gases de halógeno seco.

El titanio resiste la corrosión por erosión, por movimiento rápido de agua cargada de arena. En una prueba con agua de mar cargada de arena a alta velocidad (8.2 m/seg) para un período de 60 días el titanio funcionó más de 100 veces mejor que el acero inoxidable 18 Cr-8Ni, monel, ó 70 Cu-30 Ni. Su resistencia a la cavitación (i.e. corrosión de las superficies expues-

tas a líquidos con alta velocidad) es mejor que la de la mayoría de los metales estructurales.

En el acoplamiento galvánico, el titanio es por lo general el metal cátodo y consecuentemente no es atacado. El potencial galvánico en agua de mar fluyente en relación con otros metales se muestra en la tabla I.11. Puesto que el titanio es un metal cátodo el ataque por hidrógeno puede ser de consideración, mientras que ocurra con titanio complejo a hierro.

TABLA I.11 SERIE GALVANICA EN AGUA DE MAR FLUYENTE, 4 m/seg a 24°C.

Metal	Potencial, V
Acero inoxidable T304, pasivo	0.08
Aleación monel	0.08
Aleación Hastelloy C	0.08
Titanio sin aleaer	0.10
Plata	0.13
Acero inoxidable T410, pasivo	0.15
Níquel	0.20
Acero inoxidable T430, pasivo	0.22
Cobre-níquel 70-30	0.25
Cobre-níquel 90-10	0.28
Latón almirantazgo	0.29
Bronce G	0.31
Latón aluminio	0.32
Cobre	0.36
Latón naval	0.40
Acero inoxidable T410, activo	0.52
Acero inoxidable T304, activo	0.53
Acero inoxidable T430, activo	0.57
Acero al carbono	0.61
Hierro colado	0.61
Aluminio	0.79
Zinc	1.05

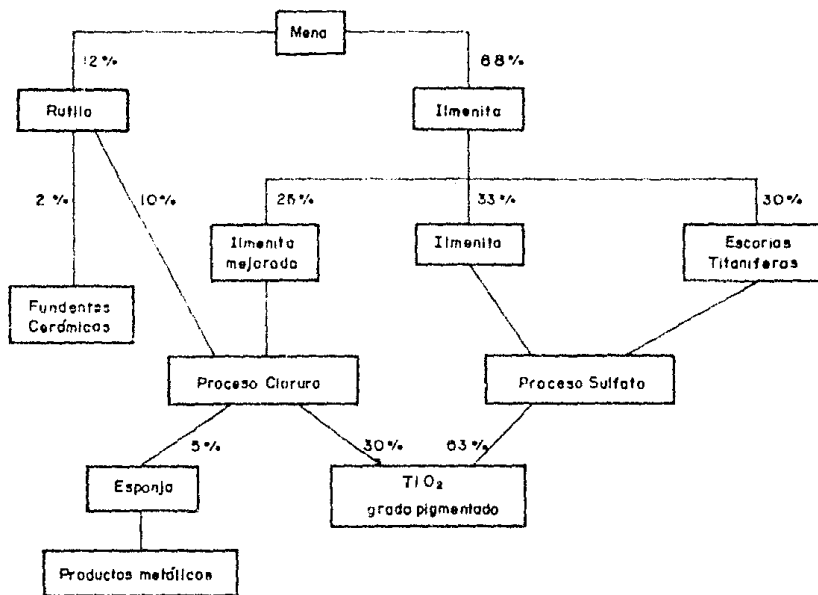
Fuente: Kirk, Othmer, 1983.

1.6 EVOLUCION DEL MERCADO.

La utilización de la materia prima titanio puede descomponerse hacia abajo como lo ilustra la figura 1.3. Cerca del 5% del titanio minado se utiliza como metal, 93% se utiliza como TiO_2 grado pigmento y 2% como rutilo grado mena para fundentes y cerámico. En 1979 los Estados Unidos estimaron la demanda de mena titanio (contenido de TiO_2) para estas aplicaciones de la siguiente manera: pigmentos, 882 000 ton. m; metal titanio; 35 000 ton. de dióxido de titanio (igual a 20 000 ton. de metal); y fundentes y cerámicos 40 000 ton.

En Estados Unidos sólo el 4% de la materia prima procesada va a la producción de metal. En 1979, alrededor de 1.8 millones de toneladas de contenido de titanio fue producido en el mundo. En \$2.20 US por kilogramo para el titanio contenido, la venta de las industrias de pigmentos aumentó hasta casi 3 700 millones de dólares. Las ventas de la industria de metales se valoraron en 2 500 millones de dólares en un promedio de 27.60 dólares por kilogramo por productos de fábrica, incluyendo la producción de metal de la URSS que es del orden del 50% de la capacidad de la industria.

Los principales productores del TiO_2 mundiales grado pigmento son los EUA, Europa occidental y Japón (ver la tabla 1.12); el consumo se muestra en la figura 1.4. La velocidad de crecimiento desde 1960 hasta 1973 fue del orden del 8% anual. El consumo disminuyó marcadamente después de la crisis petrolera de 1973, de dos millones a millón y medio de toneladas. La demanda se ha recuperado a casi el nivel máximo de antes de la crisis petrolera.



K.L. Oster, 1983

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Utilización de la materia prima
titania en EEUU

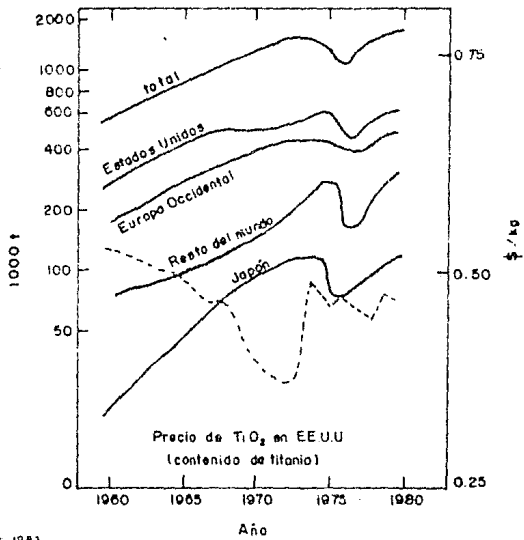
Figura No.
I-3

Tesis Profesional
Julio 1990

TABLA 1.12 PLANTAS DE PRODUCCION DEL PIGMENTO TiO₂.

País	Compañía	Capacidad (10 ³ ton/año)		
		Proceso sulfato	Proceso cloruro	% de capacidad mundial
ESTADOS UNIDOS				
	El du Pont		657	24
	NL Industries	329	16	13
	Am. Cyanamid	77	56	4
	SCM Corp.	48	65	4
	G & W WNR		72	2
REINO UNIDO				
	BTP Tioxide	353	30	14
	Laporte Ind.	84	40	5
RFA				
	Bayern AG	118	55	6
URSS				
	Tecmasiuimport	124	0	5
JAPON				
	Ishihara SK	92	12	4
FRANCIA				
	Thannt et M	84		3
ITALIA				
	Montedison SPA	81		3
OTRAS				
		311	47	13
TOTAL		1 701	1 010	100

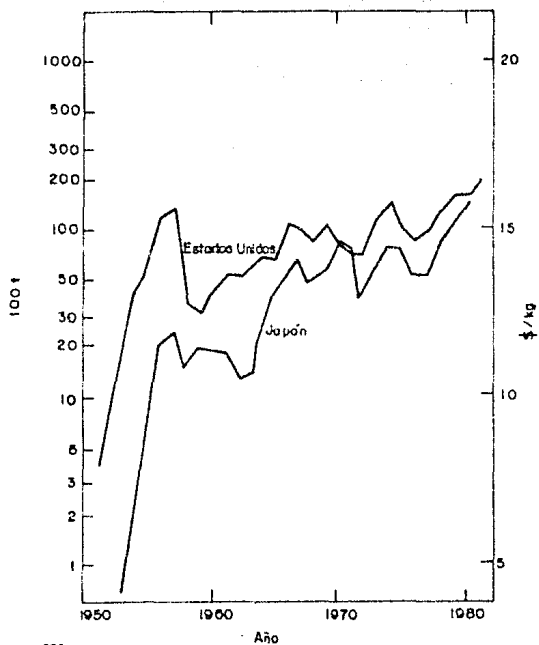
Fuente: Kilk, Othmer, 1983.



Kirk, Obermer, 1983

Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería	
Contenido de TiO con precio de venta E.E.U.U. (contenido de Ti) en dólares de 1980	
Figura No. I.4	Tesis Profesional Julio 1990

La historia de la producción de esponja de titanio en los EUA y Japón se muestra en la figura I.5. La demanda de metal en EUA ha sido más grande que la producción de esponja la que ha sido complementada por importaciones primeramente de Japón con la participación abundante de la URSS en la mitad de los años setenta. Las importaciones subsanaron cerca del 10-20% de la demanda en los EUA. Los Estados Unidos no subsanaron sus propias demandas debido a que los productores lo habían mal dispuesto para agregar capacidad a los períodos de demanda máxima puesto que el requerimiento de capital es grande (\$22 US /kg de la capacidad anual); los productores prefieren fundir la esponja en lingotes y consecuentemente no aportar esponja para no producir fundidos. Las compañías comprometidas en la fundición de esponja y sus capacidades estimadas se dan en la tabla I.13. La historia del precio de la esponja de titanio se da en la tabla I.14. En la tabla I.15 se muestra la distribución del mercado de titanio para los Estados Unidos.



Kris, Othmer, 1993

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Producción de esponja titanio
en los Estados Unidos y Japón

Figura No.
I-5

Tesis Profesional
Julio 1990

TABLA 1.13 FUNDIDORES DE TITANIO Y CAPACIDADES.

Compañía	Capacidad (ton. m.)
EUROPA OCCIDENTAL	
IMI Titanium, RU	6 000
Krupp Stnal Ag, RFA	1 200
Sézus, Francia	
Contimet, RFA	2 800
SUBTOTAL	10 000
JAPON	
Kobe Steel, Ltd.	6 000
Nippon Mining Co. Ltd.	1 200
Osaka Titanium	3 000
Tojo Titanium	
SUBTOTAL	10 200
ESTADOS UNIDOS	
Crucible Steel	900
Lawrence Aviation	900
Howmet Turbine Components Corp.	4 500
Martin Marietta	3 600
Oregon Metallurgical	4 000
RML Company	9 000
Teledyne Allvac, Inc.	2 700
Titanium Metals Corp. of America	13 600
Teledyne Wah Chang Albany	1 400
SUBTOTAL	40 000
T O T A L	60 800

Fuente: Kilk, Othmer, 1983.

TABLA I.14 PRECIO HISTORICO DE LA ESPONJA DE TITANIO EN EUA.

Año	\$/Kg
1948 - 1955	11.02
1964 - 1975	2.91
Principios de 1982	16.86
Mitad de 1982	12.20

Fuente: Kilk, Othmer, 1983.

TABLA I.15 DISTRIBUCION DEL MERCADO DE TITANIO EN EUA.

Mercado	1955	1961	1966	1975	1979
Aerospacial (%)					
Militar	94	72	74	54	45
Civil	3	20	19	20	35
Industrial (%)	3	6	7	26	20
Productos de fábrica, t	910	2 940	6 580	7 030	9 750

Fuente: Kilk, Othmer, 1983.

Antes de 1970 más del 90% del titanio producido se utilizó en aplicaciones aeroespaciales, el cual bajó al orden del 70-80% para 1982. En la tabla I.16 se da el consumo mundial.

TABLA I.16 CONSUMO MUNDIAL DE ESPONJA Y CHATARRA DE TITANIO,
(EN MILES DE TONELADAS).

Año	Estados Unidos	Europa Occidental	Japón	URSS
1968	17.2	10.6	2.0	13.2
1970	21.5	14.0	4.3	12.0
1972	18.9	12.7	2.4	28.3
1974	34.0	18.4	5.8	26.9
1976	20.4	19.0	4.3	35.8
1978	29.2	22.3	6.2	45.8
1980	38.4			
1981	42.1			

Fuente: Kirk, Ohtmer, 1983.

En contraste con los Estados Unidos las aplicaciones aeroespaciales utilizadas en Europa Occidental y Japón importan sólo el 40 - 50% de la demanda. El consumo de metal titanio en la URSS es casi la mitad del consumo mundial. Aunque no se conoce la distribución en la URSS, se cree que en 1980 cantidades considerables fueron utilizadas para la construcción de sumergibles de gran profundidad. Se cree también que su uso es mayor en aplicaciones no aeroespaciales que en los Estados Unidos. Las producciones mundiales para la extracción del metal titanio, incluyendo capacidad y tipo de proceso, se dan en la tabla I.17 y en la tabla I.18 se muestra la distribución de aplicaciones no aeroespaciales resistentes a la corrosión.

TABLA I.17 CAPACIDAD DE LA PRODUCCION DE ESPONJA DE TITANIO -
(TON. m./año).

Localidad	Productor	Proceso	1981-1982
JAPON			
Amagasaki	OTC	Destilación Mg	18 000
Chigasaki	TTC	Destilación Mg	12 000
Nihongi	NMI	Lixiviación Na	2 000
Akita	Mitsubishi		
SUBTOTAL			32 000
ESTADOS UNIDOS			
Henderson	Timet	Lixiviación Mg	13 600
Ashtabula	RMI	Lixiviación Na	8 600
Albany	Ormet	Destilación Mg-Ar	3 000
Free Port	D-H- Tit.	Electrólisis	500
Albany	TWCA	Destilación Mg	1 500
Moses Lake	Internat. Titanium	Destilación Mg	2 000
SUBTOTAL			29 200
EUROPA			
Reino Unido	ICI Deeside Tit.	Lixiviación Na Lixiviación Na	3 000
RP CHINA	5 plantas	Dest/lix Mg-Na	
URSS	4 plantas	Destilación Mg	45 000
T O T A L			111 200

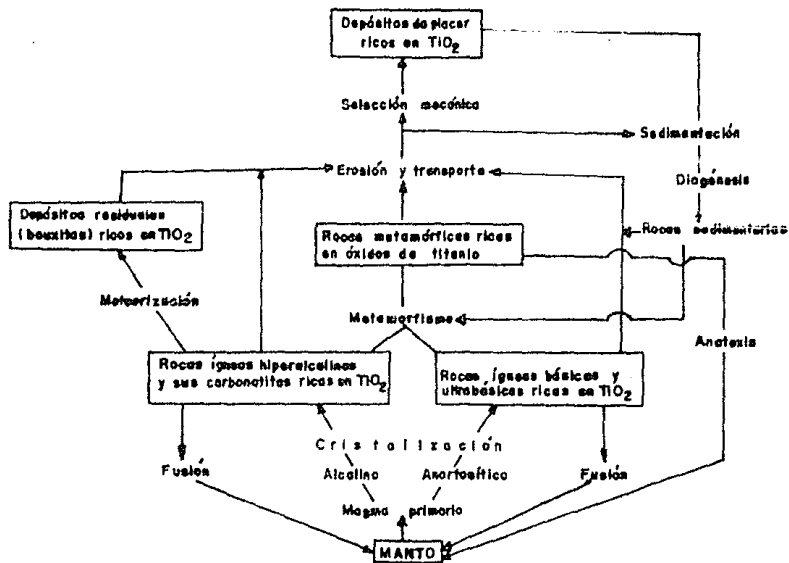
Fuente: Kilk, Othmer, 1983.

TABLA I.18 · DISTRIBUCION DEL TITANIO EN APLICACIONES NO AEROESPACIALES RESISTENTES A LA CORROSION, 1980.

Aplicación	Miles de ton. m.
Generación de energía	2.3
Industrias cloro-álcali	1.6
Tanques mezcladores e intercambiadores de calor para la industria química	1.6
Blanqueo y generación química	1.1
Cubierta y recuperación de metales	1.4
Producción de petróleo y gas	0.5
Marino	0.5
Desalinación	0.5
Otras	1.4
T O T A L	10.9

Fuente: Kilk, Othmer, 1983.

Finalmente y de acuerdo a la información obtenida acerca del titanio, se propone, por los autores de este trabajo, es ciclo geoquímico del titanio, el cual se muestra en la figura i-6.



Propuesta por:
 Raúl L. Del Angel R.
 Javier Enríquez B.
 Luis A. Lorea H.
 Erasto Sánchez G.
 Alberto Frías G.
 (1990)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
 FACULTAD DE INGENIERÍA

Diagrama idealizado del ciclo
 geoquímico del titanio

FIGURA No
 I-6

TESIS PROFESIONAL
 Julio de 1990

CAPITULO II

CLASIFICACION DE YACIMIENTOS MINERALES DE TITANIO

- II.1 LINDGREN
- II.2 BATEMAN, JENSEN Y BATEMAN
- II.3 SMIRNOV
- II.4 ROUTHIER
- II.5 LEFOND
- II.6 MITCHELL Y GARSON
- II.7 KUZVART Y BOHMER

II. CLASIFICACIONES DE YACIMIENTOS MINERALES DE TITANIO

Para el estudio de los diferentes modelos de yacimientos titaníferos es conveniente hacer un análisis de las principales clasificaciones que se han elaborado para este metal. Se han seleccionado aquéllas que han sido realizadas por autores muy conocidos, y que han tomado diferentes criterios para llevarlas a cabo.

II.1 LINDGREN (1953)

Clasifica a los yacimientos tomando en cuenta su génesis y los divide en:

1.- Depósitos producidos por procesos mecánicos de concentración (temperatura y presión moderadas).

a) Placeres de playa.- Ejemplo Travancore, India; Brasil; - E.U.A.

2.- Depósitos producidos por procesos químicos de concentración (temperatura y presión varían entre límites muy amplios).

a) En magmas por procesos de diferenciación (temperatura de 700 a 1500°C, presión muy alta). Ejemplo, St. Urbain, Quebec; Lago Sanford, NY, E.U.A.; Complejo Bushveld, Sudáfrica.

II.2 BATEMAN (1951), JENSEN Y BATEMAN (1979)

Realizan una clasificación genética sencilla, la cual puede ser utilizada en el campo o laboratorio con facilidad dada la terminología que se emplea:

1.- Depósitos formados por concentración magmática.

a) Magmático tardío o secundario:

1.- Por segregación de líquido residual.

Diferenciación de la cristalización y acumulación de magma residual.

Ejemplo; Titanomagnetita de Bushveld, Sudáfrica.

2.- Por inyección de líquido residual.

Diferenciación de la cristalización y acumulación de magma residual, con presión filtrante e inyección.

Ejemplo; Allard Lake, Canadá; Adirondack, NY, E.U.A.

2.- Depósitos formados por concentración mecánica.

a) Placeres de playa:

Ejemplo; Ilmenita de Travancore y Quilón, India; Australia.

II.3 SMIRNOV (1982).

Hace una clasificación de los yacimientos de titanio con base en su origen:

1.- Depósitos magmáticos.

a) Magmático tardío: depósitos titanomagnetíferos contenidos en macizos diferenciados de rocas básicas, principalmente anortositas.

Ejemplo; Urales, URSS; Bushveld, Sudáfrica; Labrador, Canadá.

2.- Depósitos de placer.

a) Placeres de playa:

- Recientes.- Australia, Indonesia, India, Africa.

- Antiguos.- Placeres fósiles del Terciario, Mesozoico y Paleozoico.

Ejemplo: Urales y Siberia, URSS.

3.- Depósitos metamórficos.

Ejemplo: Urales, URSS. Depósitos de titanio formados a partir del metamorfismo de rocas de composición gabraica en facies eclogíticas.

II.4 ROUTHIER (1963)

Ha elaborado una clasificación tomando en cuenta básicamente el tipo de material en el que se encuentran localizados; los subdivide posteriormente de acuerdo con el tipo mineral económico de titanio que predomina en él; puede considerarse que presenta cierta utilidad en la prospección.

1.- Depósitos en aluviones, concentraciones residuales y formaciones sedimentarias.

- Depósitos eluviales.

Ejemplo: Rutilo sobre cuarcitas de rutilo. Sierra Leona, - Africa.

- Titanio como elemento accesorio de bauxitas.

Ejemplo: Jamaica.

- Titanio en sedimentos aluviales, (arenas negras).

a) Placeres recientes o casi recientes.

Ejemplo: Placeres de ilmenita, Travancore, India. Placeres de rutilo. Queensland, Australia.

b) Placeres antiguos.

Ejemplo: Placeres de ilmenita. Wyoming, E.U.A. Cuarcitas de rutilo. Sierra Leona, Africa. Cuarcitas de brookita y rutilo. Cove, Arkansas, E.U.A.

2.- Depósitos asociados a plutones graníticos.

En pegmatitas graníticas (sin importancia económica).

Ejemplo: Damarland, Sudáfrica.

3.- Depósitos asociados a complejos alcalinos y a sus carbonatitas.

- En pegmatitas de sienitas nefelínicas.

Ejemplo: Iveland, Evje, Noruega.

- Depósitos de titanomagnetita e ilmenita.

Ejemplo: Chibine, Península de Kola, URSS.

- Depósitos de esfena y perovskita.

Ejemplo: Jacupiranga, Brasil.

- Depósitos de rutilo en filones de carbonatitas.

Ejemplo: Magnet Cove, Arkansas, EUA.

4.- Depósitos asociados a complejos básicos: gabronorit-anortosita (sobre todo complejos charnockíticos).

. Esencialmente en escudos precámbricos.

. Mineralización en noritas y anortositas.

. Formas tabulares estratiformes y lentillas.

. Mineralización frecuentemente en forma de cintas o bandas.

. Aquí se encuentran todos los yacimientos importantes.

- Depósitos de ilmenita y magnetita.

Ejemplo: Stanford Lake, EUA; Tangañica, Bushveld, Sudáfrica.

- Depósitos de ilmenita y hematita.

Ejemplo: Allard Lake, Canadá.

- Depósitos de ilmenita y rutilo.

Ejemplo: Saint-Urbain, Canadá; Piney River, Virginia EUA.

5.- Depósitos en rocas básicas metamorfoseadas o en su vecindad.

- Depósitos de rutilo y hematita (o magnetita) formados a partir de ilmenita.

Ejemplo: Maryland, EUA; norte de Nueva Caledonia; Camerún.

II.5 LEFOND (1983).

Hace una clasificación con base en el tipo de material en que se encuentran localizados los yacimientos dividiéndolos en dos grupos:

A.- Yacimientos en rocas.

1.- Depósitos anortosíticos: asociados a rocas anortosíticas o gabroicas.

Ejemplo: Allard Lake, Canadá; Virginia, EUA.

2.- Depósitos misceláneos:

- Ilmenita diseminada en esquistos.
- Rutilo, anatasa, brookita, en una fase pegmatítica de rocas alcalinas rodeando sedimentos.
- Anatasa e ilmenita en cuerpos de carbonatita intemperizados.

B.- Yacimientos en arenas.- Contenidos básicamente en arenas de playa.

Ejemplo: Sureste de Australia; Travancore, India; Sudáfrica.

II.6 MITCHELL Y GARSON (1981).

A principio de los años setentas fueron hechos los primeros intentos por relacionar los procesos de mineralización con la tectónica de placas.

Desde 1972 los tipos de yacimientos minerales relacionados con ambiente de placas, y el número de ambientes considerados se han incrementado rápidamente; algunos autores explican los tipos de mineralización posible característica de un ambiente o ambientes particulares y otros relacionados con los tipos de ambiente en los cuales se podría formar un tipo particular de ellos.

De esta forma Mitchell y Garson (op. cit.) hacen una clasificación de yacimientos de titanio de acuerdo con el ambiente tectónico con que se encuentran asociados.

1.- Depósitos característicos de márgenes continentales pasivos.

Ejemplo: Placeres de ilmenita, rutilo en arenas de playa, - Sudáfrica, costa oriental de Australia.

2.- Depósitos asociados con rocas magmáticas en rifts intra continentales.

Ejemplo: Complejo Bushveld, Sudáfrica.

3.- Depósitos en rocas básicas dentro de secuencias de ofiolitas en crestas y cuencas oceánicas.

Ejemplo: Val di Vara, al oeste de Liguria, Italia.

4.- Depósitos asociados a carbonatitas en franjas magmáticas continentales y franjas de cabalgadura.

Ejemplo: Loch Borrolan, Escocia.

5.- Depósitos característicos de fallas transformes continentales (extensiones de fallas transformes oceánicas de cresta-cresta).

Ejemplo: Gabro Akarem, al sureste de Egipto.

II.7 KUZVART Y BOHMER (1986).

Hacen alusión a la clasificación de yacimientos elaborada por Kreiter (1960, 1964) y Peters (1978), la cual está basada fundamentalmente en la importancia industrial que tienen estos yacimientos, desde el punto de vista económico o rentable de los mismos.

Estos autores elaboran una descripción a nivel mundial de los yacimientos más importantes desde el punto de vista industrial considerando varias características, como son:

- a) Tipo (origen).
- b) Forma en que se encuentra el mineral dentro del yacimiento.
- c) Minerales económicos.
- d) Ley.

TIPO	FORMA	MINERALES ECONOMICOS	LEY	EJEMPLOS
Placeres	Capas y - lentes en aluvión.	Ilmenita	10-100 Kg/ton.	Kerala, India.
Magmático Secundario	Lentes y vetas en rocas bá- sicas y <u>u</u> trabásicas.	Ilmenita, magnetita	10-50% TiO	Tanzania, Allard Lake, Canadá.
Metamorfo- génicos.	En <u>anfibo</u> litas y - otras ro- cas meta- mórficas.	Ilmenita, rutilo		Carolina del Norte, EUA.

Kuzvat y Böhmer (op. cit.) mencionan que los yacimientos - que cubren más del 1% de la producción mundial, son los llama- dos yacimientos industriales; sin embargo, un yacimiento encon trado en un determinado país puede tener importancia industrial para ese país, aunque no lo sea a nivel mundial por no cumplir con el requisito anteriormente mencionado.

CAPITULO III

PRINCIPALES MODELOS DE LOS DEPOSITOS MINERALES DE TITANIO

- III.1 ASOCIADOS A ROCAS BASICAS Y ULTRABASICAS
- III.2 ASOCIADOS A ROCAS HIPERALCALINAS Y SUS CARBONATITAS
- III.3 ASOCIADOS A ROCAS METAMORFICAS
- III.4 ASOCIADOS A PLACERES
- III.5 ASOCIADOS A DEPOSITOS RESIDUALES

III.1 MODELO DE YACIMIENTOS DE TITANIO ASOCIADO A ROCAS BÁSICAS Y ULTRABÁSICAS.

En el seno de los macizos de rocas básicas y ultrabásicas, se pueden encontrar los yacimientos más importantes de minerales de titanio. Estos depósitos han sido estudiados desde hace muchos años, pero su verdadera producción comercial se inició hace apenas unas cinco décadas.

El modelo de yacimiento asociado a rocas básicas y ultrabásicas, las cuales se caracterizan por presentar un alto contenido de fierro y magnesio, es en la actualidad -a excepción de los placeres titaníferos de las costas australianas-, el principal y más importante productor de titanio en el mundo. Sus principales características se describen a continuación.

III.1.1 Paragénesis.

La asociación mineral de las menas titanomagnetíticas se caracterizan por la presencia de tres minerales esenciales: rutilo, ilmenita y titanomagnetita.

Los complejos anortosíticos y gabroicos pueden presentar menas con las siguientes asociaciones: ilmenita; magnetita-ilmenita; hematita-ilmenita; rutilio-ilmenita e ilmenita-apatita. Además, las menas contienen minerales del grupo del rutilo (angata, brookita, etc.); del grupo de la ilmenita (geikelita, pirofanita, brannerita, etc.); así como magnetita, apatita, sulfuros (principalmente pirrotita, pirita y calcopirita); asimismo, pueden existir minerales petrográficos de las rocas básicas encajonantes y productos de su transformación endógena (granate, anfiboles, serpentina, epidota, clorita, hematita, leucóxeno y algunos otros granates). Los sulfuros aparecen como minerales de ganga, junto con los piroxenos y feldespatos cálcicos.

III.1.2 Alteraciones.

Los minerales industriales de titanio (rutilo e ilmenita), son químicamente muy estables "in situ"; es decir, son muy resistentes a la meteorización o intemperismo, por lo que difícilmente sufren alteraciones supergénicas. En cambio, pueden presentar alteraciones hipogénicas, sobre todo de la ilmenita, si las rocas en las que se encuentra se ven sometidas a un proceso de metamorfismo regional.

La transformación por metamorfismo que se puede presentar, es la siguiente:

Ilmenita— rutilo + hematita o magnetita.

De aquí se puede observar que el titanio emigra bajo la forma de rutilo, dando lugar a concentraciones de tipo metamórfico, las cuales se verán más adelante.

Según algunos autores, el paso de las menas de ilmenita a las de magnetita-ilmenita, y a las de magnetita-hematita, está relacionado con el grado creciente de oxidación en el proceso de cristalización de la fusión formadora de menas.

III.1.3 Litología.

Los yacimientos minerales de titanio comercialmente más importantes, que pertenecen a este modelo, están asociados genéticamente a las rocas anortosíticas y gabroicas, principalmente.

De acuerdo a diversos estudios realizados, se destacan dos grupos principales:

1.- Los yacimientos en las anortositas y gabro-anortositas con menas de ilmenita, magnetita-ilmenita, hematita, ilmenita y

en ocasiones de rutilo-ilmenita.

2.- Los yacimientos en gabros y en las rocas gabro-noríticas con menas de ilmenita-magnetita.

Con respecto a las anortositas, existen dos tipos, pertenecientes cada uno de ellos a una asociación distinta de rocas plutónicas (Turner y Verhoogen, 1960):

1) Anortositas bitowníticas que se presentan como capas dentro de lopolitos y plutones básicos estratificados, como por ejemplo en los complejos de Bushveld, Stillwater y Duluth (figura No. III.1). Los feldespatos son fuertemente cálcicos (comúnmente bitownita).

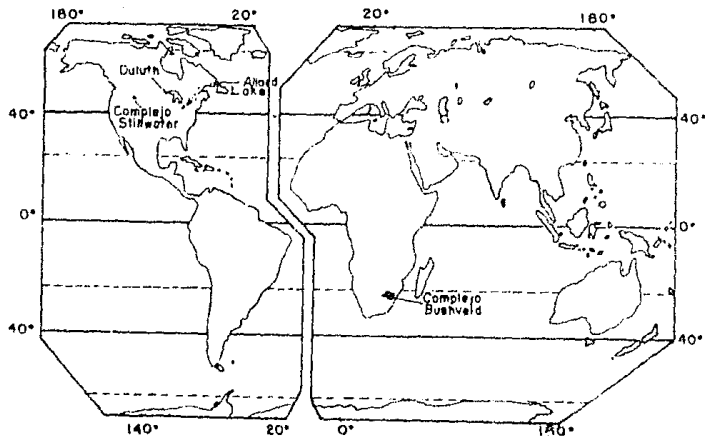
2) Anortositas de andesina o labradorita que se presentan como grandes intrusiones (batolitos o stocks), independientes en los terrenos precámbricos. Los feldespatos que se encuentran en estas rocas son menos cálcicos que en las anteriores; generalmente se presentan en el rango andesina-labradorita. Los ejemplos más conocidos son los de Escandinavia y los de la zona oriental de América del Norte (Adirondacks y Quebec).

La anortosita plutónica (segundo tipo), presenta serias dificultades en su consideración genética. Las masas anortosíticas de este tipo presentan las siguientes características:

i) Los macizos anortosíticos aparecen confinados exclusivamente en terrenos precámbricos.

ii) Se presentan como grandes intrusiones en forma de domo y pueden alcanzar proporciones batolíticas. La extensión superficial del macizo anortosítico de Adirondack es de 3000 km², y la anortosita del sur de Noruega cubre aproximadamente 1000 km².

iii) Muchas anortositas son de grano muy grueso y presentan una notable microdeformación (estructuras cataclásticas y lo-



R. L. Stanton, 1972

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Distribución mundial de los complejos
anortosíticos que contienen los más
importantes depósitos ferro-titaníferos

FIGURA No.
III-1

TESIS PROFESIONAL
Julio de 1990

calmente miloníticas).

iv) El principal constituyente mineral es la plagioclasa - próxima a la andesina-labradorita, pero que varía entre An₃₅ y An₆₀. La hiperstena y la augita, acompañadas con menos frecuencia por olivino, constituyen menos del 10% de la composición de la anortosita propiamente dicha; entre el 10 y el 22.5% en la anortosita gabroide y del 27.5 al 35% en el gabro anortosítico. Cuanto más se incrementa el componente máfico, la roca se convierte en gabro, comúnmente del tipo norítico.

v) En la mayoría de las grandes intrusiones de anortosita - se ha observado una transición completa desde la anortosita - hasta el gabro norítico, lo cual demuestra que tienen un origen común. También se encuentran asociados con las anortositas granito piroxénicas (charnockitas), sienitas piroxénicas y monzonitas piroxénicas; pero aún es discutible si éstas se han derivado de la misma fuente magmática que las anortositas.

En general, las rocas básicas y ultrabásicas, es decir, las rocas con un alto contenido de minerales ferromagnesianos pueden presentar concentraciones importantes de minerales de titanio; sin embargo, las anortositas, los gabros, las noritas y todas sus rocas relacionadas presentan los mejores yacimientos de titanio.

Las siguientes tablas (III.1, III.2 y III.3) muestran la composición química de algunas rocas ígneas, la composición química de las anortositas y sus rocas relacionadas, y los principales minerales de algunas anortositas, respectivamente.

La cantidad promedio de TiO₂ existente en las rocas ígneas es de 1.06% (Brian Mason, 1982).

La figura III.2 muestra la clasificación de las rocas ígneas en el diagrama de Streckeisen, de acuerdo a su composición mineralógica esencial.

TABLA III.1

COMPOSICION DE ALGUNAS ROCAS IGNEAS (LAS MAS COMUNES), EN %

	Granitos (calcoalcalinos) (72)	Granitos alcalinos (48)	Cuarzo Dioritas (58)	Dioritas (50)
SiO ₂	72.08	73.86	66.15	51.86
TiO ₂	0.37	0.20	0.62	1.50
Al ₂ O ₃	13.86	13.75	15.56	16.40
Fe ₂ O ₃	0.86	0.78	1.36	2.73
FeO	1.67	1.13	3.42	6.97
MnO	0.06	0.05	0.08	0.18
MgO	0.52	0.26	1.94	6.12
CaO	1.33	0.72	4.65	8.40
Na ₂ O	3.08	3.51	3.90	3.36
K ₂ O	5.46	5.13	1.42	1.33
H ₂ O	0.53	0.47	0.69	0.80
P ₂ O ₅	0.18	0.14	0.21	0.35
CO ₂	--	--	--	--

	Gabros píroxénicos (38)	Gabros alcalinos (38)	Peridotitas (23)	Sienitas nefelínicas (80)
SiO ₂	50.76	43.94	43.54	55.38
TiO ₂	1.13	2.86	0.81	0.66
Al ₂ O ₃	15.68	14.87	3.99	21.30
Fe ₂ O ₃	2.26	4.35	2.51	2.42
FeO	7.41	7.80	9.84	2.00
MnO	0.18	0.16	0.21	0.19
MgO	8.35	9.31	34.02	0.57
CaO	10.85	12.37	3.46	1.98
Na ₂ O	2.14	2.32	0.56	8.84
K ₂ O	0.56	0.92	0.25	5.34
H ₂ O	0.48	0.66	0.76	0.96
P ₂ O ₅	0.18	0.44	0.05	0.19
CO ₂	--	--	--	0.17

El número entre paréntesis indica el número de análisis realizados para cada tipo de roca.

Fuente: S.R. Nockolds y R. Allen, 1954, Geol. Soc. Amer. Bull; 65.

TABLA III.2

COMPOSICIONES QUIMICAS DE ANORTOSITAS Y ROCAS RELACIONADAS.

Constituyentes	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	54.54	53.34	53.22	45.25	53.40	52.13	51.8
TiO ₂	0.67	0.72	0.69	6.88	0.77	0.50	1.3
Al ₂ O ₃	25.61	22.50	20.03	11.84	23.96	24.15	25.2
Fe ₂ O ₃	1.00	1.26	0.70	1.59	0.91	0.90	1.1
FeO.....	1.26	4.14	3.98	14.12	3.02	3.43	2.1
MnO.....	--	0.07	0.09	0.23	--	--	--
NgO.....	1.03	2.21	4.08	6.42	1.88	2.42	1.0
CaO.....	9.92	10.12	12.33	10.23	9.85	10.36	8.7
Na ₂ O.....	4.58	3.79	3.57	2.41	4.17	4.31	5.4
K ₂ O.....	1.01	1.19	0.55	0.17	0.80	1.25	0.7
H ₂ O+.....	--	--	0.73	0.14	--	--	--
H ₂ O-.....	0.55	--	0.06	0.03	0.69	0.60#	--
P ₂ O ₆	--	0.13	0.02	0.16	0.18	0.03	0.4
CO ₂	--	0.41	0.38	0.26	--	--	--
Resto	--	--	--	--	0.43	0.05	--
Total.....	100.17	99.98	100.43	99.76	100.06	100.13	100.04

Contenido de agua antes de ser recalculado = 2.87

Explicación de la tabla

- 1.- Media de 4 análisis de anortosita (tipo Marcy) del núcleo del macizo de Adirondack. (A.F. Buddington, Adirondack Igneous rocks and their metamorphism, Geol. Soc. American - Mem, 1939).
- 2.- Media de 7 análisis de anortosita gabroide (tipo Whiteface) de las zonas de borde del macizo de Adirondack. (Buddington, op. cit., 1939).
- 3.- Gabro anortosítico en el macizo de Adirondack (Buddington, op. cit., 1939).
- 4.- Facies de gabro piroxénico de gabro anortosítico de grano grueso, macizo de Adirondack. (Buddington, op. cit., 1939).

- 5.- Anortosita gabroide, macizo de Adirondack; postulada como semejante al magma primario anortosítico de Adirondack. - (Buddington, op. cit., 1939).
- 6.- Kenningita (roca porfirítica de dique, de composición anortosítica), Suecia; media de análisis recalculados para el mismo contenido de agua que (5). (Buddington, op. cit., - 1939).
- 7.- Anortosita, media de dos análisis, Noruega meridional. (T. F. W. Barth, The large preCambrian intrusive bodies in the southern part Norway, 16th Internat. Geol. Cong. Rept. - (1933), 1939).

Fuente: En F. Turner y S. Verhoogen, 1978.

TABLA III.3

PRINCIPALES MINERALES DE ALGUNAS ANDRITOSITAS RICAS EN OXIDOS FIERRO-TITANIFEROS.

Depósito	1	2	3	4	5	6	7	8
Bushveld, Transvaal	m	n.d.	M	M	n.d.	n.d.	m	n.d.
Allard Lake (Lac Tio), Quebec	m	M	n.d.	M	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
St. Charles, Quebec	M	n.d.	n.d.	M	n.d.	n.d.	n.d.	M
St. Urbain, Quebec	n.d.	M	n.d.	M	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ivry, Quebec	n.d.	M	n.d.	M	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Degrosbois, Quebec	M	n.d.	n.d.	M	n.d.	n.d.	m	m
Eagle Lake, Ontario	M	m	n.d.	M	n.d.	n.d.	n.d.	m
Pusey, Ontario	M	n.d.	n.d.	M	m	n.d.	n.d.	m
Little Pic River, Ontario	M	n.d.	n.d.	M	n.d.	n.d.	n.d.	m
Seine Bay Range, Ontario	M	n.d.	n.d.	M	n.d.	n.d.	n.d.	m
Duluth, Minnesota	M	n.d.	n.d.	M	n.d.	m	n.d.	n.d.
Fiska, W. Norway	M	m	n.d.	M	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Verkschaugen, W. Norway	M	m	n.d.	M	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Øyen, Tafjord, W. Norway	M	n.d.	n.d.	M	n.d.	n.d.	m	n.d.
Øvre Røddal, Tafjord, W. Norway	M	n.d.	n.d.	M	n.d.	m	n.d.	m
Pluma Hidalgo, México	M	n.d.	n.d.	M	M	n.d.	n.d.	M

Explicación de la tabla

1 = Magnetita

2 = Hematita

3 = Hematita magnetita

4 = Ilmenita

5 = Rutilo

6 = Ulvöespinela

7 = Sulfuros

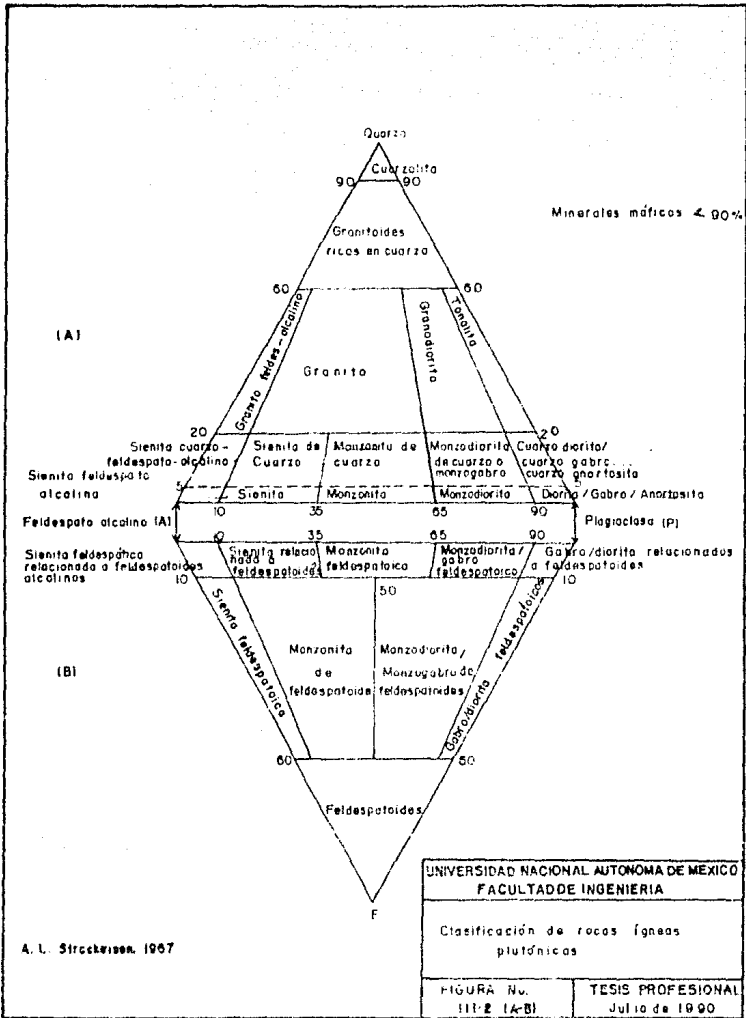
8 = Apatita

M = Mayor

m = menor

n.d. = no detectado

Fuente: R. L. Stanton, 1972.

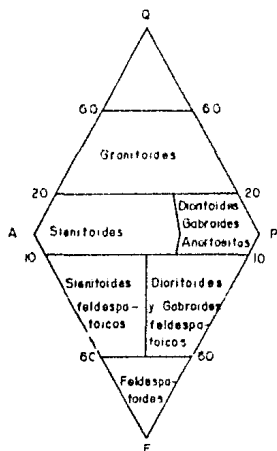


(A)

(B)

A. L. Streckeisen, 1967

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO FACULTAD DE INGENIERIA	
Clasificación de rocas ígneas plutónicas	
FIGURA No. III-2 (A-B)	TESIS PROFESIONAL Julio de 1990



(C)

IA, B) Clasificación de las rocas plutónicas
 Rocas que contienen menos del 10% plagioclasas,
 feldespatos alcalinos y cuarzo (triángulo A)
 o feldespatoides (triángulo B)

El doble triángulo (C) muestra el grupo
 generalizado de nombres cuando los porcenta-
 jes pueden ser determinados con precisión

(A. L. Streckeisen, 1967)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
 FACULTAD DE INGENIERÍA

Clasificación de las rocas ígneas
 plutónicas

FIGURA No
 III-E (C)

TESIS PROFESIONAL
 Julio de 1990

III.1.4 Estructuras.

Según la forma de los cuerpos minerales, entre los yacimientos titaníferos asociados a rocas básicas y ultrabásicas, se distinguen los filones, los lentes, las bolsas, así como las -diseminaciones o capas en formas de schlieren, de cintas e irregulares; también es muy común encontrar estos yacimientos en -estructuras tabulares y estratiformes. La ilmenita de separación primaria aparece en su mayoría en forma de husillos microscópicos que se mezclan entre los cristales de magnetita y constituyen las titanomagnetitas, que poseen un contenido de titanio del 4 al 15%.

La posición y la morfología de las estructuras presentes en este modelo, está controlada por la estratificación magmática de las rocas en su proceso de diferenciación, por las zonas -concordantes activas de dislocación en los estados finales de cristalización de los macizos mineralizados y por procesos posteriores a la mineralización, como pueden ser fallas y dislocaciones longitudinales y transversales.

III.1.5 Hipótesis Genética.

Las diferentes teorías que han surgido para explicar el origen y modo de ocurrencia de los yacimientos titaníferos asociados a complejos de rocas básicas y ultrabásicas, se basan principalmente, en los procesos relacionados a la actividad magmática profunda.

Los yacimientos magmáticos se forman en el proceso de diferenciación del magma metalífero, directamente de la fusión de composición básica o ultrabásica. (Magmas primarios pertenecientes a la serie toleítica; tabla III.4). Al enfriarse tal fusión la acumulación de minerales formadores de menas puede transcurrir de tres modos diferentes (Smirnov, 1977):

TABLA III.4

TIPOS DE MAGMAS BASALTICOS.

Series	Piroxenos	Otros minerales ^b	Observaciones
Toleítica	Augita e hiperstena o pigeonita.	Puede estar presente vidrio o cuarzo en forma intersticial.	Las variedades oceánicas presentan más del 2.5% de TiO ₂ . Las variedades continentales aproximadamente el 1% de TiO ₂ .
Toleítica-olivino	Augita e hiperstena o pigeonita.	El olivino puede estar presente - considerablemente y puede reaccionar en los bordes con algún piroxeno.	Las variedades oceánicas presentan más del 2.5% de TiO ₂ . Las variedades continentales alrededor del 1% de TiO ₂ .
Magmas con alto contenido de Al ₂ O ₃ .	Augita, raramente pigeonita o hiperstena.	Típicamente no porfíricos; olivino común el cual reacciona fuera de los bordes de algún piroxeno.	Al ₂ O ₃ mayor al 17%, TiO ₂ aproximadamente del 1%; característica intermedia entre tipos toleíticos y alcalinos.
Magmas alcalinos.	Augita o titanaugita - (ligeramente pleocroico).	Feldespatoides, feldespatos alcalinos, puede estar presente también flogopita; no hay reacción en los bordes de piroxeno sobre olivino.	El contenido total de álcalis es alto.

^b Las plagioclasas están siempre presentes en adición a los minerales listados en esa columna.

En primer lugar, el magma mineral y silicato, al enfriarse se divide en dos líquidos inmiscibles (proceso de inmiscibilidad magmática), cuya cristalización por separado conduce al aislamiento de los yacimientos magmáticos de licuefacción.

En segundo lugar, en los magmas silicatados, los metales pueden entrar en la composición de los minerales de cristalización temprana, concentrarse en ellos antes de la solidificación completa del resto de la fusión y formar yacimientos magmáticos tempranos (de segregación y de acumulación).

En tercer lugar, en tales magmas de silicato, que contienen una cantidad elevada de compuestos volátiles, los metales y sus óxidos cristalizan a temperaturas más bajas, después de solidificarse la masa principal de los silicatos petrógenos del resto de la fusión, dando lugar a los yacimientos magmáticos tardíos.

Las divergencias que existen en cuanto a la formación de los yacimientos titaníferos relacionados a las rocas básicas y ultrabásicas, principalmente a las asociaciones anortosíticas, se deben a la divergencia en la interpretación de los datos de campo. Según Stanton (1972), las principales hipótesis propuestas para explicar la concentración de óxidos de titanio, son:

Magmático:

- 1) Cristalización fraccionada y diferenciación gravitatoria.
- 2) Segregación de un líquido residual (incluyendo el pegmatítico y ciertos líquidos eutécticos), formando cuerpos concordantes o discordantes.
- 3) Últimas etapas de actividad hidrotermal magmática que genera el depósito por reemplazamiento.

- 1) Cristalización fraccionada. Durante la historia del en-

friamiento de la masa ígnea madre, los óxidos ferro-titaníferos tuvieron supuestamente una cristalización temprana en abundancia. Por ejemplo, los olivinos de formación temprana aparecen depositados en la base de muchas intrusiones diferenciadas, formando capas ricas de ese mineral; por tanto, se piensa que muchas capas ricas en óxidos pudieron haberse formado por los mismos mecanismos. Esta teoría es ampliamente aceptada para depósitos estratiformes de cromita, y además, explica la posición de las capas ricas en óxidos ferro-titaníferos que se encuentran en el complejo de Duluth, Minnesota, E.U.A.

Asimismo, las relaciones texturales desarrolladas entre silicatos y óxidos, a menudo indican que éstos cristalizaron simultáneamente o después de la asociación de silicatos (plagioclasas incluidas en óxidos).

En los casos donde los óxidos ferro-titaníferos se presentan como cristales bien desarrollados (por ejemplo, en las capas de cromitas de Stillwater), la diferenciación gravitatoria pudo haber sido un proceso fundamental en la concentración de minerales de mena.

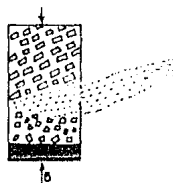
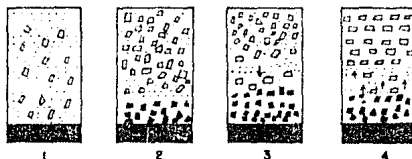
2) Segregación de un líquido residual. Aunque a menudo se ha sugerido que la ocurrencia de los óxidos se debe a partículas intersticiales, es decir, que cristalizan a partir de líquidos residuales intersticiales, como lo indican los silicatos, esto no siempre es necesariamente cierto.

Bateman (1951), ha propuesto la hipótesis del líquido residual en la formación de los yacimientos ferro-titaníferos, y refiere los procesos de concentración primaria como una acumulación gravitatoria tardía. Él postula que en ciertos casos, la diferenciación dirige a los extremos el enriquecimiento de los minerales de titanio.

En el proceso de diferenciación, las relaciones entre la fase sólida de cristales de silicatos y la fase líquida que se enriquece gradualmente con compuestos volátiles y metálicos, son bastante complicadas. Según la opinión de varios investigadores, en el magma mineralizado, al principio ocurre el enriquecimiento del sector del fondo con minerales ferromagnesianos que poseen mayor densidad que las plagioclasas. La fusión mineral residual que se acumula poco a poco también se desplaza hacia abajo, situándose más arriba de las acumulaciones minerales ferromagnesianas que cubren el lecho de la intrusión, mientras que los feldespatos más ligeros y otros silicatos, emergen formando la capa exterior del horizonte mineralizado. Al mismo tiempo pueden surgir depósitos minerales concordantes de intrusiones estratificadas. Si la fusión mineral, antes de cristalizar, es expulsada a través de las fallas en virtud de las tensiones tectónicas, puede dar lugar a la formación de cuerpos minerales transversales de inyección magmática tardía. El esquema de este proceso se muestra en la figura III.3, propuesto por Bateman (1951).

3) Reemplazamiento hidrotermal. Según Gillson (1956), las menas de minerales titaníferos que se encuentran relacionadas al macizo anortosítico de Adirondacks, fueron formadas por reemplazamientos hidrotermales de una mercla gabro-anortosítica, y no por segregaciones magmáticas, como lo proponen la mayoría de los autores. Ofreció una evidencia convincente de que todos los tipos de rocas en el área, fueron producidos por la alteración de la anortosita a lo largo de fallas y zonas de fracturas, y concluyó que la metalización, fue una fase última de la alteración.

Sin embargo, aunque existen claros indicios de alteración, es decir, reemplazamiento de feldespatos por óxidos en estos depósitos, se puede comprobar que la alteración es pequeña o casi no existe. Por tanto, los reemplazamientos hidrotermales



- 1.- Estado temprano, con la separación de cristales de silicatos
- 2.- Estado siguiente, con la separación de minerales ferrómagnesianos y su depósito en el fondo
- 3.- Penetración de la fusión mineral hacia abajo
- 4.- Movilidad de los minerales de silicato menos pesados y formación de depósitos concordantes
- 5.- Desplazamiento por presión de la fusión mineral y formación de depósitos de inyección

Según A. Bateman, 1951

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Esquema idealizado de formación de depósitos concordantes y transversales de yacimientos magmáticos tardíos.

FIGURA No
III-3

TESIS PROFESIONAL
Julio de 1990

o neumatolíticos están presentes en este tipo de yacimientos, pero no son determinantes en su formación.

Otra teoría (no magmática) que se maneja para explicar la formación de los depósitos de titanio relacionados a rocas anortosíticas, es el de la migración metamórfica. Esta sugiere que muchas series charnockíticas pueden adquirir el carácter mineralógico durante un metamorfismo en condiciones de temperatura y presión, correspondientes a las facies granulita. El proceso que se efectúa es el siguiente:

Cuando el metamorfismo está ausente o es de bajo grado, el fierro y el titanio forman parte de la estructura de minerales como la esfena, biotita, hornblenda y titanaugita. Pero en los cambios que envuelven al metamorfismo de alto grado, las reacciones que se generan producen el desarrollo de nuevas estructuras cristalinas, en las cuales los átomos de fierro y titanio liberan iones, concentrándose en forma más abundante.

En la actualidad aún están divididas las opiniones en cuanto al origen de las anortositas precámbricas (rocas más importantes que contienen grandes depósitos de minerales ferro-titaníferos); algunos autores sostienen que son acumulaciones de cristales de plagioclasas separados de un magma primitivo de composición radicalmente diferente (gabroide). Otros autores piensan que han sido inyectadas en forma de magma feldespático móvil, líquido en gran parte.

Buddington (1939), considera que las rocas anortosíticas, se derivan de un magma anortosítico-gabroide. Para explicar el origen de este magma, Buddington sugiere que el estrato básico de la corteza terrestre tiene una estructura estratificada análoga a la de los lopolitos estratificados. Lo describe como compuesto, por lo menos localmente, por una serie de capas diferenciadas gravitatoriamente: cuarzo-gabro y gabro; anortosita

bitownítica; norita y gabro olivínico; dunita y peridotita piroxénica. El magma anortosítico-gabroide se supone que se forma por fusión diferencial de la capa de anortosita-bitownita, y por la migración ascendente de la fracción líquida así desarrollada.

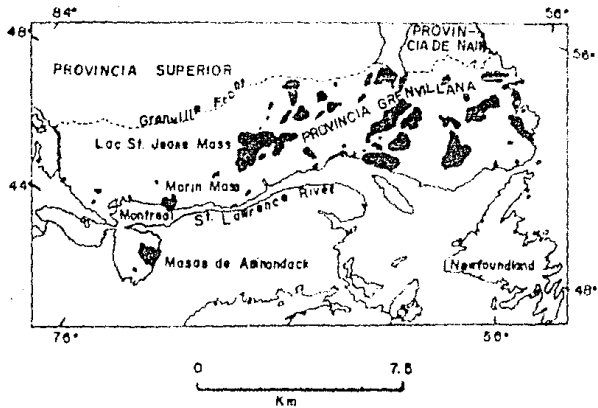
Esta hipótesis debe ser considerada como una especulación - que no está basada en pruebas directas, porque no existe ninguna otra indicación de que la corteza tenga en realidad la estructura del tipo que este autor sugiere.

Otra posibilidad para explicar el origen del magma anortosítico-gabroide, es que se origine a gran profundidad, quizá del orden de los 200 km.

Como se puede observar, existe aun controversia para poder explicar el origen de los yacimientos titaníferos asociados a rocas básicas y ultrabásicas, sobre todo por la presencia de la anortosita precámbrica, la cual, ha sido objeto de diferentes estudios. Sin embargo, la mayoría de los autores coincide en señalar a la hipótesis de segregación magmática, como la más adecuada; lo cual se deduce de los diferentes estudios e investigaciones efectuados a los más importantes yacimientos minerales de este tipo.

Los estudios realizados a los yacimientos de magnetita-ilmenita, cerca de Lake Sanford, Nueva York (figuras III.4 y III.5) indican que estas menas son diferenciadas de un magma gabro-anortosítico. Se cree que las menas se formaron de segregaciones residuales de un líquido de magnetita-ilmenita, que fue en parte atrapado en los intersticios de los cristales y forzado en parte en la roca todavía plástica. Se encuentra material que gradúa desde el gabro, conteniendo menos del 10% de magnetita-ilmenita, a la roca casi pura de magnetita-ilmenita.

En Allard Lake, Canadá, existen los mejores yacimientos de

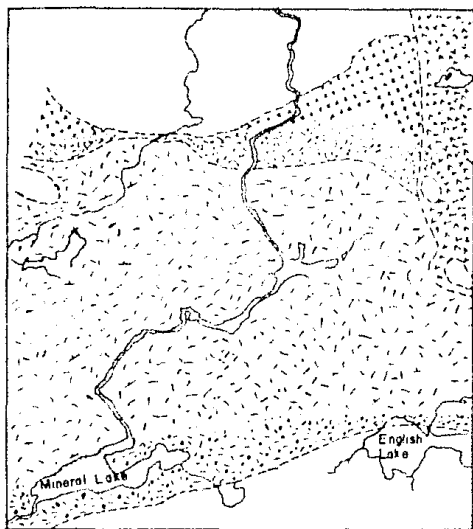








UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA



Los mayores plutones ortostoficos
(en negro) en la provincia de Grenville de
Canada y Nueva York

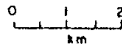
FIGURA No.
III-4

TESIS PROFESIONAL
Julio de 1990



-  Granito porfirico
-  Granito
-  Ferrodiabrita
-  Anortosita
-  Gabro anortosifco de olwino
-  Rocas igneas básicas

 Contacto geológico
 Contacto gradual



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA

Mapa geológico de la intrusión anortosifca de Mineral Lake al noroeste de Wisconsin, E. U. A.

FIGURA No
III-5

TESIS PROFESIONAL
Julio de 1990

ilmenita-hematita, los cuales han sido interpretados por diversos geólogos, como segregaciones magmáticas.

En el yacimiento de Lac Tío, Canadá, descubierto en 1946, y que es uno de los depósitos de titanio más importantes en su tipo, se encuentran altas concentraciones comerciales de ilmenita en anortositas, lo cual indica una relación genética entre la ilmenita y la anortosita. La roca huésped ha sido alterada solo localmente y excepto la presencia de biotita y algunos sulfuros, no se ha encontrado ningún dato que indique la presencia de líquidos mineralizadores comunes asociados en masas de origen hidrotermal.

De acuerdo a la hipótesis propuesta por Bateman (1951), la evolución de los yacimientos titaníferos mexicanos de Oaxaca (tipo Mirador, Pluma Hidalgo y Huitzo), siguió la siguiente evolución genética (Carlos H. Schulze S., 1988):

i) Una masa homogénea de composición anortosítica se emplaza en la secuencia paragneísica y ortogneísica con deficiencia en hierro respecto al titanio.

ii) La diferenciación selectiva inicial se lleva a cabo por acumulación de cristales y plagioclasas anortosíticas.

iii) Cristalización avanzada de plagioclasas y de apatita acompañada con una segregación en el líquido de composición ferrotitanífera (ilmenita-magnetita) con residuo de TiO_2 (rutilo).

iv) Presión filtrante que actúa sobre el magma diferenciado, que excluye las fases líquidas, nelsoníticas, quedando otros atrapados en las rocas anortosíticas ya muy avanzada su cristalización.

v) Cristalización de las fases extraídas (inyectadas discordantemente o concordantemente), quedando una mínima fase mi

cropegmatítica incipiente de composición cuarzo-feldespática.

vi) Consolidación del cuerpo sobre el cual actúa un metamorfismo regional en receso, propiciando una esquistosidad de los cuerpos anortosíticos cerca de la zona de contacto con los gneises.

Probablemente en la etapa iv), parte de la apatita y el rutilo aunado con la ilmenita y otras fases (líquidas) de importancia menor, migraron durante la actuación de la presión filtrante hacia zonas más estables, buscando el equilibrio físico-químico dentro del cuerpo anortosítico, dando lugar a los depósitos tipo Pluma Hidalgo, en una incipiente fase pegmatítica. En cambio, los yacimientos nelsoníticos, por su construcción -paragenética más pesada, se inyectaron concordantemente en la foliación de la roca encajonante en metamorfismo. Esta última inyección perpendicular a la presión ejercida, probablemente -dio lugar a los yacimientos nelsoníticos tipo Huitzo.

En conclusión, se puede decir que las dimensiones y la intensidad de acumulación de menas titanomagnetíticas es tanto -mayor, cuanto más halla durado el enfriamiento del magma, más perfecta haya sido su diferenciación y más intensos hayan sido los movimientos tectónicos acompañantes de este proceso, que -originaron zonas debilitadas y desplazaron hacia sus bordes la fusión mineral fraccionada. Debido a esto, las condiciones más favorables son las de penetración y enfriamiento de los magmas mineralizados en las grandes fallas tectónicas.

El contenido de óxido de titanio -según la opinión de algunos autores-, disminuye en función del descenso de la temperatura de formación de las titanomagnetitas, limitada dentro del intervalo de 1200 a 300°C y catalogan los aislamientos de bajas temperaturas como formaciones metasomáticas.

Aunque actualmente es más aceptada la idea de que la forma-

ción de los yacimientos titaníferos asociados a rocas básicas y ultrabásicas (sobre todo a las anortositas), se debió a procesos de segregación magmática, no se pueden descartar del todo las demás hipótesis.

III.1.6 Importancia Económica.

Actualmente se conocen yacimientos titanomagnetíticos muy grandes, asociados a rocas básicas y ultrabásicas; sus reservas minerales pueden ser de miles de millones de toneladas y con cantidades del metal del orden de decenas de millones de toneladas.

Las menas de estos yacimientos son complejas; pueden contener desde un 10 hasta un 53% de hierro, de 2 hasta 50% de óxido de titanio y de 0.1 a 0.5% de vanadio en solución sólida en la magnetita; en casos excepcionales, el contenido de trióxido de vanadio alcanza el 8% (India y Pakistán).

La tabla III.5 muestra de manera generalizada el contenido de ilmenita y rutilo presentes en los cuerpos ígneos básicos y ultrabásicos.

TABLA III.5 CONTENIDO EN MINERAL DE TITANIO EN CUERPOS

Categoría de los cuerpos	Ilmenita en %	Rutilo en %
Capas ricas	40 a 50	3
Capas medias	20 a 30	3 a 5
Capas pobres	2 a 20	1.5 a 3

Fuente: V. M. Kreiter, 1978.

A excepción de los placeres de playa de Australia; los yacimientos asociados a rocas básicas y ultrabásicas son los más -

grandes e importantes comercialmente.

III.1.7 Principales Yacimientos en el Mundo.

Canadá. Cerca de Allard Lake, Quebec, se encuentran grandes yacimientos de ilmenita-hematita, los cuales se encuentran entre los mayores depósitos de ilmenita existentes en el mundo. En la tabla III.6 se muestra el análisis del mineral de titanio de esta provincia.

TABLA III.6 ANALISIS DEL MINERAL DE TITANIO DE ALLARD LAKE, - QUEBEC.

Constituyentes	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
TiO ₂	34.8%	36.0%	34.4%
Fe	38.0	42.8%	39.1
S	0.36	0.40	0.39
P ₂ O ₅	0.004	0.01	0.012
Cu	0.037	0.12	0.14
V	0.22	0.21	0.21
Mn	0.08	0.09	0.10
Ni	0.03	0.01	0.02
Co	0.014	0.013	0.019

Según Hammond, 1952.

Estos yacimientos se encuentran en una gran masa de anortosita y anortosita-gabro, que invade las rocas metamórficas precámbricas y calizas paleozoicas.

Los principales depósitos incluyen: el yacimiento de Lac Tío, el cual tiene una forma aproximadamente triangular y un área de 54 ha; contiene unos 125 millones de toneladas de mena; los yacimientos de la montaña Magpie; los de St. Urbain y los del

área de Lac du Pin-Rouge.

Estados Unidos. Los yacimientos de titanio de Sanford Lake, N.Y., datan desde 1826, pero fueron explotados comercialmente a partir de 1946. Actualmente producen más de 280 000 toneladas de concentrado de ilmenita anualmente, y es la mayor mena de ilmenita asociada a rocas existentes en los Estados Unidos.

Los depósitos de titanio de Virginia, los cuales se encuentran asociados con anortositas, presentan reservas que ascienden a 20 millones de toneladas y contienen alrededor de 7.0% de TiO_2 .

Otros yacimientos de minerales titaníferos asociados a rocas básicas y ultrabásicas se encuentran en las montañas de San Gabriel en los Angeles, California. La mineralización se encuentra diseminada en rocas anortosíticas y gabbroicas; presentan leyes de 4.5% de óxido de titanio.

Noruega. El yacimiento noruego de Blaafjeldite (Sogndal), es una gran masa de ilmenita-magnetita impregnada en un cuerpo anortosítico, la cual después de la concentración produce del 47 al 45% de óxido de titanio. El depósito contiene alrededor de 30 millones de toneladas de ilmenita.

China. Un enorme yacimiento en China reporta mil millones de toneladas de magnetita titanífera, con alrededor de 7% de titanio en forma de ilmenita, cerca de la provincia de Dukou, Sechuan (Brady, 1981).

Otros países con producciones menores de minerales titanio-magnetíticos son: República de Sudáfrica, Tailandia, Finlandia, Suecia, Hungría, Australia, India, URSS.

Principales yacimientos potenciales en México.

Pluma Hidalgo, Oax. Este tipo de yacimiento fue descubier-

to por Carlos J. Lujra, en el año de 1939, en las inmediaciones del poblado de Pluma Hidalgo. Posteriormente fue estudiado por varios autores, entre ellos, Paulson (1964), que describe a la roca encajonante y la clasifica como una anortosita, por analogía con aquella que se encuentra localizada en los yacimientos de Virginia, E.U.A.

La roca encajonante contiene alrededor de 5% de cuarzo en forma de lentes, bandas y cordones. Los feldespatos antipertíticos se componen de oligoclasa cálcica o andesina (75-80% de la antipertita) y anortoclasa, probablemente formada por reemplazamiento.

La asociación mineral característica es de ilmenita, rutilo y apatita en lentes irregulares paralelos a la estructura gnéssica.

La hipótesis más aceptada de acuerdo con Stanton (1972) con respecto a su origen es la magmática con segregación de un líquido residual, la cual fue mencionada anteriormente.

Con respecto a las reservas de TiO_2 , se reportan los siguientes resultados:

Reservas positivas.....	5,197.5 toneladas
Reservas probables.....	9,082.2 toneladas
Reservas posibles.....	22,600.0 toneladas
Reservas inferidas.....	32,317.6 toneladas

La ley promedio es de 29.43% de TiO_2 , sumando un total de 90,900 toneladas.

Ihuizto, Oax. Fueron reportados como tales por E. Schmitter en 1970. En general, los yacimientos están compuestos del mineral ilmenita, que contiene hierro y fósforo. También se encuentran el rutilo en cantidades subordinadas.

La ilmenita se presenta diseminada o como ilmenita masiva - en mantos, ambas formas siguiendo una actitud paralela a la foliación del gneis que las encajona. Alcanzan espesores hasta - de 20 m.

Estos yacimientos contienen entre 20 y 44% de TiO_2 . Con base en la morfología y dimensiones de los mantos, se estiman reservas potenciales adicionales de 3.4 millones de toneladas. - Las reservas totales evaluadas de minerales de titanio en el área de Huitzo ascienden a 8 132 000 toneladas.

Mirador, Oax. Parece ser que estos depósitos no han sido - descritos detalladamente. Se encuentran encajonados en rocas - anortositicas, compuestas esencialmente de andesina de grano me dio a fino. La mena consta de ilmenita que varía de 48 a 51% de TiO_2 . Estos yacimientos son muy similares a los depósitos de - Stanford Lake, N.Y., E.U.A.

Existen otros yacimientos de titanio en México, pero no han sido estudiados detalladamente.

III.2 MODELO DE YACIMIENTOS DE TITANIO ASOCIADO A ROCAS HIPER-ALCALINAS Y SUS CARBONATITAS.

Los yacimientos asociados a rocas hipercalcalinas y sus car benatitas son notables, ya que constituyen concentraciones de sustancias poco comunes, como son: tierras raras, niobio, uranio, cobre, titanio; así como depósitos de fósforo (apatita). Ultimamente estos yacimientos han sido objeto de numerosos estudios, debido a que presentan gran interés económico.

A continuación se describen las principales características del modelo:

III.2.1 Paragénesis.

Una característica esencial de la asociación mineralógica - que presentan los complejos hiperalkalinos, es la ausencia total o casi total de cuarzo, lo cual manifiesta un déficit de silice en las rocas.

La asociación mineralógica de los complejos alcalinos está representada por la apatita; los minerales del niobio y del tántalo; las tierras raras; pero sobre todo, por los minerales de circonio, titanio y uranio-torio. Muchos minerales se encuentran asociados en un mismo complejo, como se demuestra en Chibine, península de Kola, URSS; en donde se explotan los minerales de fósforo (apatita), pero también son recuperados los del titanio y de tierras raras.

La asociación mineralógica general de las rocas hiperalkalinas y sus carbonatitas es la siguiente:

Ilmenita, titanio-magnetita, esfena, perovskita, rutilo, anatasa, brookita, a veces niobio, tierras raras y apatita.

La asociación que presentan los complejos propiamente hiperalkalinos es: titanomagnetita, ilmenita, a veces apatita, magnetita, esfena y perovskita.

Las carbonatitas presentan la siguiente asociación: rutilo, brookita, niobio en rutilo, anatasa; además de cantidades pequeñas de vanadio ligado al óxido de titanio; tierras raras, sulfuros de cobre, fosfatos, magnetita, vermiculita, flogopita y minerales de uranio-torio. La tabla III.7 muestra los principales minerales que ocurren en las carbonatitas.

TABLA III.7 PRINCIPALES MINERALES QUE OCURREN EN LAS CARBONATITAS.

Mineral	Abundancia	Mineral	Abundancia
Elementos nativos		...Oxidos, hidróxidos (cont.)	
Gráfico.....	R	Ilmenita.....	MC, C
Oro.....	MR	Rutilo.....	MC, C
Plata.....	MR	Casiterita.....	MR
Carburos		Anatasa.....	R
Moissanita.....	MR	Brookita.....	K
Sulfuros, etc., y sulfosales		Cerianita.....	MR
Calcocita.....	MR	Badeleyita.....	MC
Digenita.....	MR	Torianita.....	MR
Bornita.....	MR	Brucita.....	MR
Galena.....	MC	Goethita.....	R
Esfalerita.....	MC	Espínula.....	MR
Calcopirita.....	MC	Magnesioferrita...	MR
Pirrotita.....	MC	Magnetita.....	C, E
Valerita.....	MR	Perovskita.....	MC, C
Millerita.....	MR	Pirocloro.....	C
Pentlandita....	MR	Pandaita.....	MC
Cubanita.....	MR	Betafita.....	MC
Covelita.....	MR	Columbita.....	MC
Linarita.....	MR	Mossita.....	MR
Estibnita.....	MR	Fersmita.....	MC
Pirita.....	C	Fergusonita.....	MR
Dravoita.....	MR	Haluros	
Marcasita.....	R	Fluorita.....	C, E
Arsenopirita...	MR	Sellaíta.....	R
Molibdenita....	R	Criolita.....	MR
Tetraedrita....	MR	Carbonatos	
Oxidos, hidróxidos		Calcita.....	E
Periclasa.....	MR	Siderita.....	MC, E
Cerindón.....	MR	Rodocrosita.....	R(?)
Hematita.....	C, E	Magnesita.....	MR
		Araonita.....	MR

E = esencial; C = común; MC = moderadamente común; R = raro; MR = muy raro; ? = abundancia en duda.

Mineral	Abundancia	Mineral	Abundancia
Carbonatos (Continuación)		Silicatos (Continuación)	
Witherita.....	MR	Natrolita.....	R
Estroncianita.....	MC	Thomsonita.....	MR
Dolomita.....	E	Eulandita.....	MR
Ankerita.....	E	Chabasita.....	MR
Röntgenita.....	MR	Melanita.....	MR
Bastnaesita.....	MC, E	Crossularita.....	MR
Termonatrita.....	E	Epidota.....	MR
Carbonatos de Ca-Na-K.	E	Allanita.....	R
Sulfatos		Cerita.....	MR
Barita.....	C, E	Zircón.....	MC
Celestita.....	R	Torita.....	R
Anhidrita.....	R	Torogunita.....	R
Fosfatos		Esfena.....	MC
Monacita.....	MC	Wollastonita.....	MC
Florencita.....	R	Berilo.....	MR
Goyasita cérica.....	MR	Vesuvianita.....	MC
Apatita.....	C, E	Prelinita.....	MR
Boratos		Diópsida.....	MC
Ludwigita.....	?	Augita.....	MC
Silicatos		Augita-aegirina....	C
Olivino.....	MC	Aegirina.....	C
Monticelita.....	R	Hornblenda.....	MR
Topacio.....	MR	Tremolita.....	R
Andradita.....	MR	Actinolita.....	R
Sanidino.....	MR	Tremolita sódica....	R
Anortoclasa.....	MR	Actinolita sódica...	E
Albita.....	MC	Hastingsita.....	R
Escapolita.....	R	Barkevelita.....	MR
		Arvedsonita.....	MR
		Riabekita.....	MC
		Glaucofano.....	R

E = esencial; C = común; MC = moderadamente común; R = raro; MR = muy raro; ? = abundancia en duda.

Mineral	Abundancia
Silicatos (continuación)	
Crisotilo.....	MC
Antigorita.....	MC
Mellilita.....	R
Talco.....	R
Muscovita.....	R
Biotita.....	R
Flogopita.....	MC
Manganofilita.....	MR
Estilpnomelano.....	MR
Vermiculita.....	MC
Clorita.....	MC
Clinocloro.....	MR
Dickita.....	MR
Nefelina.....	MC
Analcita.....	MR
Noseana.....	MR
Cuarzo.....	C
Ortoclasa.....	MC
Microclina.....	MC

E = esencial; C = común; MC = moderadamente común; R = raro; MR = muy raro; ? = abundancia en duda.

(Adaptado por Heinrich, 1966)

III.2.2 Alteraciones.

Es muy común que las rocas hipercalcalínicas, sobre todo las sienitas de nefelina, debido a procesos de intemperismo, se vean afectadas y sufran alteraciones superficiales que dan lugar a yacimientos residuales de bauxita (figura III.13), en don de el titanio se encuentra presente. Simultáneamente a este pro ceso, algunas concentraciones manifiestan cierto tipo de alte ración, la cual está demostrada por la presencia de la "calde sita", de Pocos de Caldas, Brasil, que consiste en una mezcla de baddeleyita y de circón, que precipita en las pequeñas cavi dades o fisuras de las zonas alteradas de las rocas nefelini cas, frecuentemente con texturas colóformas. Estos productos - supergénicos son formados a partir del circonio, contenido en los silicatos de sus minerales (eudalita, catapleita, rosembu quita, lavenita, astrofilita), los cuales contienen frecuentemente un 0.5% de U_3O_8 .

III.2.3 Litología.

Las rocas hipercalcalinas y alcalinas, en particular las sienitas nefelínicas, son complejos que presentan un déficit de sílice más o menos acentuado. Están formadas por concentraciones singulares de minerales titaníferos, que llegan en varios casos, a formar yacimientos comercialmente explotables. En la tabla III.8 se presenta la composición química de las sienitas nefelínicas, ijolitas y sus rocas asociadas.

Los minerales ferromagnesianos de las sienitas nefelínicas son fuertemente sódicos; entre los más comunes se encuentran - los piroxenos (aegirina y augita-aegirina) y algunos anfíboles (arfvedsonita, riebeckita, barquevickita). El titanio es abundante, aparte de sus formas presentes: esfena, perovskita, ilmenita, titanomagnetita, rutilo, etc., también se encuentra en

TABLA III.6

COMPOSICIONES QUÍMICAS DE SIENITAS NEFELÍNICAS, IJOLITAS Y ROCAS ASOCIADAS.

Constituyentes.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	49.32	39.50	19.96	58.35	51.83	59.04	45.73	35.50	39.5
TiO ₂	1.32	0.70	0.60	0.49	0.39	1.80	3.30	7.40	2.9
Al ₂ O ₃	18.97	13.29	22.30	16.10	22.63	19.50	16.27	4.10	14.0
Fe ₂ O ₃	1.50	1.65	2.51	3.27	1.56	1.44	2.93	9.40	7.6
FeO.....	6.39	2.32	2.25	3.51	3.45	2.10	0.05	6.90	2.8
MnO.....	0.13	0.03	0.03	0.04	Tr	Tr	0.55	0.10	0.2
HgO.....	3.13	1.10	0.68	0.50	Tr	0.24	3.63	11.90	4.3
CaO.....	7.43	2.53	3.06	2.23	1.94	2.45	9.99	19.70	18.3
Na ₂ O.....	5.53	5.97	8.11	6.79	10.63	6.78	4.68	0.60	5.2
K ₂ O.....	4.14	5.78	6.01	6.07	4.16	5.02	2.42	3.00	2.4
H ₂ O.....	0.60	0.81	1.27	0.30	0.18	0.82	0.85		
H ₂ O.....	0.03	0.12	0.10	0.04	--	0.13	0.25	0.30	1.2
P ₂ O ₅	0.86	0.31	0.27	0.21	--	1.05	0.96	1.30	1.2
CO ₂	0.25	0.28	1.88	0.17	0.66	Tr	0.38	0.20	0.5
Cl.....	0.28	Tr	0.10	0.30	0.82	--	--	Tr	--
F.....	0.10	0.01	0.07	0.07	--	--	--	0.10	--
T o t a l...	100.30	100.19	100.56	100.44	100.65	100.38	99.99	99.50	100.1

Explicación de la tabla

- 1.- Essexita andesínica, complejo de Okonjeje, Africa Sudoccidental.
- 2.- Pulaskita, complejo de Okonjeje.
- 3.- Foyaita, complejo de Okonjeje.
- 4.- Tianguaita, complejo de Okonjeje.
- 5.- Sienita nefelínica (dotroíta), Ditro, Carpathians.
- 6.- Sienita alcalina (nordmarkita, Ditro).
- 7.- Essexita, Ditro.
- 8.- Piroxenita biotítica media, Iron Hill, Colorado.
- 9.- Ijolita media, Iron Hill, Colorado.

Fuente: Francis J. Turner y John Verhoogen, 1978.

los silicatos, particularmente en la augita titanífera. El flúor es otro elemento presente en abundancia, se encuentra principalmente en la fluorita y la apatita.

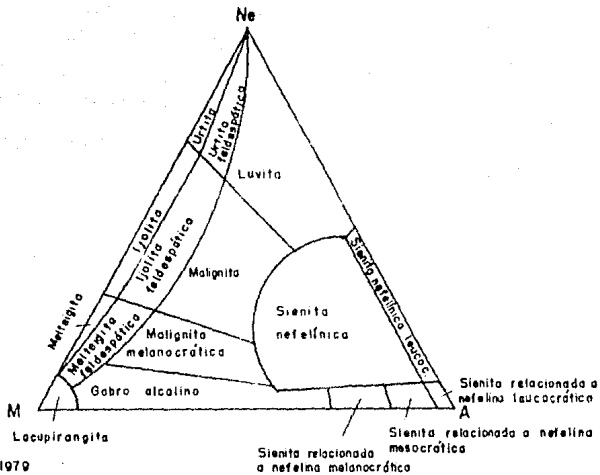
Entre las rocas de los complejos de sienitas de nefelina que llegan a conformar yacimientos de titanio asociados, destacan las ijolitas, urtitas, jacupiranguitas, melteigitas, laurviquitas, pulasquitas, shonkinitas, etc.; además de las piroxenitas y pegmatitas de sienita-nefelina. Una clasificación de las rocas ígneas alcalinas más comunes, se muestra en la figura III.6.

Las carbonatitas son rocas granulares, constituidas principalmente de concentraciones endógenas de carbonatos de calcio y magnesio, espacial y genéticamente asociadas a intrusiones complejas alcalino-ultrabásicas de zonas profundas de la corteza terrestre. Los minerales esenciales de las carbonatitas son la calcita, dolomita y ankerita; contienen además, concentraciones de fosfatos, hierro y cantidades pequeñas pero significativas de minerales de tierras raras, niobio, uranio, torio, cobre, titanio y otros, que representan yacimientos susceptibles de explotarse comercialmente.

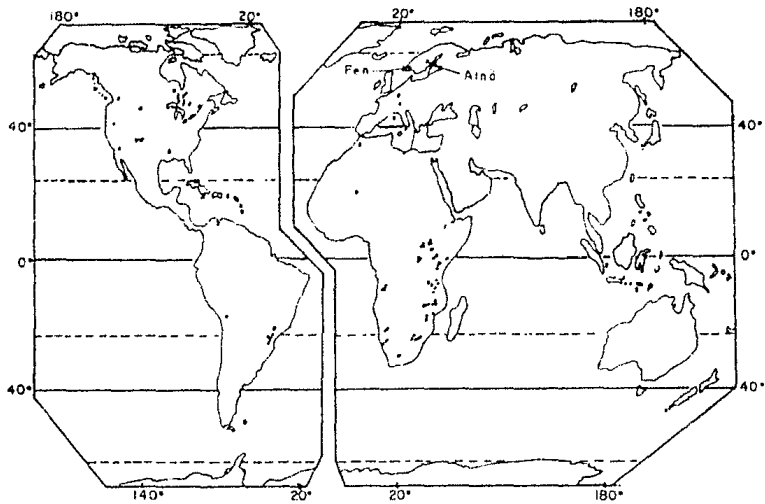
Las carbonatitas se encuentran siempre asociadas a complejos de rocas subsaturadas del tipo de las sienitas nefelínicas.

Los complejos hiperalcalinos y sus carbonatitas se encuentran distribuidos en todos los continentes, con excepción de la Antártida, particularmente en el interior de la corteza continental (figura III.7), donde los regímenes tectónicos son de estilo extensional; en las partes más estables y gruesas de los cratones, en las zonas de rift o de incipiente apertura continental, en aulacógenos y en márgenes continentales afectadas por fallamientos corticales profundos.

Una de las mayores concentraciones de rocas alcalinas y sus carbonatitas ocurre en África, donde se puede demostrar su aso



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	
FACULTAD DE INGENIERÍA	
Clasificación de las rocas ígneas alcalinas	
FIGURA No. III-6	TESIS PROFESIONAL Julio de 1990



R. L. Stanton, 1972

Fig. III-7

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

Distribución de las más importantes
localidades de carbonatitos en el
mundo

FACULTAD DE INGENIERIA	TESIS PROFESIONAL Julio de 1990
---------------------------	------------------------------------

ESTA TESIS
HA DEBE
SALIR DE LA
BIBLIOTECA

ciación espacial con las zonas de apertura continental (rift), de la parte oriental del continente.

Las rocas alcalinas y sus carbonatitas ocurren a lo largo de toda la columna geológica, desde el Precámbrico hasta el Reciente. La mayor existencia de estas rocas se tiene en el Mesozoico.

III.2.4 Estructuras.

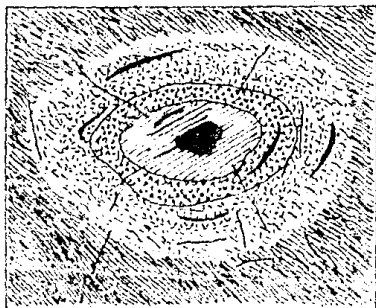
Los complejos hiperalcalinos y sus carbonatitas tienen aspectos de lopolitos y se caracterizan por presentar frecuentemente una estructura cónica, concéntrica o anular (figura III.8), condicionada por la penetración sucesiva de jibinitas y sienitas nefelínicas, como sucede en los yacimientos de la península de Kola, URSS.

En general, las rocas que se encuentran en el interior de la estructura concéntrica, son más básicas y más recientes.

En estos complejos se distinguen las siguientes estructuras: stocks zoneados concéntricos del tipo de chimenea volcánica, tapones ("plugs"), sills, capas cónicas en forma de lopolitos, sistemas de diques anulares o semianulares, como rellenos de profundas fisuras cónicas y también intrusiones híbridas que incorporan elementos de las estructuras anteriores. Estas estructuras se encuentran siempre asociadas al metasomatismo alcalino (Smirnov, 1977).

El papel del gas y sus explosiones está manifestado en las carbonatitas, ya que frecuentemente se encuentran brechadas. El comportamiento intrusivo se manifiesta por la formación de un tapón carbonatítico subyacente por una chimenea creada por la acumulación de gas.

La formación de fisuras radiales, sills cónicos y diques -



0 1 2 Km

- Diques lamprófidos (radiales y tangenciales)
- Contacto metamórfico
- Carbonatita
- Rocas ultramáficas: máficas feldespáticas y ultrafeldespáticas
- Sienita nefelínica
- Sienita fenita
- Gneis granítico con pegmatita muy fracturado (Zona de fenitización)
- Gneis granítico

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Esquema geológico idealizado de un
complejo alcalino-ultramáfico carbonatí-
tico. Según E. W. Heinrich, 1966.

FIGURA No.
III-B

TESIS PROFESIONAL
Julio de 1990

anulares inyectados de carbonatitas y rocas silicatadas se debe a explosiones provocadas por el aumento de presión de los gases. Varias fracturas de sills cónicos pueden desarrollarse si se producen diversas explosiones. La progresión hacia la superficie es marcada por una serie de tapones y sills cónicos. Finalmente, en los niveles superficiales se puede formar un cono volcánico de lavas alcalinas y carbonatitas (Smirnov, 1977).

Las dimensiones de los complejos hiperalcalinos son muy grandes, en general alcanzan distancias de cientos de kilómetros.

III.2.5 Hipótesis Genética.

Entre las diversas hipótesis petrogenéticas propuestas para explicar la génesis de los complejos hiperalcalinos, se encuentra la que propone que un magma subalcalino de composición variable, entre el basalto y el granito, es asimilado por rocas carbonatadas. En el transcurso de su evolución sufre una pérdida considerable de sílice y se enriquece de CO_2 y H_2O . Las partes calcáreas son movilizadas y redepositadas en forma de carbonatitas.

Estas hipótesis clásicas se apoyan en el hecho de que los macizos alcalinos se encuentran encajonados por rocas calcáreas o atravesando a estas rocas en profundidad. Sin embargo, la existencia de macizos idénticos ricos en carbonatitas que no tienen ninguna relación con formaciones sedimentarias calcáreas, ponen en duda esta teoría. Por consiguiente, lo más probable es que los complejos alcalinos se deriven de la simple diferenciación del magma, sin la intervención de otros materiales (rocas calcáreas).

La versión puramente metasomática propone que la naturaleza alcalina de los magmas subsaturados con los que siempre se asocian los complejos alcalinos y sus carbonatitas, tiende a -

producir un fenómeno muy particular y diagnóstico de tales rocas, y que consiste en un metasomatismo alcalino o alteración alcalina producida por las rocas encajonantes en las que se alojan las rocas hiperalcalinas.

Este metasomatismo se refleja en una ganancia de potasio, comúnmente traducido por un desarrollo intenso de cristales de feldespatos potásicos. Este fenómeno fue primeramente descrito en el área de Fen, y se le denomina fenitización; a las rocas así producidas se les llama fenitas.

Fenitas y fenitización, sólo ocurren si en el área se encuentran presentes carbonatitas (Stanton, 1972 y Smirnov, 1977).

El metasomatismo es producto de la emanación gaseosa relacionado con grandes fracturas debidas a menudo, a un vulcanismo fisural. Esto está particularmente comprobado en las sienitas nefelínicas del macizo de Kirumba, Congo.

La concepción metasomática está apoyada en los siguientes hechos: presencia de carbonatos, "fenitización de rocas encajonantes", variación en la composición de nefelinas en función de un medio propicio.

El problema genético, sin embargo, es aún más complicado debido a la relación de ciertas rocas nefelínicas con las charnockitas (India), sin trazas de material calcáreo. Por tanto, se piensa que los procesos genéticos de estas rocas estuvieron acompañados por fenómenos de convergencia.

La evolución del magma podrá apartarse como un grupo "agpatítico", o $K_2O + Na_2O > Al_2O_3$ y $K_2O + Na_2O > 1/6 SiO_2$, que sigue la línea de cristalización inversa a la de las rocas graníticas. El orden de cristalización sería: nefelina, feldespatos alcalinos, silicatos de circonio y titanio, silicatos de sodio y hierro (píroxenos y anfibolitas sódicas), apatita, etc.. La

nefelina y los feldespatos que constituyen los minerales más ligeros del magma, se acumulan hacia las partes altas, formando las sienitas nefelínicas, así como ijolitas. El magma residual, más pesado y compuesto por ferromagnesianos sódicos, enriquecidos con Ti, Zr, Fe, P y elementos volátiles que disminuyen su viscosidad, se acumulan en las partes bajas. Los minerales de hierro-titanio con apatita forman así, parte de las rocas ferromagnesianas: piroxenitas, jacupiranguitas y peridotitas.

Los residuos de la cristalización, enriquecidos con materiales volátiles, pueden llegar a formar filones de roca, los cuales son clasificados como pegmatitas. Las pegmatitas alcalinas más conocidas con las sienitas de nefelina, que pertenecen al grupo "agpaítico".

Las pegmatitas de sienitas nefelínicas difieren profundamente de las pegmatitas graníticas, debido a que aquéllas presentan una abundancia de minerales oscuros, en particular de aegirinas, que se explica precisamente por la cristalización tardía de ese mineral, además de la característica ausencia de cuarzo. Las pegmatitas de sienitas nefelínicas contienen minerales raros con elementos que sus dimensiones iónicas se adaptan y entran en las estructuras de los minerales ordinarios (circonio, tierras raras, torio, titanio). Ver la tabla III.2.

En otras pegmatitas alcalinas aparecen todavía minerales más particulares, como la apatita, flogopita y magnetita, que se disponen en la periferia de estos complejos.

En cuanto al origen de las carbonatitas, el consenso general entre diversos investigadores dedicados a este tema, ha sido el de concluir que las carbonatitas representan la última fase de cristalización de magmas muy diferenciados ricos en potasio.

TABLA III.9 TIPOS DE YACIMIENTOS GENÉTICAMENTE RELACIONADOS CON ROCAS ALCALINAS.

Tipo de rocas	Estado	Minerales característicos	Elementos característicos	Ejemplo de yacs.
Sienitas sodalitas	Neumatolítico	Steenstrupine, epistolita, chkalovite, sotensonita, monacita, aegirina.	Ce, Th, U, Fe, Nb	Ilinaussaq, Lovozero
Sienitas nefelínicas-eudialitas	Magnético	Eudialita, microclina, aegirina, rinkite.	Zr, Nb, Ce	-----
Urtitas	Magnético	Nefelina, apatita, Nb-Ce-perovskita, titanita, eudialita.	P, Al, Nb, Ti, Ce, Zr, F	Múbina Lovozero
Focos alcalinos ultrabásicos	Neumatolítico	Perovskita, titanomagtita, diópsido. a) filospita (vermiculita), diópsido, titanita. b) magnetita, apatita, haddleyita, pirocloro. c) calcopirita. d) calcita, pirocloro, apatita, perovskita, magnetita.	Ti, Fe, Mg, Ca, Ce K, Mg, Ca, Ti Fe, Mg, Ca, P, Zr, Nb, Ta	Kovdor Kovdor, Falaboro
	Hidrotermal	e) ankerita, redocrosita, pirocloro, bastnaesita, estroncionita, barita, fluorita.	Nb, Ce, Ba, Sr, Fe, Mn	----- Falaboro Oka
Sienitas Nefelínicas y alcalinas	Neumatolítico	a) albita, zircón, pirocloro, titanita, apatita, britolita.	Zr, Nb, Ti, P, Ce, Ca, Na	Miask
	Hidrotermal	b) Calcita, pirocloro, - apatita.	Nb, P, Ca	Miask
	Supergénico	Bauxita (gibbsite) Leucoxeno (anatasaj).	Al, Fe, Ti	Los
Rocas potásicas ricas en leucita	Magnético	Leucita, Kalliofilita, microclina, nefelina, apatita.	K, Al, Ce, P	Siberia e Italia
	Hidrotermal	Barita, fluorita, bromita, torita.	K, Ba, Te, U, Th, F	-----
Sienitas alcalinas	Neumatolítico	Albita, microclina, bari-lita, epididimita, aegirina, niobiofilita, joaquinita.	Fe, Nb, Cu, Bi	Seal Lake

Tipo de rocas	Estado	Minerales característicos	Elementos característicos	Ejemplo de
	Hidrotermal	Fluorita, leucosfinita, bastnaesita.	Be, F, Ce	Siberia
Granitos alcalinos	Magmático-neumatolítico	Albita, riebeckita, colubrita, casiterita, zinnwaldita, helvita, pirocloro, xenotime, criolita.	Nb, Ta, Sn, Zr, Li, Be, F	Jos plateau
	Hidrotermal	Hematita, siderita, fluorita, erita, bastnaesita, monacita, criolita.	Fe, Ba, Ce, Y, Sr, Rn, F	Mountain Pass, Mongolia
	Supergénico	Halloysita, lincolita, bastnaesita, rabdoanita	Al, Fe, Ce	S. Siberia Pocos-de-Caldas

Fuente: H. Sørensen, 1979; The Alkaline Rocks, John Wiley & Sons.

Por tanto, las carbonatitas deben provenir de magmas o mezclas fundidas, constituidas principalmente por carbonatos de calcio y magnesio. Esta hipótesis, propuesta a principios del siglo, basada en evidencias de cartografía geológica y descripción de afloramientos, encontró fuerte oposición por parte de los investigadores que laboraban en el campo de la geoquímica experimental. Smith y Adams (1923) mostraron que el punto de fusión de la calcita era de 1389°C y que sólo podría ocurrir a una presión de 1000 atmósferas (demasiado alta). Posteriormente se encontró que aun en atmósferas de agua y bióxido de carbono de 5000 bars y temperaturas de 800°C la fusión no ocurría; por lo que obviamente, estas condiciones resultaban demasiado extremas para obtener magmas con esos minerales en equilibrio.

Fue hasta 1958 cuando se demostró que era posible disminuir el punto de fusión de la calcita a 900-1000°C, si el experimento se realiza bajo una cierta presión combinada de agua bióxido de carbono de sólo 500 bars. Investigaciones posteriores mostraron que esas mezclas fundidas pueden persistir aun a tem

peraturas de 600°C. En los años siguientes se obtuvieron más - datos experimentales que apoyan la hipótesis magmática.

Los resultados experimentales fueron comprobados en 1966 por Dawson, cuando por primera vez se observaron derrames de lavas carbonatíticas del volcán Oldoinyo Lengai en Tanganika, Africa Central.

Actualmente se considera a las carbonatitas como verdaderas rocas ígneas, pero aún existe controversia en cuanto a si algunas partes de ellas, como diques y zonas de relleno de fracturas pueden corresponder a una etapa hidrotermal de la fase neumatolítica (Smirnov, 1977).

En conclusión, se puede afirmar que la formación de los complejos hiperalkalinos comienza con la inyección de un magma ultrabásico seguido de una sucesión de inyecciones ultrabásico-alkalinas, después de las cuales, y siguiendo la evolución completa, se forman las carbonatitas. Durante el largo proceso de la formación de estos complejos ígneos alcalinos, las series sucesivas de rocas intrusivas, tiende a irse ubicando hacia el centro de la estructura concéntrica zonada (lo que explica el carácter de rocas más recientes y más básicas hacia el interior), así que las carbonatitas tienden a ocupar todo el núcleo (figura III.8). Lo contrario es menos frecuente, sin embargo, también ha sido documentado, desarrollándose de la parte central hacia la periferia, con las carbonatitas ocurriendo en los márgenes de los complejos concéntricos.

Algunas compilaciones sobre elementos traza presentes en diferentes tipos de roca de todo el mundo han servido para mostrar que las carbonatitas presentan un rango de variación y/o contenido de ciertos elementos, que las hacen diferentes a las demás. (Tabla III.10).

Powel, Hurley y Fairben (1966), analizaron muestras de xenó

TABLA III.10

COMPARACION DE LA ABUNDANCIA DE ELEMENTOS MENORES Y TRAZAS (EN PPM) EN CARBONATITAS, CON LAS ROCAS IGNEAS Y CALIZAS. (PECORA, 1956; GOLD, 1963 Y HEINRICH, 1966).

	Todas las rocas ígneas		Ultramáficas a félsicas Rocas alcalinas		Carbonatitas
		Gabros		Calizas	
RE ₂ O ₃ (tot.).....	50	5	100-500	---	200-n x 100000
BaO.....	300	200	1000-10,000	---	5000-100000
SrO.....	300	200	1000-10,000	---	5000-20000
Hb ₂ O ₅	5	20	10-50	---	10-5000
Ta ₂ O ₅	2	1	1-10	---	0.1
ZrO ₂	300	100	400-2000	---	10
TiO ₂	8000	15000	5000-20,000	---	1000-30000
Sc.....	13	---	---	1	10
Co.....	18	---	---	0.1	17
Ni.....	100	---	---	20.0	8
Cu.....	70	---	---	4	2.5
Ga.....	26	---	---	4	1
Zr.....	170	---	---	19	1120
Mo.....	1.7	---	---	0.4	42
Sn.....	32	---	---	1	4
Cr.....	117	---	---	11	48
La.....	40	---	---	1	516
Ce.....	40	---	---	11.5	1505
F ₂ O ₅	3000	3000	2000-20,000	---	1000-n x 10000
F.....	500	300	100-2000	---	200-20000
S.....	500	2000	1000-3000	---	10000-100000

litos de calizas, rocas sedimentarias carbonatadas normales y rocas alcalinas con las que éstas ocurrían, utilizando el cociente $^{87}\text{Sr}/^{86}$ como trazador en determinados procesos geológicos.

De acuerdo con los resultados obtenidos se concluye que:

Las carbonatitas no son xenolíticas. Están íntimamente relacionadas con las rocas silicatadas alcalinas con las que ocurren. Las carbonatitas y sus silicatos alcalinos asociados no se derivan de la corteza superior, sino de una región de la corteza inferior o en el manto, similar a la región de la cual provienen los basaltos.

III.2.6 Importancia Económica.

La concentración en ocasiones de minerales poco comunes, que llegan a constituir yacimientos de rendimiento económico, en las rocas hiperalcalinas y sus carbonatitas, hace que estos depósitos adquieran gran importancia.

El gran interés económico que últimamente han adquirido estos yacimientos, ha permitido que sean objeto de numerosos estudios.

Las dimensiones que alcanzan los cuerpos alcalinos son muy grandes, en general se encuentran en áreas que abarcan cientos de kilómetros cuadrados. En la península de Kola, URSS, y en Brasil, los complejos sobrepasan los 1500 Km².

Las reservas de menas en los grandes yacimientos del mundo pueden llegar a sobrepasar los miles de millones de toneladas. La apatita puede constituir desde un 25% hasta un 75% de la mena; contiene además nefelina, aegirina, hornblenda y cantidades pequeñas pero significativas de minerales de tierras raras, niobio, uranio, torio, titanio y sulfuros de cobre.

De acuerdo con los diversos estudios efectuados, parece que las carbonatitas presentan las mejores concentraciones de sustancias poco comunes. En México, no se ha demostrado la presencia de carbonatitas sensu-strictu, a pesar que su presencia ha sido sospechada desde hace algún tiempo. (Cepeda -Dávila et al. 1975 y Ortega Gutiérrez, 1975).

III.2.7 Principales Yacimientos en el Mundo.

URSS. Uno de los grandes representantes de estos yacimientos es el macizo de rocas alcalinas de los Jibines, en la península de Kola. Tiene aspecto de lopolito y se caracteriza por una estructura cónica. Los yacimientos de apatita son los más grandes y los más importantes, pero también en la explotación se recuperan los minerales de titanio. Las reservas de masa mineral de los Jibines constituyen cientos de miles de toneladas.

Estados Unidos. Los yacimientos de Magnet Cove, Arkansas, constituyen un ejemplo excepcional de este modelo.

Los depósitos ocurren en un complejo de rocas ígneas hiperalcalinas que se encuentran intrusionando a rocas metamórficas y sedimentarias. El complejo alcalínico-carbonatítico contiene grandes cantidades de minerales titaníferos. El titanio se encuentra en las formas de rutilo o brookita. El yacimiento presenta un promedio del 3 a 6% de TiO_2 recuperable.

Otros países en donde se encuentran yacimientos de titanio, asociados a rocas hiperalcalinas y sus carbonatitas son:

- Región Iveland-Evje, en el sur de Noruega.
- Oka, Canadá.
- Jacupiranga, Brasil.
- Suecia.

- Alemania.
- Sudáfrica.

III.2.7.1 Principales yacimientos potenciales en el mundo.

Brasil. La mejor ocurrencia mundial de anatasa e ilmenita se encuentra en los cuerpos carbonatíticos de Tapira, Salitre y Catalao, Minas Gerais, Brasil.

Los yacimientos de titanio, en los cuales el mayor mineral de éste es la anatasa u octaedrita, que es un mineral polimorfo del rutilo, se encuentra en una estructura tubular de 6 km. de diámetro.

Según el Departamento Nacional de Producción Minera, las reservas contienen 108 millones de toneladas estimadas de TiO_2 . En algunos sitios se ha llegado a detectar de 70 a 86% de anatasa dentro del cuerpo mineral.

México. Como se mencionó anteriormente, no se ha demostrado la presencia de carbonatitas; sin embargo, es muy posible su existencia, aunque las menas de titanio no se presenten en cantidades comerciales, otras sustancias no muy comunes pueden presentar concentraciones de interés.

Las áreas más promisorias de México, son el complejo alcalino de la sierra de San Carlos Cruillas, Tamaulipas (Cepeda-Dávila et. al., 1975) donde se ha reportado la presencia de sienitas nefelínicas. Estudios recientes confirman no sólo la presencia de rocas alcalinas, sino también de fenómenos de fenitización y presencia de bastnaesita y otros minerales de tierras raras.

La provincia magmática alcalina al este de México es también interesante, aunque no ha sido estudiada detalladamente. (Demant y Robin, 1975).

La provincia alcalina intrusiva de Coahuila, relacionada con la provincia alcalina de Big Bend del sur de Texas y al rift del río Grande, es igualmente importante. En ella, intrusiones de diques de composición alcalina han sido reportados (Daugherty, F. W., 1963 y 1965). Existen además algunos yacimientos de hierro (por ejemplo, Hércules o la Perla) donde ocurren cantidades significativas de apatita.

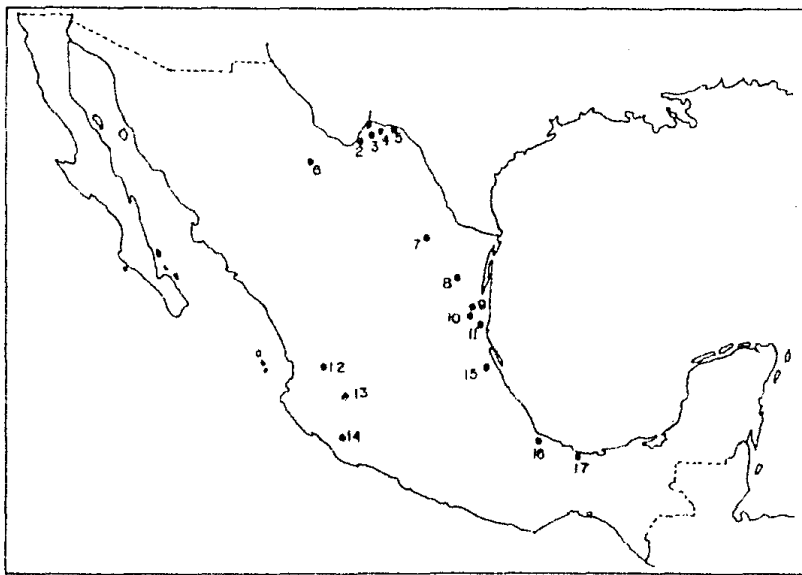
Relacionado quizás a esta región se encuentra el yacimiento de Cerro del Mercado, Dgo., donde la presencia de apatitas asociadas a las menas de hierro constituye un rasgo esencial. La figura III.9 muestra la distribución general de las rocas alcalinas en México.

III.3 MODELO DE YACIMIENTOS DE TITANIO ASOCIADOS A ROCAS METAMORFICAS.

Diversos agentes como la temperatura, presión y sustancias químicas, en donde el H_2O y el CO_2 juegan un papel importante, pueden provocar transformaciones en rocas o yacimientos preexistentes, cuyos resultados son los yacimientos metamórficos.

Los principales tipos de metamorfismo son el de contacto, debido a la acción de los cuerpos intrusivos y el regional, que ocupa grandes extensiones en la superficie y profundidades entre 7 y 55 kilómetros.

Los yacimientos metamórficos han sido poco estudiados; sin embargo, se reconoce que el metamorfismo de rocas básicas en diferentes facies puede influir en la formación de los depósitos de titanio, los cuales presentan las siguientes características.



Alan R. Woolley, 1987

- | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| 1 La Cueva (Coah.) | 10 Cerro Nopal y Murciélago (Tamps) |
| 2 Cerro Aguachile (Coah.) | 11 Bernal de Fiorcastas (Tamps) |
| 3 Cerro Colorado (Coah.) | 12 Las Navajas (Nay) |
| 4 Cerro Noyado (Coah.) | 13 La Primavera (Jal.) |
| 5 Picacho (Coah.) | 14 Cotima (Col.) |
| 6 La Perla (Chi.) | 15 Área de Chicontepec (Ver.) |
| 7 Sambratillo (N.L.) | 16 Palma Sola (Ver.) |
| 8 Sierra de San Carlos (Tamps) | 17 San Andrés Tuxtla (Ver.) |
| 9 Sierra de Tamaulipas (Tamps) | |

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Distribución de las rocas alcalinas en
México

FIGURA No.
III-9

TESIS PROFESIONAL
Julio de 1990

III.3.1 Paragénesis.

En los yacimientos metamórficos, los minerales del titanio aparecen en la forma de rutilo e ilmenita.

Los principales yacimientos presentan la siguiente asociación:

Ilmenita, rutilo y apatita. Como minerales de ganga se encuentran la clorita, piroxenos, anfíboles, granates y plagioclasas; y como minerales accesorios existen esfena y espinela.

En la tabla III.11 aparecen los minerales económicos que corresponden a algunas facies de metamorfismo regional, y en los cuales se encuentran los minerales titaníferos.

Es conveniente aclarar que los minerales del titanio pueden aparecer en cualquier facies mineral de metamorfismo, ya que son insensibles a las variaciones de temperatura y presión.

TABLA III.11 FACIES DE METAMORFISMO REGIONAL Y SUS MINERALES ECONÓMICOS.

Facies	Minerales más importantes	Minerales económicos
Anfibolita	Cuarzo, kyanita, estauro-lita, plagioclasas, granate, hornblenda, diópsida, mica.	Minerales de Fe, kyanita, dióspora, sillimanita, andalucita, corundo, grafito, cristalino, ilmenita, apatita.
Granulita	Cuarzo, plagioclasa, feldspato, hornblenda, diópsida, hiperstena, granate sillimanita, biotita, rutilo.	Anfíbol-piroxeno-magnetita, cuarcitas, granates, rutilo.
Eclogita	Onfacita, granate, kyanita, enstatita, rutilo.	Rutilo

III.3.2 Alteraciones.

Los minerales del titanio asociados a los yacimientos metamórficos son químicamente muy estables, por lo que difícilmente sufren alteraciones. Las rocas que los contienen pueden ser intemperizadas y erosionadas, pero los minerales titaníferos permanecen estables. Si existen las condiciones apropiadas, éstos pueden ser transportados y depositados, dando lugar a la formación de yacimientos de placer.

III.3.3 Litología.

Los yacimientos metamórficos de óxidos de titanio se encuentran asociados principalmente a las siguientes rocas metamórficas: anfibolitas, granulitas, esquistos de clorita, gneis cuarzo-feldespáticos, eclogitas y serpentinitas, entre otras.

Debido a la persistencia de los minerales titaníferos en las diferentes facies del metamorfismo, éstos pueden aparecer en una gran variedad de rocas metamórficas, pero no por ello formar concentraciones comercialmente importantes.

III.3.4 Estructuras.

Las formas que presentan los yacimientos metamórficos de titanio en anfibolitas, serpentinitas, esquistos, gneis y otras rocas metamórficas, son las vetas, lentes y disseminaciones. En ocasiones, los yacimientos se presentan en capas regulares, fajas de esquistos de clorita dentro de cuarcitas y granitos, bolsadas en formas de cápsulas en anfibolitas, entre otras estructuras.

III.3.5 Hipótesis Genética.

El metamorfismo sobre rocas ígneas básicas puede producir concentraciones importantes de minerales de titanio; las segrega y puede expulsarlas hacia las rocas vecinas.

Condiciones físico-químicas de formación:

- a) La temperatura varía de 100 a 1000°C.
- b) La presión varía de algunas atmósferas hasta 17 kb.
- c) El agua juega un papel importante en las transformaciones mineralógicas, así como un solvente activo en las reacciones.
- d) El CO₂ se incrementa con la profundidad y es agente importante en el reemplazamiento de ciertos minerales, sobre todo en los de alto grado de metamorfismo.

Los depósitos de titanio pueden formarse en diversas facies del metamorfismo regional de rocas básicas, donde existe una expulsión y una secreción del titanio, dando lugar a la cristalización del rutilo. El titanio, por tanto, proviene de las rocas ígneas de composición básica.

III.3.6 Importancia Económica.

Los yacimientos de minerales de titanio asociados a rocas metamórficas son también importantes en la producción de titanio.

Las grandes extensiones que ocupan las rocas metamórficas sobre la corteza terrestre, los coloca como los depósitos de mayor potencialidad. Sin embargo, en la actualidad existen muy pocos yacimientos de este tipo en explotación.

En los principales yacimientos de minerales titaníferos aso

ciados a las rocas metamórficas, el contenido de TiO_2 se encuentra entre el 49 y el 52%. Las reservas alcanzan los cientos de millones de toneladas de mineral.

III.3.7 Principales yacimientos en el Mundo.

Estados Unidos. En este país se encuentra uno de los yacimientos característicos de este modelo. El depósito de Carolina del Norte en el valle de Yadkin presenta un cuerpo en forma de lente que mide 305 metros de longitud, formado por concentraciones de rutilo, ilmenita y micas. El cuerpo mineral se encuentra encerrado en cuarcitas y micaesquistos. El contenido de TiO_2 alcanza el 35%.

Finlandia. El yacimiento de Otanmäki tiene una extensión de dos kilómetros. El depósito de los minerales titaníferos se encuentra como diseminaciones de la mena en una anfibolita. El principal mineral explotable del titanio es la ilmenita. Las reservas estimadas son de 28 millones de toneladas que contienen 40% de magnetita, 30% de ilmenita, 1 a 2% de pirita y 0.25% a 0.30% de vanadio asociado a la magnetita.

Nueva Caledonia, Noruega, Suecia y Alemania. Son otros países en donde existen yacimientos de titanio asociados a rocas metamórficas.

Principales yacimientos potenciales en México. En la región oeste de Cd. Victoria, Tamps., existe uno de los islotes precámbricos que parecen ser una prolongación de la Provincia Grenvillava. Este se encuentra en el núcleo del anticlinorio Huizachal-Peregrina, formado por gneises, cuarcitas, esquistos, serpentinitas, entre otras rocas metamórficas, las cuales presentan concentraciones de minerales titaníferos.

En el estado de Oaxaca, se tiene conocimiento de los más im

portantes yacimientos minerales ferro-titaníferos, pero aún existe controversia en cuanto a su formación, la cual es considerada como magnética, pero sin descartar un origen metamórfico.

Debido a que la hipótesis más aceptada actualmente es la magnética con segregación de un líquido residual, los yacimientos titaníferos que se encuentran en esta región, se describen en la sección III.1.

III.4 MODELO DE YACIMIENTOS DE TITANIO ASOCIADOS A PLACERES.

Los minerales que son químicamente estables en la superficie terrestre, no se descomponen por efectos de intemperismo o meteorización; cuando las rocas que los contienen son disueltas y desintegradas, éstos pueden permanecer "in situ" o ser transportados por el agua, el viento o por efecto de la gravedad. El resultado son concentraciones de minerales pesados y resistentes, muy importantes desde el punto de vista económico. Se presentan en las arenas y gravas de los ríos, lagos y playas.

Dentro de este grupo de minerales que se forman por concentraciones mecánicas, se encuentran los principales minerales industriales del titanio (ver tabla III.12), los cuales reúnen las propiedades adecuadas para llegar a formar yacimientos de placer, lo que ha ocurrido en toda la escala geológica.

Existen en el mundo importantes placeres, sobre todo de playa, que contienen de 10 hasta 100 kg/ton, de minerales titaníferos.

Las principales características que presenta este modelo de yacimiento, son descritas a continuación.

TABLA III.12

EJEMPLO DE PLACERES, AGREGADOS Y OTROS MINERALES.

Géneros	Menas minerales	Gravedad específica
No-metálicos		
Sílice	Arenas de cuarzo	2.65
Cal	Capas de arena	2.7
Arenas y gravas	Varias	3.0
Topacio	Topacio	3.4-3.6
Espinela	Espinela	3.5-4.0
Corindón	Corindón	3.9-4.1
Minerales pesados en arenas		
Berilio	Berilo	2.75-2.8
Titanio	Rutilo	4.18-4.25
	Ilmenita	4.7
Cromo	Cromita	4.6
Zirconio	Zircón	4.68
Manganeso	Hausmanita	4.72-4.84
Manganeso	Braunita	4.72-4.83
Hierro	Magnetita	5.18
Torio	Monacita	5.0-5.3
Nb-Ta	Columbita, tantalita	5.2-7.9
Tierras raras	Grupo de 15 óxidos REE	---
Estaño	Casiterita	6.8-7.1
Mercurio	Cínabrio	8.10
Preciosos y raros		
Diamante	Diamante	3.5
Cobre	Metal nativo	8.9
Plata	Metales nativos	10.5
Oro	Metales nativos	15-19.3
Platino	Metales nativos	14-19

D.S. Cronan, 1980.

III.4.1 Paragénesis.

Las asociaciones típicas de minerales titaníferos de placer, se muestran en la tabla III.13.

TABLA III.13 ASOCIACIONES MAS COMUNES DE LOS MINERALES FERRO-TITANIFEROS DE PLACER.

Minerales económicos	Minerales accesorios dominantes
Ilmenita, rutilo, circón, berilo, monacita.	Granate, magnetita, esfena, apatita, piroxenos, anfíboles.
Rutilo, ilmenita, circón, berilo, monacita.	Magnetita, apatita, granates, ortita, eudialita, leparita, perovskita, aegirina, esfena, fluorita, piroxenos, anfíboles.
Ilmenita, leucoxeno, titanio-magnetita.	Diópsida-augita, hiperstena, anfíboles, apatita, espinela.
Platino, iridosmium, ilmenita, titanio-magnetita.	Olivino, bronzita, diópsida, augita, cromo-espinelidos, magnetita, granates, anfíboles.
Diamante, rutilo, ilmenita.	Espinela, cromopicitita, pirocromo-diópsida, magnetita, piroxeno ortorrómbico, titanaugita, flogopita.
Pirocloro, apatita, ilmenita, titanio-magnetita.	Magnetita, ortita, forsterita, esfena, titanaugita, flogopita, perovskita, anatasa, espinela, anfíboles.
Ilmenita, anatasa, rutilo.	Hematita.
Circón, rutilo.	Estauroilita, sillimanita, turmalina, cianita, andalucita, piroxeno, corindón, gahnita, granate, monacita.

Tomado de las notas de Metalogenia del Ing. Carlos Garza González V.

III.4.2 Alteraciones.

La ilmenita de las arenas costeras se encuentra en diversos estados de alteración. Posiblemente, la transformación de la ilmenita siguió dos cursos: la oxidación del hierro para producir el mineral denominado arizonita y la salida o lixiviado del hierro para formar TiO_2 amorfo, coloidal, que recrystaliza en rutilo o anatasa y leucoxeno; el rutilo, por consiguiente, es autígeno. El proceso de alteración lo describió Temple (1966), y consiste en lo siguiente:

La alteración de la ilmenita se inicia a lo largo de granos confinados y discontinuidades dentro del mineral. Después continúa la oxidación, dando lugar a un estado amorfo; parte del hierro es removido desde la ilmenita teniéndose como resultado a un hierro-titanato intermedio de estructura definida para el cual se propuso el nombre de pseudorutilo. La alteración, producto de este estado de completa oxidación del hierro, da como resultado que se tenga un 65 a un 70% de TiO_2 que contiene la ilmenita original.

El hierro removido completamente desde el pseudorutilo da lugar a un mineral compuesto por cristales de rutilo. Únicamente las tres fases minerales: ilmenita, pseudorutilo y rutilo, originan concentraciones comerciales importantes de titanio. La ocurrencia natural en depósitos de arena indican que la alteración es producida por los diversos agentes atmosféricos que actúan directamente sobre el mineral.

Los yacimientos titaníferos de placer más importantes en el mundo se deben a la alteración de la ilmenita; por tanto, el leucoxeno es el mineral dominante.

La alteración de la ilmenita es un proceso extremadamente lento, el cual es auxiliado por elevadas temperaturas; debido

a esto, los depósitos de placer antiguos presentan generalmente un alto contenido de leucóxeno y definen regiones con temperaturas tropicales. En cambio, los yacimientos de placer recientes que se encuentran en playas modernas y altas latitudes contienen alrededor de 50% de TiO_2 , lo cual indica que teóricamente la ilmenita es pura o no ha sido alterada.

El rutilo es un mineral muy estable a las condiciones atmosféricas, por lo cual se le encuentra inalterado en los yacimientos de placer.

III.4.3 Litología.

Los yacimientos titaníferos de placer se encuentran principalmente en arenas negras y gravas, a las orillas de los ríos y lagos, pero sobre todo, a lo largo de las costas.

Existen también depósitos eluviales en donde el titanio aparece como accesorio de la bauxita.

El tamaño de grano de las arenas en donde se encuentran los minerales titaníferos varía de acuerdo con la distancia de la fuente o roca madre; a la intensidad de la acción del viento, del agua, de las olas y de las corrientes costeras que retransportan los materiales; sin embargo, las arenas de playa con titanio son a veces de grano más fino que las arenas normales.

III.4.4 Estructuras.

Las estructuras dominantes de los yacimientos titaníferos de placer son las barras, dunas o fajas paralelas a la costa, lentes y lechos en concentraciones aluviales y bandas formadas a lo largo de las partes interiores de las curvas de los meandros.

Las bandas paralelas a la línea de costa constituyen los placeros de playa, que son dentro de este modelo, los yacimientos de mayor importancia económica.

Las dunas de arena construidas por la acción del viento, forman una colina en las partes hacia el interior de la playa. Las mejores concentraciones de minerales pesados están en la base de las dunas mirando al océano, donde las olas han retrabajado las arenas de la estructura.

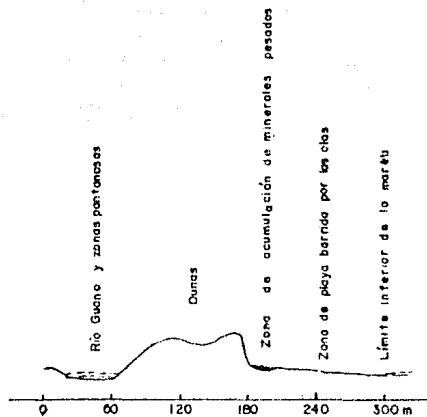
La figura III.10 muestra claramente la estructura de las dunas, definiendo la zona de acumulación de minerales pesados.

III.4.5 Hipótesis Genética.

En términos generales se coincide que los yacimientos de argenas negras con un alto contenido de minerales pesados, procede de rocas cristalinas ricas en minerales químicamente estables en la superficie, que posteriormente son transportados y depositados hasta llegar a formar concentraciones explotables.

Una explicación más detallada de la génesis de estos yacimientos es la siguiente:

Los minerales industriales de titanio (rutilo e ilmenita) son estables "in situ", es decir, no sufren alteraciones por meteorización; cuando las rocas que los contienen son disueltas y desintegradas por largos procesos de los agentes atmosféricos los minerales titaníferos son transportados por la lluvia, los ríos, las olas, el viento, el hielo o la gravedad. Las partículas acompañantes más ligeras son removidas y se dispersan; otras se rompen fácilmente a lo largo de los planos de cruce llegando a ser tan finas que se dispersan también. Pero los minerales estables, pesados, quedan como partículas residuales en el suelo o son transportadas en las arenas y gravas de los ríos y pla-



Sección esquemática de la playa sur de Mineral City,
 Condado de St. John, Florida, E. U. A. La escala vertical
 está exagerada. En Charles, F. Park & Roy A. McDiarmid., 1975

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
 FACULTAD DE INGENIERÍA

Estructura de una duna presentada
 la zona de acumulación de minerales
 pesados.

FIGURA No.
 III-10

TESIS PROFESIONAL
 Julio de 1990

yas. Una mayor agitación en el río o la playa, origina que las partículas con mayor peso específico se asienten en el fondo, y sucesivamente se vaya enriqueciendo el yacimiento por la eliminación de la ganga más ligera y frágil. Una concentración de minerales pesados, sólidos, químicamente estables y de utilidad en la industria, es el resultado de este largo proceso. Estos minerales pueden acumularse cerca o sobre los afloramientos de la roca madre, constituyendo los depósitos residuales; pueden ser lavados en los ríos y acumularse en barras arenosas o en los surcos e irregularidades a lo largo del fondo de los canales, o pueden alcanzar grandes extensiones de agua cuando son removidos por la acción de las olas y depositados en arenas de playa, en donde forman importantes yacimientos de minerales titaníferos.

En conclusión, las propiedades que reúnen los minerales para su concentración son:

- i) Resistencia al intemperismo.
- ii) Resistencia física para soportar el transporte.
- iii) Elevado peso específico.

De manera resumida, las condiciones que se requieren para que se formen yacimientos titaníferos de placer, se describen a continuación:

- Presencia de rocas o yacimientos preexistentes con sustancias útiles, químicamente estables a las condiciones reinantes en la superficie terrestre. (Rocas ígneas básicas, ultrabásicas y alcalinas).

- Condiciones climáticas favorables, en particular regiones cálidas y húmedas, en donde el intemperismo es muy activo y el agua es muy importante como medio de transporte. (Zonas tropicales).

- Larga estabilidad de la corteza en el área, para que los residuos puedan acumularse en cantidades suficientes para su explotación comercial. (Márgenes continentales pasivos).

Las rocas más frecuentes de donde provienen los minerales de titanio son las anortositas, los gabros, las sienitas nefelínicas y las carbonatitas. Asimismo, algunas rocas metamórficas como los gneises, esquistos, anfibolitas, entre otras pueden también ser fuente de los yacimientos titaníferos de placer.

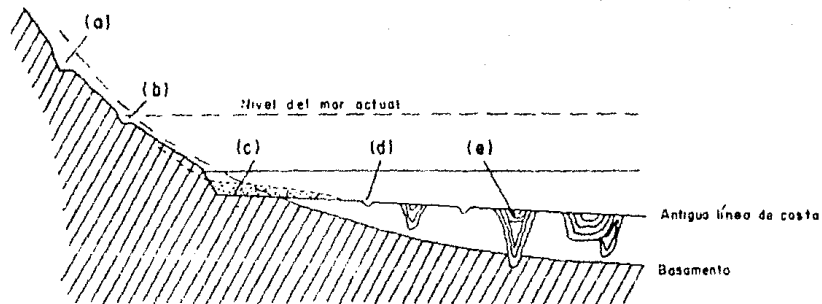
Las arenas negras con un alto contenido de minerales pesados, sobre todo de óxidos de titanio, se encuentran casi siempre cerca de los macizos rocosos que contienen concentraciones importantes de titanio. Ejemplo de ello son los depósitos de playa situados en la costa oriental de Norteamérica, que se encuentran cerca de los macizos anortosíticos de Adirondack.

En general las rocas básicas y ultrabásicas, las rocas alcalinas y sus carbonatitas, así como las rocas metamórficas, que fueron descritas en los modelos anteriores, son las rocas más frecuentes de donde provienen los minerales de titanio, que después de pasar por diversos procesos y en condiciones favorables, llegan a formar extensas concentraciones comerciales en forma de yacimientos de placer.

Los ambientes propicios para la formación de yacimientos de placer, se ilustran en la figura III.11.

III.4.6 Importancia Económica.

En tiempos pasados, la mayor parte del titanio en el mundo se obtenía de los placeres de playa de la India. Actualmente existen grandes yacimientos en explotación, como los de las costas de Australia, Florida y Virginia, EUA., entre otros.



- a Placeres sobre el relieve de playas
- (b) Placeres sobre playas modernas
- (c) Placeres sobre playas sumergidas
- (d) Placeres en depresiones marinas
- (e) Placeres en valles de ríos enterrados

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Ambiente propicio para la
formación de yacimientos de placer

FIGURA No.
III-II

TESIS PROFESIONAL
Julio de 1990

El contenido en mineral de titanio en placeres se muestra en la tabla III.14.

TABLA III.14

CONTENIDO EN MINERAL DE TITANIO EN PLACERES.

Categoría de los placeres	Ilmenita, Kg/ton.
Ricos	50 a 100
Medios	20 a 50
Pobres	10 a 20

Fuente: En V. M. Kreiter, 1978.

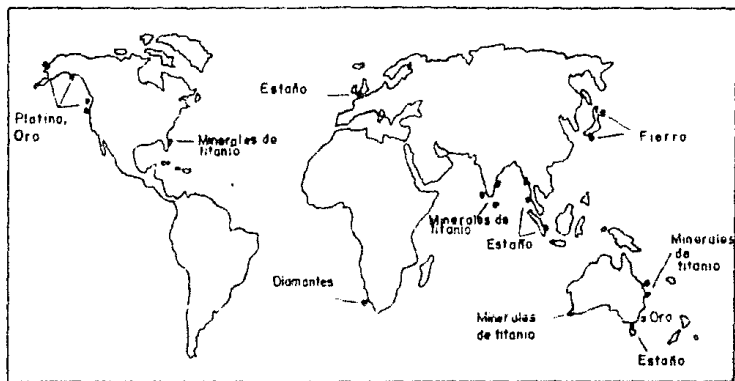
Aunque los minerales titaníferos se encuentran ampliamente distribuidos a lo largo de las costas que presentan arenas negras (figura III.12), sólo son explotables aquellas concentraciones de grado comercial. Sin embargo, éstas tienen una singular importancia, debido a su bajo costo de explotación.

Las costas australianas son en la actualidad, las más importantes productoras de titanio en el mundo, aunque existen otros países que presentan una gran potencialidad de TiO_2 en sus arenas.

III.4.7 Principales yacimientos en el Mundo.

Australia. Es el país productor más importante en el mundo de minerales pesados. Hasta 1982 había producido 64% de rutilo y 30% de ilmenita.

Las concentraciones de minerales pesados se presentan alrededor de las costas australianas. En algunas regiones, del contenido total de minerales pesados, el 90% es de rutilo; en otras partes, la ilmenita llega a formar el 60% y el rutilo un 10%.



Dr. S. Cronan, 1980

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Localización de ciertos depósitos
minerales de placer

FIGURA No.
III-12

TESIS PROFESIONAL
Julio de 1990

Las reservas de los minerales del titanio se presentan en la -
 tabla III.15.

TABLA III.15

RESERVAS DE TITANIO DE AUSTRALIA, EN MILES DE TONELADAS.

Región	Rutilo	Ilmenita
Costa este	6,500	14,400
Costa oeste	3,500	36,000
Total	10,000	50,400

Anon, 1980.

India. Durante algún tiempo, la India fue el principal pro-
 ductor de ilmenita, la cual se obtenía de las arenas negras del
 estado de Kerala (antiguamente Travancore-Cochin).

Dos grandes yacimientos de minerales titaníferos se han ex-
 plotado a gran escala. La tabla III.16 muestra el resultado de
 los análisis efectuados al mineral.

Las arenas negras de playa de la India llegan a medir hasta
 25 km. de longitud, con un espesor que oscila entre 1.85 y 2.5
 metros.

TABLA III.16

ANALISIS QUIMICOS REALIZADOS A LAS MUESTRAS MINERALES.

	Travancore, M.K.	Travancore, Quilón
TiO ₂	54.1%	60.4%
FeO	75.6	9.55
Fe ₂ O ₃	15.3	24.6

Gillson, 1959.

Estados Unidos. Todos los yacimientos comercialmente importantes en los EUA de minerales de titanio, se encuentran en las costas del Atlántico y del Golfo de México. Los estados en donde actualmente se explotan los minerales titaníferos o los que cuentan con un potencial de explotación son: Florida, Virginia, Georgia, Nueva Jersey y Tennessee.

Los yacimientos de titanio del este de Florida se encuentran entre los más conocidos en los Estados Unidos y en el mundo. Dos depósitos importantes se encuentran en barras arenosas elevadas, una al este de Jacksonville que produce rutilo y la otra, conocida como Trail Ridge, al este de Starke, que es el segundo yacimiento de ilmenita en el país. El mineral de titanio parece ser una mezcla criptocristalina de ilmenita, anatasa y rutilo con hematita, mezcla que parece haber producido leucoxeno por alteración. En Trail Ridge viene acompañado por estauroлита, distena, sillimanita, andalucita, circón, turmalina, rutilo y piroxenos, principalmente.

Los yacimientos forman bandas paralelas a la línea de costa y las concentraciones mayores se encuentran al pie de las dunas. Todos los minerales pesados presentes en las playas de Florida se encuentran también en las antiguas rocas intrusivas y metamórficas de la región de Piedemonte, en Georgia y las Carolinas, por lo que fueron transportadas a las costas por las corrientes fluviales y después retrabajadas por las olas y las corrientes costeras.

Malasia. Los placeres fluviales de estaño de Malasia contienen también ilmenita, que se separa mediante concentración magnética. Los principales centros de producción son Perak e Ipoh.

China. Las arenas de las costas de las provincias de Guandong y Guangxi, contienen ilmenita, circón y otros minerales pesados (Brady, 1981).

Sierra Leona. Un yacimiento de minerales pesados se encuentra a lo largo del río Sherbro. Las reservas están estimadas entre 3 y 30 millones de toneladas conteniendo rutilo.

Sri Lanka. Existen amplios yacimientos de minerales de titanio en placeres de playa. El área de Pulmoddai presenta 5.6 millones de material titanífero, con 2.4 millones de TiO_2 . El yacimiento tiene una longitud de siete kilómetros, una anchura de 91 m. y una altura de 2.4 m. El depósito está conformado con alrededor del 80% de ilmenita y rutilo. La composición mineralógica promedio de las arenas negras está descrita en la tabla III.17.

TABLA III.17

COMPOSICION MINERAL PROMEDIO DE LAS ARENAS NEGRAS DE SRI LANKA

Ilmenita	70-75%
Rutilo	10-12%
Zircón	8-10%
Sillimanita	± 1%
Monacita	±0.4%

Fuente: Anon, 1974; en Industrial Minerals and Rocks.

República de Sudáfrica. Las reservas estimadas de minerales pesados ascienden a 770 millones de toneladas, las cuales contienen 5% de ilmenita, 0.3% de rutilo y 0.65% de zircón.

Otros países que producen minerales titaníferos de yacimientos de placeres son: Senegal, URSS y Nueva Caledonia.

III.4.7.1 Principales Yacimientos Potenciales.

Brasil. Los yacimientos de minerales pesados de Brasil tienen una longitud de 161 km y se localizan a lo largo de la costa Atlántica formando placeres de playa. El contenido de ilmenita en estas arenas varía de 39.7 a 61.6% de TiO_2 .

Egipto. Grandes yacimientos de arenas negras se encuentran en las playas de Egipto. Existen dos tipos de depósitos: uno - que generalmente presenta colores oscuros y que contiene alrededor de 70 a 90% de minerales pesados, y otro que presenta un color gris amarillento a oscuro y que contiene aproximadamente un 40% de minerales pesados.

Los minerales pesados que conforman las arenas negras son - los siguientes: ilmenita (55%), magnetita (15-20%), zircón - (7-8%), granate (4-6%), rutilo (1.5%) y monacita (0.5-1%).

Nueva Zelanda. Las reservas estimadas de minerales pesados de las costas de Nueva Zelanda se encuentran entre 17 y 30 millones de toneladas. Análisis efectuados a la ilmenita indican un contenido de TiO_2 del 47%.

Sudáfrica. Los minerales de titanio de la costa este se encuentran formando tres tipos de yacimientos:

- a) Antiguas arenas de playa de color rojo pardo.
- b) Playas y dunas de arena recientes.
- c) Aluviones en costas lagunares.

El contenido de minerales pesados que se encuentran en las arenas, varía de 2 a 25%. Entre los principales minerales, la ilmenita se encuentra en mayor proporción (tabla III.18).

TABLA III.18

CONTENIDO DE MINERALES EN LAS ARENAS NEGRAS DE SUDAFRICA.

Ilmenita.....	70-80%
Leucoxeno.....	2- 5
Rutilo.....	2- 5
Zircón.....	8-10
Magnetita.....	2- 8
Monacita.....	De trazas a 0.3
Granates, prioxenos, etc.....	1- 1.5

Fuente: Anon, 1959; en Industrial Minerals and Rocks.

El total de reservas de material asciende a 85 millones de toneladas.

Japón. Las arenas de las playas de Honda, se dice que contienen 10,000 millones de toneladas de minerales pesados, con un 20-30% de hierro, 8-12% de TiO_2 y 0.6% de V_2O_5 .

Uruguay. Las arenas negras del noreste de Montevideo y Agua Dulce, en el estado de Rocha, presentan reservas estimadas en 3.3 millones de toneladas, con un promedio de 2.5% de concentrado de minerales pesados. La composición de las arenas es aproximadamente: Ilmenita (60%), zircón (5%), rutilo (1%), monacita (0.6%).

Corea. Tiene reservas de 2,535,000 toneladas, con 507,000 toneladas que contienen TiO_2 .

Mozambique. Depósitos de ilmenita y rutilo se encuentran en las playas costeras, cerca de Vila Luisa, a 40 Km. al norte de Lourenco Marques.

URSS. Existen depósitos en arenas del Mar Negro, en los -

ríos Khan, Boludka y Pit, en Siberia; Syivista, Chusovaya y - Vizhai, en los Urales.

México. En México se han detectado placeres titaníferos de playa a lo largo de casi toda la costa del Pacífico. Los más importantes se localizan en los estados de Guerrero y Oaxaca.

Los yacimientos de El Cayacal se localizan a lo largo de la playa, entre las ciudades de Acapulco y Zihuatanejo, precisamente en el poblado de El Cayacal, que pertenece al municipio de Petatlán, Guerrero.

Los yacimientos se extienden en una longitud de más de 2,500 m, con una anchura de 12 a 15 m. El mineral aparece en la playa en forma de ilmenita, en numerosas capas y lentes alargadas con espesores variables, hasta de casi 0.30 m. El mineral se asocia a magnetita y a otros granos de arenas. Frecuentemente, las capas y los lentes se encuentran constituidos exclusivamente por arenas negras de ilmenita y magnetita.

La ilmenita y la magnetita se derivaron probablemente de dos fuentes: en primer lugar de los yacimientos ferríferos de El Calvario, y en menor proporción, de las rocas dioríticas que se encuentran cerca del Área.

Las arenas derivadas de los minerales de hierro (hematita y magnetita con óxidos de titanio), han sido acarreadas por las corrientes de agua que desembocan al mar, y ahí el oleaje las concentra y las distribuye de acuerdo con su peso específico, dando lugar a la formación de capas y lentes citadas anteriormente.

Según los análisis efectuados en algunas muestras, el contenido de TiO_2 que se obtuvo, varía desde 0.80% hasta 15.20%. El promedio general es de 5.9% de TiO_2 , estimándose que en El Cayacal existen unas 140 mil toneladas posibles de arenas negras

conteniendo TiO_2 entre otros minerales.

En la costa del estado de Oaxaca, las arenas negras muestran contenidos importantes de TiO_2 en forma de ilmenita. Las formas y dimensiones de los cuerpos que constituyen los yacimientos, son variables; predominan las capas y los lentes. Los estudios efectuados a estos yacimientos son menores que los realizados a los depósitos asociados a rocas, también presentes en esta área.

III.5 MODELO DE YACIMIENTOS DE TITANIO ASOCIADO A DEPOSITOS RESIDUALES.

Las concentraciones residuales son el resultado de la acumulación de minerales valiosos, cuando son desplazados, durante la meteorización, los constituyentes inútiles de las rocas o de los depósitos minerales. La concentración se debe en gran parte a una disminución en volumen, debida casi por completo - al intemperismo químico superficial. Los residuos pueden seguir acumulándose hasta que su pureza y calidad los convierta en ya cimientos de importancia comercial.

Uno de los principales depósitos residuales son los de bauxita, de donde se extrae la mayor parte del aluminio, obteniéndose como subproducto, el óxido de titanio.

Aunque las concentraciones de los minerales de titanio asociados a depósitos residuales (básicamente bauxíticos), no representan gran importancia comercial, manifiestan un modelo de yacimiento con sus propias características, las cuales se enuncian a continuación.

III.5.1 Paragénesis.

El óxido de titanio en sus diversas formas, es un constituyente que siempre aparece en la composición de las bauxitas, - según se manifiesta en los análisis químicos efectuados a diversas muestras.

Las formas en que aparece son: rutilo, anatasa, leucoxeno, ilmenita, magnetita titanífera, hematita titanífera y sus formas coloidales; siempre como un fino polvo.

En las bauxitas kársticas, los minerales de titanio se encuentran asociados de la siguiente manera:

Anatasa-bauxita rutilica.

Rutilo-anatasa-bauxita ilmenítica.

Bauxita rutilica.

Bauxita anatásica.

Rutilo-bauxita anatásica.

Rutilo-bauxita ilmenítica.

Ulvita-ilmenita-rutilo-bauxita anatásica.

De los minerales de titanio, el más abundante es la anatasa que en promedio aparece en un 90%, después le siguen el rutilo la ilmenita y sus formas coloidales que constituyen el otro - 10%.

III.5.2 Alteraciones.

Las principales y más altas concentraciones residuales de óxido de titanio ocurren encima de los macizos rocosos hiperálcalinos (sienitas de nefelina), basaltos o doleritas y algunas rocas metamórficas. Esto indica que estos depósitos son producto de la alteración de las rocas debido principalmente, a pro-

cesos de intemperismo, que con el transcurso del tiempo van enriqueciendo el yacimiento. (Ver figura III.13).

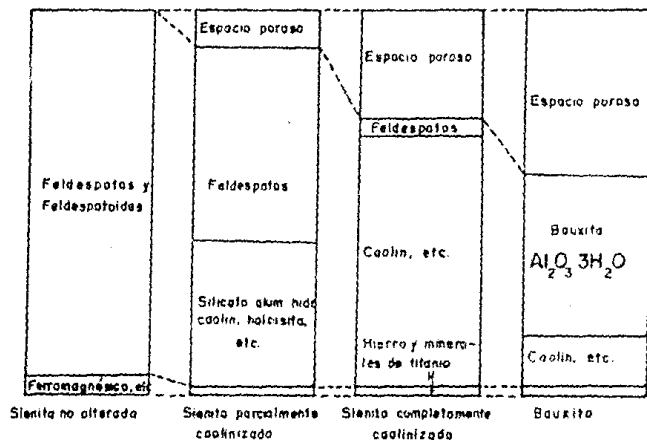
Por tanto, los depósitos residuales no sufren alteraciones, sino que son producto de la alteración de las rocas con un alto contenido de minerales resistentes.

III.5.3 Litología.

Las rocas que con el transcurso del tiempo y debido a procesos de intemperismo, sufren alteraciones y dan lugar a concentraciones residuales en donde el óxido de titanio aparece como constituyente, son las siguientes: sienitas de nefelina, a partir de las cuales se formaron los depósitos de Arkansas, Brasil y Guinea francesa; arcilla rica en silictos de aluminio, - que dio lugar a los yacimientos de Georgia-Alabama; calizas, - que dan lugar a los depósitos kársticos de bauxita; arcillas residuales derivadas de rocas cristalinas básicas, ultrabásicas, y metamórficas, que formaron los depósitos de la Guayana Británica.

III.5.4 Estructuras.

Las estructuras que presentan los depósitos residuales son: Capas superficiales (o cerca de la superficie) y aproximadamente horizontales; depósitos en capas interestratificadas en accidentes de erosión del terreno, consistentes en capas o lentes en el interior de formaciones sedimentarias; depósitos abolsados o masas irregulares enclavados en arcilla, que ocupan depresiones de erosión o de solución en calizas o dolomías. Los depósitos residuales también pueden ser desplazados de su lugar de formación y ser redepositados en capas sedimentarias o en forma de acumulaciones de residuos.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Diagrama que indica el cambio de mineral y de volumen en la alteración de siemita a bauxita.

FIGURA No.
III-13

TESIS PROFESIONAL
Julio de 1990

Los yacimientos kársticos de bauxitas presentan las siguientes formas: depósitos estratiformes, en capas o mantos, en fajas o semejante a fajas, lenticulares, en grabens, de cañón, de hundimiento y en bolsas y sacos.

III.5.5 Hipótesis genética.

Los depósitos residuales son constituyentes de los terrenos que se encuentran en regiones tropicales y subtropicales.

La bauxita es un producto acumulado por un intemperismo físico, químico y biológico, que ataca a las rocas silicatadas de aluminio con notable falta de cuarzo libre.

Los silicatos se descomponen, se elimina la sílice, es arrastrado parcialmente el hierro y se añade agua; la alúmina, junto con el titanio y el óxido férrico (y tal vez óxido de manganeso) se concentra en el residuo. Esta es la idea aceptada generalmente, pero también se ha insinuado la posibilidad de que su origen se deba a soluciones hidrotermales. La bauxita no es un constituyente normal del halo de alteración que rodea a los depósitos hidrotermales de mineral, y un origen a partir de soluciones hidrotermales exigiría condiciones de formación muy especiales. Algunos investigadores han pensado que las bacterias pueden haber desempeñado un papel importante en la formación de los depósitos residuales.

Las condiciones necesarias para formar depósitos residuales o de bauxita son: 1) clima tropical o subtropical húmedo. Dittler ha demostrado que una temperatura superior a los 20°C favorece los procesos en virtud de los cuales entra en solución la SiO_2 , dejando subsistir el Fe_2O_3 y el Al_2O_3 . La acumulación de CO_2 en la superficie se ve dificultada durante una estación húmeda. En los trópicos, la estación húmeda favorece la formación de Al_2O_3 y Fe_2O_3 , y la estación seca da ocasión al lixi-

viado de la sílice, que es eliminada de estos óxidos. Ello puede explicar por qué se necesita un clima tropical para la formación de depósitos residuales. Los grandes depósitos residuales existentes en las regiones templadas de Arkansas, Georgia y Francia entre otros, no contradicen esta afirmación, porque todos ellos se formaron durante los climas terciarios, que eran más cálidos que los actuales; 2) rocas susceptibles de producir acumulaciones residuales de interés económico en condiciones adecuadas de intemperismo; 3) disponibilidad de reactivos que puedan provocar la descomposición de los silicatos y la solución del sílice; 4) superficies que presenten una estabilidad para permitir la lenta infiltración descendente del agua meteórica; 5) condiciones en la superficie que permitan el arrastre de los productos inútiles disueltos (regímenes tectónicos pasivos); 6) tiempo, y 7) preservación.

III.5.6 Importancia Económica.

Los depósitos residuales, propiamente los yacimientos de bauxitas, presentan una concentración promedio de 2 a 4% de minerales de titanio. Por lo que el óxido de titanio es obtenido como un subproducto de los depósitos bauxíticos.

En algunos depósitos kársticos, los minerales de titanio, sobre todo la anatasa, llegan a constituir de un 3 hasta un 7% del contenido total.

Aunque los yacimientos de titanio asociados a depósitos residuales no son explotados comercialmente como tales, representan un enorme potencial debido a la existencia de extensas regiones en el mundo de depósitos residuales, los cuales son de varios miles de millones de toneladas.

En Europa, los depósitos kársticos de bauxita son muy importantes y han sido objeto de numerosos estudios. De entre las

asociaciones minerales que presentan, los minerales de titanio se encuentran como los más abundantes.

III.5.7 Principales Yacimientos en el Mundo.

Los depósitos de capas e interestratificados están representados por los grandes yacimientos de Arkansas, Guayana Británica, Surinam y muchos yacimientos importantes de Europa Meridional.

En Francia meridional, Dalmacia, Hungría y Yugoslavia, los yacimientos en bolsadas son muy frecuentes.

Los depósitos de capas que no están interestratificados se encuentran en la Costa de Oro y Alabama-Georgia, EUA.

Rusia y Arkansa, EUA, se encuentran depósitos que fueron transportados y actualmente están estratificados.

Otros yacimientos residuales de gran importancia se encuentran en Jamaica, Brasil, Las Guayanas, Guinea francesa, los montes Vogelsberg (Alemania), India, Malasia.

México. Se tienen referencias de tres yacimientos de tipo kárstico, en donde los minerales de titanio, pueden estar presentes. Los yacimientos son: Las Cuevas, S.L.P.; El Realito, - Guanajuato y La Encantada, Cohauila.

CAPITULO IV

CRITERIOS DE PROSPECCION MINERA

- IV.1 INTRODUCCION
- IV.2 GUIAS GEOMORFOLOGICAS
- IV.3 GUIAS LITOLOGICAS
- IV.4 GUIAS GEOTECTONICAS
- IV.5 METODOS GEOFISICOS
- IV.6 GUIAS MINERALOGICAS

IV.1 INTRODUCCION.

En la búsqueda de depósitos minerales es imposible examinar detalladamente cada kilómetro cuadrado del área en estudio por medio de perforaciones exploratorias o de obras mineras; sería demasiado caro, lento y, en la mayoría de los casos, inútil. Una área donde puede esperarse que existen recursos minerales, es delimitada por medio de guías de prospección, es decir, características geológicas que sugieran directa o indirectamente la presencia de un yacimiento determinado.

Las guías de prospección se derivan de una serie de conclusiones prácticas acerca de la estratigrafía y petrografía de rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas; de la estructura de los yacimientos y el concepto de facies; geoquímica, geomorfología, hidrogeología y geofísica. El conjunto de los fenómenos naturales resumido en modelos conceptuales en los metalotectones del depósito es de gran importancia en la prospección.

Durante la prospección y levantamientos geológicos es posible emplear dichos criterios y ciencias auxiliares más la experiencia del prospector, en una búsqueda racional, sistemática y científica de yacimientos minerales. Las guías están divididas de acuerdo con la rama científica en que están basadas.

En este capítulo se describirán en primer lugar las guías geomorfológicas debido a su utilidad en la prospección de depósitos de placer de titanio; en seguida se tratarán las guías litológicas; a continuación serán analizadas las guías geotectónicas, que han sido objeto de una atención especial con la teoría de la tectónica de placas; se estudiarán también los métodos geofísicos y, finalmente, las guías mineralógicas. Se atenderá especialmente a México para la prospección de yacimientos de titanio en su territorio.

IV.2 GUIAS GEOMORFOLOGICAS.

El análisis de las formas del terreno puede ser muy útil como guía en la prospección de yacimientos minerales (Thornbury, W. D. 1969) debido a que algunos yacimientos tienen una expresión directa en la topografía, o bien ésta puede proporcionar la clave para encontrar una estructura geológica que haya favorecido la acumulación de minerales; además, la comprensión de la historia geomorfológica de un área puede hacer posible una mejor apreciación de las condiciones físicas en las que se hayan acumulado o enriquecido los minerales.

En el caso del titanio la expresión topográfica directa es útil debido a la asociación de dicho mineral con los óxidos de hierro, hematita y en mayor grado magnetita, pues en función de la resistencia de las rocas circundantes su presencia se refleja como una elevación o una depresión; para estas depresiones se ha utilizado (Wisser, E., 1927) el término de "subsidencia por oxidación", pues en ellas la oxidación hace que la mena pierda volumen y prive de soporte el material suprayacente, con lo que hay desprendimiento de bloques del techo y formación de fracturas que progresivamente se ensanchan hasta que el techo cae y se forma una depresión que parece haber sido cubierta por bloques.

Aun cuando no se puede generalizar acerca del tipo exacto de topografía necesaria para la acumulación de óxidos de hierro, es un hecho que en el caso de los yacimientos del lago Superior, en Canadá, que tienen importancia mundial en el abasto de titanio y fierro (Gross, G. A., 1979), se encuentran tan asociados con colinas y depresiones que se ha acuñado el término "cordillera de fierro" en la literatura que versa sobre ellos (Thornbury, W. D., 1969).

Otro rasgo geomorfológico guía del titanio, por medio de sus

asociaciones con óxidos de hierro, son las superficies de erosión, ya que los depósitos residuales de dichos óxidos son el resultado de largos periodos de intemperismo y, como se verá, los minerales titaníferos tienden a concentrarse ante la acción de dichos procesos.

El segundo gran principio geomorfológico citado al inicio de este apartado se ha aplicado extensamente a la localización de depósitos de placer, mas que en cualquier otro aspecto de la geología minera. Las concentraciones de placer de minerales resultan de procesos geomorfológicos definidos; se encuentran en posiciones topográficas específicas y pueden tener una expresión distintiva del relieve.

Se han identificado nueve tipos de depósitos de placer: residuales, coluviales, cólicos, de talud, de playa, de morrena terminal y de valles, sepultados y antiguos. En el caso del titanio son muy importantes los depósitos de ilmenita en playas de playa, como en Travancore, India; (McKinstry, H. H., 1977) México tiene potencial de exploración en este tipo de depósitos habida cuenta de sus más de 4000 km. de litoral, especialmente en zonas como el cañón del Novillo, en ciudad Victoria, Tamps., en donde se ha reportado (SPP-INEGI, 1987) la presencia de titanio en los flancos de la sierra de San Carlos, en la cuenca del río Soto la Marina, que desemboca al Golfo de México y forma extensos depósitos de playa que por las características de madurez y resistencia a la abrasión de la ilmenita hacen posible su presencia concentrada en dicho litoral.

En conclusión, las guías geomorfológicas del titanio encuentran aplicación por su asociación con los óxidos de hierro y la expresión directa de éstos en el paisaje, y por la concentración de la ilmenita que puede darse en los depósitos de playa.

IV.3 GUIAS LITOLÓGICAS.

Los minerales comerciales de los que se obtiene titanio, - que son la ilmenita, el rutilo y la brookita, se concentran en criaderos de rocas duras y en placeres (Gross, G. H., 1979). - La ilmenita es un mineral ampliamente distribuido en algunos - tipos de rocas ígneas, especialmente diabasas (Thornbury, W. P., 1969) y también se encuentra en cantidades importantes en anortositas (McKinstry, H. E., 1977). Asimismo, se encuentran grandes depósitos de ilmenita en las arenas de playa de Travancore en el sur de la India (Winkler, H. G., 1978), donde el titanio se encuentra como arizonita ($\text{Fe}_2\text{Ti}_3\text{O}_9$), que es más rica en contenido de dicho elemento que la ilmenita (Kerr, P. F., 1977). En experimentos efectuados en el estudio de la anatexis o fusión parcial que tiene lugar en rocas metamórficas, se ha reportado (Winkler, H. G., 1978) la formación de ilmenita; esto está relacionado con el hecho de que el rutilo es un mineral - accesorio presente en varias rocas metamórficas (Pettijohn, F. J., 1975).

Todas las rocas mencionadas son, por tanto, fuentes potenciales para los minerales de placer de titanio (Kuzvart, M., 1986).

A continuación se estudiarán los criaderos de menas de titanio en depósitos de placer, y posteriormente aquéllos en que los minerales titaníferos se encuentran diseminados en la roca.

Depósitos de placer.

Las arenas pueden clasificarse en tres grandes grupos: terrígenas, carbonatadas y piroclásticas (Pettijohn, F.J., 1975) de acuerdo con su origen. El titanio no se encuentra en arenas carbonatadas, que al litificarse generalmente son catalogadas como calizas, ni tampoco en arenas piroclásticas, por lo que -

se analizará únicamente el caso de las arenas terrígenas.

La estabilidad de un mineral depende también del transporte que sufre, pues las especies más suaves serán destruidas por abrasión con el consiguiente enriquecimiento en componentes más duros. Tomando a la hematita cristalina con un valor de 100, se ha asignado (Pettijohn, F. J., 1975) un valor numérico a la resistencia, a la abrasión de diferentes minerales estudiados, que se muestran en la tabla IV.1.

TABLA IV.1

RESISTENCIA A LA ABRASION DE MINERALES (Pettijohn, F.J., 1975)

Según Friese		Según Thiel
Hematita	100	Barita
Monazita	117	Siderita
Ortoclase	150	Fluorita
Diópsido	160	Goethita
Andalusita	220	Enstatita
Cianita	260	Cianita
Apatita	275	Broncita
Olivino	290	Hematita
Epidota	320	Augita
Ilmenita	325	Apatita
Granate	378	Espodumeno
Magnetita	380	Hiperstena
Topacio	390	Diálaga
Augita	420	Rutilo
Estaurolita	420	Hornblenda
Cordierita	480	Zircón
Pirita	500	Epidota
Turmalina	819	Granate
		Titanita
		Estaurolita
		Microclina
		Turmalina
		Cuarzo

Como se ve en la tabla, la ilmenita, el rutilo y la titanita son relativamente resistentes a la abrasión.

De lo expuesto hasta aquí, se observa que los minerales titaníferos tenderán a aparecer en depósitos de arena porque reúnen las siguientes características favorables:

1.- Los óxidos de titanio sufren un incremento relativo al transformarse en subproductos de la roca fuente.

2.- En sedimentos maduros el TiO_2 será uno de los tres óxidos presentes.

3.- La ilmenita y el rutilo son resistentes a la abrasión sufrida durante el transporte.

Rocas duras.

Las siguientes guías que se analizarán son las rocas en que aparecen los minerales titaníferos. Estas son: rocas básicas y ultrabásicas (para el caso de yacimientos de diferenciación magnética), y anfibolitas y eclogitas (para yacimientos metamorfo genicos) (Kuzvart, M. B., 1986).

Se consideran como rocas básicas aquéllas que contienen entre el 45 y el 52% de SiO_2 ; si contienen menos del 45% son ultrabásicas. Se encuentran ampliamente distribuidas en la corteza terrestre, pues son las principales componentes del piso oceánico y también se encuentran en el ambiente continental.

En el caso de la prospección del titanio las que tienen un especial interés son las básicas conocidas como diabasas: rocas intrusivas de color oscuro y textura ofítica formadas fundamentalmente por piroxenos, plagioclasas calcosódicas y olivino, uno de cuyos minerales secundarios es precisamente la ilmenita (mena del titanio). Cabe mencionar que la composición química

mica de las diabasas es similar a la de los gabros y se diferencian en las condiciones de enfriamiento, pues aquéllas lo hacen en grietas de la roca encajonante y éstos constituyen el cuerpo principal del magma.

Otra roca de interés en la prospección de yacimientos de titanio es la anortosita, roca intrusiva y formada en más del 90 por ciento por plagioclasas cálcicas y el resto por olivino y minerales melanocráticos. Estas rocas suelen encontrarse en forma de cuerpos limitados por rocas metamórficas antiguas (del Precámbrico); precisamente en el escudo canadiense se localizan yacimientos muy importantes de titanio-vanadio-hierro formados casi todos en el Precámbrico, en ellos el titanio se encuentra en masas irregulares de ilmenita que es producto de una diferenciación tardía del magma que dio origen a la anortosita es decir, la parte del magma rica en óxido de hierro y titanio se ha enclavado en la roca anortosítica, primera en cristalizar en el curso del enfriamiento de la masa magmática. Estos yacimientos, cerca del lago Allard, en Quebec, son uno de los depósitos más grandes de su tipo y constituyen una de las más importantes fuentes de titanio y fierro en el mundo.

Otras rocas favorables a la presencia del titanio son las nelsonitas, nombre que fue dado a las asociaciones de apatita y óxidos ferrotitaníferos íntimamente relacionados con terrenos precámbricos granulíticos y anortositas del tipo masivo; se les dio el nombre de nelsonitas en su localidad original -- del Estado de Virginia, E.U., y posteriormente en el suroriente de Canadá. En México, se han mencionado tres localidades con nelsonitas: Pluma Hidalgo y Huitzo en el estado de Oaxaca y el cañón del Novillo en Tamaulipas.

El origen de las nelsonitas se ha intentado explicar por medio de las hipótesis más diversas, pero las que más atención han recibido son las magmáticas y las hidrotermales. Entre las

primeras, se considera a la cristalización fraccionada como el proceso de la diferenciación magnética causante de la consolidación de minerales residuales ricos en hierro, a partir de un magma de composición gabroide. Por otro lado, ha dado gran apoyo experimental a la hipótesis de que las nelsonitas resultan de la cristalización de un líquido inmisible en coexistencia con otro de composición diorítica y generados por diferenciación de un magma también gabroide.

En cuanto a yacimientos de titanio en rocas metamórficas las guías litológicas son las anfibolitas y eclogitas. Las anfibolitas (Gross, G. A., 1979) son rocas formadas a partir del metamorfismo de rocas básicas, de color verde oscuro a casi negro constituidas por plagioclasa y hornblenda como componentes mayoritarios (más del 90 por ciento y en algunos aparecen los siguientes minerales en diversas paragénesis: rutilo, esfena, biotita, granate y almandino; las anfibolitas no presentan una clara esquistosidad y tienen importancia porque la esfena es una mena de titanio, al que contiene en más del 41.5 por ciento en forma de óxido (TiO_2); existen yacimientos de este tipo en la URSS, Suiza, Austria, Italia, Noruega, Estados Unidos, Canadá y España.

Las eclogitas son rocas metamórficas cuya composición química se aproxima a la de los basaltos, pero sin plagioclasas, y ocupan su lugar como esenciales un granate rojo y un piroxeno llamado onfacita. Se forman en condiciones de alta presión y en ausencia de agua (Winkler, H. G., 1978). No se pueden cartografiar porque habitualmente se encuentran como bandas o lentejones de complejos metamórficos de diferentes grados; también como inclusiones en kimberlitas y peridotitas; en algunas localidades muestran evidencias de haber sido transportadas tectónicamente. Por todo esto, las eclogitas aparecen en contextos geológicos muy variados (Winkler, H. G., 1978). Existen tres tipos de eclogitas e importa el tipo A en la prospección del ti-

tanio por su contenido de rutilo como el más importante de los minerales accesorios.

En México existe un depósito de titanio en Huitzo y Telixtlahuaca, Oax., en forma de ilmenita diseminada o masiva en mantos encajonados en un gneiss cuarzofeldespático de edad precámbrica (Smulikowski, K., 1964). También se ha reportado (Díaz, T., 1988) la existencia en ciudad Victoria, Tamps., del anticlinorio Huizachal-Peregrina, cuyo núcleo está constituido por un gneiss que contiene cuerpos de anortosita, formado por diferenciación de un magma gabroide-anortosítico que originó asociaciones de rutilo-ilmenita-magnetita-apatita (De Cserna, Z., 1977).

Asimismo, en las costas de Jalisco, Michoacán y Guerrero se ha reportado (Ortega, G.F., 1978) la presencia de titanio en depósitos de placer formados a partir de la erosión de rocas básicas, que serán tratados en el capítulo correspondiente a guías geotectónicas (González, P. E., 1989).

IV.4 GUIAS GEOTECTONICAS.

No es nueva la consideración de que los yacimientos minerales se localizan en determinadas condiciones tectónicas que obedecen a un desarrollo en el tiempo y una extensión espacial. Sin embargo, con la aparición de la tectónica de placas han surgido propuestas que tratan de explicar el origen de muchos tipos de yacimientos en relación con la tectónica global.

La zona de transición de las márgenes continentales ha sido señalada (Smirnov, V. I., 1978) como la más favorable para el desarrollo de la metalogenia; en ella se presentan tres formaciones de rocas magmáticas relacionadas con mineralización: la peridotita con yacimientos de cromita (Filipinas) y platino; la formación de gabro-piroxenita con yacimientos de titanio y magnetita (Japón); finalmente, la más potente, con amplio desarrollo volcánogénico, en general basalto-andesito-dacítico, con yacimientos de óxido y manganeso (que son de interés para este trabajo por su asociación con yacimientos de titanio), entre varios otros.

En las costas de mares y océanos tienen amplia representación los placeres de magnetita, ilmenita y rutilo; que se encuentran en las playas actuales, en la plataforma de abrasión y en las terrazas marinas.

Se han relacionado (Belousov, V. V., 1975) con los regímenes tectónicos de la corteza terrestre tipos específicos de ya cimientos. Esto significa que el desarrollo en el tiempo de las grandes estructuras de la corteza y el relieve de la tierra, han favorecido la formación de tipos determinados de minerales. A cada régimen corresponden asimismo, metalotectones como sismicidad, magnetismo, tectonismo, metamorfismo, petrología, estruc turas plicativas y disyuntivas, etc.

Los regímenes tectónicos reconocidos son: geosinclinal (eu, mio y parageosinclinal y macizo intermedio), orogénico (epigeo sinclinal y epicratónico), rift, cratónico (joven y antiguo), activización de los cratones (volcanismo de fisuras y chimeneas de explosión) y márgenes de los continentes. De estos seis regímenes tectónicos existen mineralizaciones de titanio y magnetita en el eugeosinclinal, y placeres de rutilo e ilmenita en el margen de los continentes, en este último se encuentran los yacimientos en las montañas marginales del continente y los arcos insulares, pues las cuencas de mar marginal son porciones del fondo oceánico a profundidades de 2 a 3.5 o en ocasiones 5 km. delimitadas por todos sus lados por elevaciones que bien pueden ser márgenes continentales, arcos insulares, o montañas submarinas (Lugo, H. J., 1985).

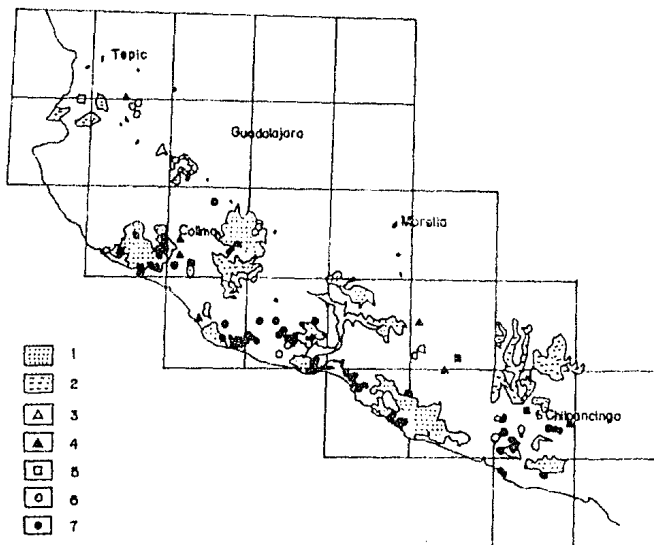
En México se han efectuado investigaciones (González, P.E., 1989) que demuestran la existencia de provincias o franjas metálicas titaníferas en la porción centro-occidental del país - cuya distribución obedece a los procesos tectónicos que se describen a continuación.

En el Cretácico Superior-Eoceno la tectónica de subducción en el occidente de México tuvo como manifestaciones emplazamiento de rocas plutónicas, levantamiento, erosión y depositación de sedimentos clásticos marinos, y producción y depósito de sedimentos continentales (Fig. IV.1). Una importante actividad ígnea se manifiesta desde el sur de California, en Estados Unidos, hasta el estado de Guerrero. La mayoría de los batolitos que se encuentran expuestos en la planicie costera sur y occidental de México, junto con las emanaciones de tobas y lavas de composición predominantemente andesítica han sido denominadas (McDowell, F. W., 1977) Complejo Volcánico Inferior. Todo ese magmatismo fue ocasionado durante la migración de un arco magmático hacia el continente, cuyo regreso se caracterizó por distensión y vulcanismo ácido.

Como resultado del desarrollo de un arco magmático continental durante el período Cretácico Superior-Terciario Inferior, se forman yacimientos tipo skarn ferrífero-titano-cupríferos de concentración magnética y pórfidos y brechas cupríferas.

Los yacimientos con valores de titanio de la zona circunpáctica de México están relacionados genéticamente con la subducción de la placa del Pacífico bajo la placa norteamericana, evento que tuvo su máxima intensidad entre el Cretácico Superior y el Terciario Inferior. La zona con potencial se extiende a lo largo de un arco magmático (cadena de plutones) formado en la porción más cercana a la trinchera, es una franja de unos 700 km. de largo por 100 km. de ancho y los cuerpos con mayor contenido de titanio son los más distantes con respecto a la zona de subducción.

Por otro lado, a lo largo de la porción litoral de los estados de Guerrero y Oaxaca aparecen anomalías de minerales pesados (peso específico mayor que 2.85) constituidos en su mayor parte por magnetita, ilmenita, rutilo, circón, monacita y gra-



Afloramientos y localidades mineras del período Cretácico Superior - Terciario Inferior en la porción centro-occidental de México 1-Intrusivos granítico-granodioríticos 2-Secuencias clásticas marinas 3-Pórfidos y brechas cupríferas (Cu, Mo, W,); 4-Yacimientos de Cu, Au, 5-Yacimientos de reemplazamiento Fe (Cu, Au) 6-Venas de Au, Ag, (Cu); 7-Yacimientos de reemplazamiento metasomático y separación magnética Fe (Ti).

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Afloramientos y localidades mineras
en México

Figura No.
IV-1

Tesis Profesional
Julio 1990

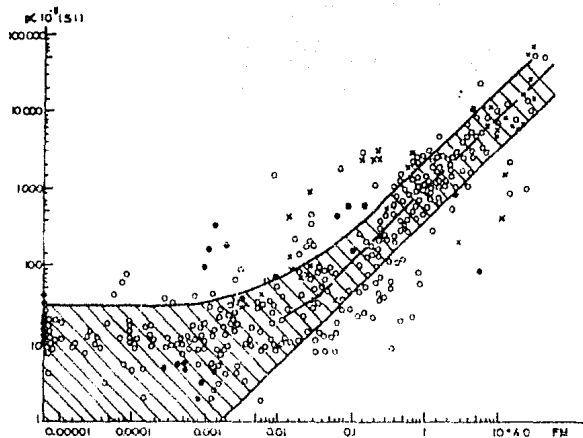
nate, los cuales parecen provenir de la destrucción de rocas - intrusivas cuya composición varía de granito-granodiorita hasta gabrodiorita-dibasas. Los yacimientos conocidos en el estado de Guerrero son los de Japútica, Cayacal, El Calvario, Piedra Tular, Coyuquilla, Papanoa y Ticul, este último asociado a molibdeno y tungsteno.

Los mecanismos de concentración de minerales pesados en la zona de playa dependen directamente de las características morfológicas de ésta, de la energía del oleaje y la acción eólica. Las mayores acumulaciones se han observado en la parte intermedia de la playa, representada generalmente por una pequeña terraza producto del oleaje en época de máxima marea o tormentas.

El estudio sedimentológico regional de la plataforma del estado de Guerrero reveló una distribución en franjas paralelas a la línea de costa. Según análisis por fluorescencia de rayos X, en el área de la desembocadura del río Balsas se encontraron minerales, que contienen en orden de abundancia: fierro, zirconio, estroncio, titanio, rubidio, bario, zinc y cobre.

IV.5 METODOS GEOFISICOS.

Los métodos geofísicos están basados en el estudio de las propiedades físicas naturales (gravitacionales, magnéticas, eléctricas y radiactivas) que resultan por la distribución de los yacimientos mineralizados. En la prospección del titanio la guía geofísica más útil es el magnetismo de las rocas básicas y ultrabásicas favorables a la presencia de dicho metal, debido a su vez al contenido de minerales tales como la magnetita, titano-magnetita, hematita y pirrotita. La fig. IV.2 muestra la relación entre el contenido de minerales ferromagnéticos y la susceptibilidad magnética de las rocas ígneas.



Dependencia de la susceptibilidad magnética de las rocas ígneas en el contenido de minerales ferromagnéticos de acuerdo a datos experimentales (Dortman, 1964, en Dortman ed. 1976) y cálculos teóricos (Vainberg, 1966 en Dortman ed. 1976) 1-Granitoides 2-Dioritas y Gabros 3-Rocas ultrabásicas 4-Campo de Correlación de acuerdo a cálculos teóricos.

○ 1

● 2

× 3

▨ 4

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Relación entre el contenido de minerales ferromagnéticos y la susceptibilidad magnética de las rocas ígneas.

Figura No.
IV-2

Tesis Profesional
Julio 1990

En la figura IV.2 se observa que las rocas ultrabásicas poseen las susceptibilidades magnéticas más altas.

Además de las magnéticas, las propiedades eléctricas constituyen una guía geofísica en la prospección de yacimientos de titanio, pues los minerales formadores de rocas presentan una resistividad alta; en cambio, la baja resistividad es típica de la mayoría de yacimientos de titano-magnetita, covelita, bornita, pirrotita, calcopirita, galena, magnetita, arsenopirita, pirita y marcasita (Juzvart, M. B., 1986). Sin embargo, la resistividad no está controlada por un alto contenido de minerales conductores sino por la estructura de éstos, ya que si los componentes conductores están distribuidos en una red continua interconectada, la mena tendrá una baja resistividad; en cambio, si los minerales conductores forman nódulos rodeados por no conductores, la mena mostrará una resistividad alta.

Por esto, el uso de métodos eléctricos en la prospección del titanio debe complementarse con el estudio de secciones delgadas para determinar el orden de cristalización, pues si los minerales titaníferos cristalizaron al final, el uso de guías geoeléctricas tiene más posibilidades de éxito.

De los métodos geofísicos mencionados, la magnetometría aérea es más útil porque permite mapear la ocurrencia de rocas básicas, susceptibles de contener titanio, rápidamente y a un bajo costo; con ella también es posible determinar de manera aproximada el espesor de sedimentos de acuerdo con el comportamiento magnético de las rocas del basamento.

IV.6 GUIAS MINERALOGICAS.

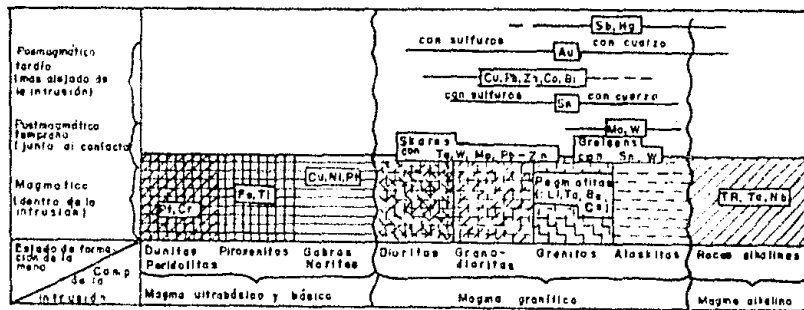
Los criterios mineralógicos más importantes en la prospección de yacimientos de titanio son la asociación de dicho metal con los óxidos de hierro y la relación entre los depósitos de titanio con la composición y diferenciación de los magmas - básicos y ultrabásicos.

Los óxidos de hierro presentes en los depósitos de titanio son: magnetita, limonita, goethita y hematita; se encuentran presentes tanto en placeres como en rocas duras. Algunos de los principales yacimientos de hierro del mundo, lo son también de titanio, como los del lago Allard, Canadá.

Por razones obvias, los productos de oxidación se encuentran en afloramientos y trabajos a poca profundidad y pueden indicar mena arriba, abajo o a los lados de ellos. La mena es tará arriba de los óxidos si éstos se deben a la filtración a lo largo de fracturas verticales o inclinadas, o bien se encontrará lateral si la filtración ocurre a lo largo de planos de estratificación o fracturas horizontales, la mena estará en una posición inferior a los óxidos si éstos son producto de la reacción entre una solución descendente y el metal oxidado.

La masa oxidada puede formar la mena, y de hecho el titanio entre otros óxidos, es explotable en la parte oxidada, porque la oxidación, al ablandar el material hace más barata la extracción, o más simple el tratamiento metalúrgico, o mejora la ley. Esto es cierto para el titanio tanto en placeres como en rocas básicas y ultrabásicas.

La figura IV.3 muestra la relación entre diversas menas e intrusiones de varias composiciones, se observa que el hierro y el titanio están asociados a magmas básicos y ultrabásicos.



Smirnov, 1957.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA

Relación entre diversas masas e intrusiones
de varias composiciones

FIGURA No.
IV-3

TESIS PROFESIONAL
Julio de 1990

Las alteraciones de la roca en la vecindad de los depósitos también es una guía de prospección. Para el caso del titanio, las alteraciones de rocas básicas y ultrabásicas incluyen: serpentinización, carbonitización, cloritización, propilitización y formación de zonas de reacción.

La siguiente guía mineralógica de yacimientos de titanio es su relación con la química y diferenciación de los magmas. En efecto, los depósitos asociados con rocas magmáticas se forman bajo dos condiciones:

- 1) Si el magma contiene suficientes elementos de mena (Ti, Sn, W, Pb, Zn, Hg, etc.).
- 2) Si contiene suficientes componentes gaseosos, como F, B, Cl, S, As, que se combinen con los elementos de mena y produzcan volátiles capaces de concentrar a éstos en lugares definidos.

Los magmas básicos y ultrabásicos tienen suficiente cantidad de titanio (que incluso hace a las rocas melanocráticas), pero pocos volátiles, por lo que no forman enriquecimientos - debidos a éstos, sino acumulaciones en la parte basal del cuerpo ígneo durante la diferenciación del magma y forman depósitos por segregación; este es el caso de las anortositas y nelsonitas.

CAPITULO V

SINTESIS DE LOS METODOS DE EXPLOTACION

- V.1 METODOS SUPERFICIALES DE EXPLOTACION DE MINAS
- V.2 EXPLOTACION A TAJO ABIERTO
- V.3 EXPLOTACION DE CANTERAS
- V.4 GLORY-HOLE

V. SINTESIS DE LOS METODOS DE EXPLOTACION

El titanio es un metal que puede resistir prácticamente casi todo: desde los más diversos agentes de corrosión que atacan al acero inoxidable, hasta las más fuertes presiones atmosféricas y temperaturas más elevadas que el acero. En las aleaciones con otros metales adquiere una dureza casi comparable a la del diamante.

Sus aplicaciones en los países en vías de desarrollo han sido restringidas por sus altos costos de recuperación y refinación. Sin embargo, la utilización del titanio metálico en la industria en general se ha incrementado grandemente.

La ocurrencia de los yacimientos titaníferos por lo general ocurre en las cercanías de la superficie, y como consecuencia su explotación se enfoca a los métodos de minería superficial, y a la explotación de placeres.

V.1. METODOS SUPERFICIALES DE EXPLOTACION DE MINAS.

Se define como "mina superficial" al conjunto de excavaciones al aire libre o a la intemperie, que se practican con el fin de extraer los minerales metálicos, no metálicos o el carbón, de sus yacimientos respectivos y cercanos a la superficie del terreno (menos de 500 pies de profundidad).

Los métodos de explotación minera superficial se clasifican en:

- 1).- Explotación de placeres.
- 2).- Explotación a cielo abierto o tajo abierto.
- 3).- Explotación de canteras.
- 4).- Glory - Hole.

En el presente estudio, se analizará la explotación de depósitos de placer y la explotación a cielo abierto o tajo abierto. La explotación de canteras y el "Glory - Hole" serán solamente mencionados, en virtud de que no resultan aplicables a la explotación de depósitos de titanio.

V.1.1 Explotación de Placeres.

Los depósitos de placer son aquéllos que están formados por arcillas, arenas, gravas u otro material detrítico y pueden - contener uno o más metales o minerales pesados; entendiéndose por metal o mineral pesado aquél que tiene un peso específico mayor de 2.94. Los depósitos de placer son aquéllos que se han originado como resultado de la desintegración de yacimientos - metalíferos originarios.

Los de mayor importancia industrial son los placeres aluviales, que suelen hallarse en los valles fluviales. Las rocas - subyacentes en estos depósitos se llaman lecho o cama; y a la capa de material metalífero se le llama arenas. El espesor de las arenas oscila en un rango de 0.5 a 3.0 m, llegándose a encontrar espesores de hasta 15 m. La longitud de los placeres suele alcanzar varios kilómetros, y tener una anchura bastante considerable.

A continuación en la tabla V.1 se enlistan los metales o minerales pesados que pueden estar contenidos en los depósitos - de placer:

TABLA V.1

P.e.	Substancia	Composición
22.0	Platino	Pt
19.0	Oro	Au
7.0	Casiterita	Sn O ₂
6.0	Scheelita	Ca WO ₄
5.0	Magnetita	Fe ₃ O ₂
4.7	Ilmenita	FeO TiO ₂
4.6	Cromita	Fe Cr ₂ O ₄
4.2	Rutilo	Ti O ₂
4.0	Corundo	Al ₂ O ₃
3.5 a 4.5	Granate	silicatos de Al, Ca, Mg, Fe y C.
3.5	Diamante	C

V.1.2 Métodos de Explotación de Placeres.

a) Excavación, cargado y acarreo.

Se excava y acarrea el material de aluvión que contiene metales o minerales valiosos a la sección de beneficio, utilizando pico, pala y carretillas (en depósitos pequeños), hasta palas automáticas (cavo, scoop-tram, palas mecánicas y/o dragalinas) en combinación con carritos mineros sobre vías o camiones; para depósitos grandes y potentes.

b) Trituración y lavado.

Es un proceso donde el material de aluvión se desmenuza o desintegra mecánicamente en un cilindro lavador o trommel, que tiene una velocidad de giro de 20 a 25 r.p.m., simultáneamente con la desintegración mecánica, al girar el trommel, se lleva

a cabo también la desintegración de las arenas por el agua aportada a la parte interior del cilindro.

Los finos y el agua se filtran por los agujeros del cilindro del trommel de donde posteriormente se conducen a los canales de lavado y/o mesas concentradoras, para su enriquecimiento subsiguiente, en tanto que las fracciones gruesas son eliminadas por bandas transportadoras a los terreros.

c) Concentración gravimétrica.

La concentración del material de aluvión desintegrado, se efectúa, en la mayoría de los casos, en canales. Un canalón está constituido por un canal de madera, cuyo fondo está cubierto de caucho, o de una lona estriada. Sobre dicha cubierta de caucho se colocan perpendicularmente al flujo del material una serie de obstáculos (Riffles), de altura variable (dependiendo del volumen y granulometría del material), hechos de madera u otro material. La inclinación del canalón varía de 3 a 12° dependiendo del tamaño, forma y peso específico del material a enriquecer. Al pasar por el canalón las partículas de metal y los minerales pesados quedan atrapados en la lona o en los riffles, mientras que el material de menor peso específico es arrastrado en suspensión por efecto de la corriente de agua y desechado en los terreros.

Para una recuperación integral más completa de las partículas finas, se utilizan canales en combinación con mesas concentradoras y/o jigs.

Los métodos empleados para el minado de placeres, se pueden clasificar con base en el método de excavación como sigue:

- 1) Instalaciones terrestres.
- 2) Instalaciones flotantes.

V.1.2.1 Instalaciones Terrestres.

Se entiende por "instalaciones terrestres", a aquellas instalaciones minero-metalúrgicas, herramientas y equipos de mina, empleados en la explotación de depósitos continentales, ya sean placeres, vetas, chimeneas o cualquier otro tipo de yacimiento mineral, emplazados dentro de la corteza terrestre.

Dentro de los instrumentos más rudimentarios utilizados por gambusinos y pequeños mineros en la búsqueda (prospección), exploración y muestreo de placeres, así como el beneficio gravimétrico a muy pequeña escala, se utilizan: el plato minero, la batea, la pala circular y el plato de tentadura, y se muestran en la figura V.1.

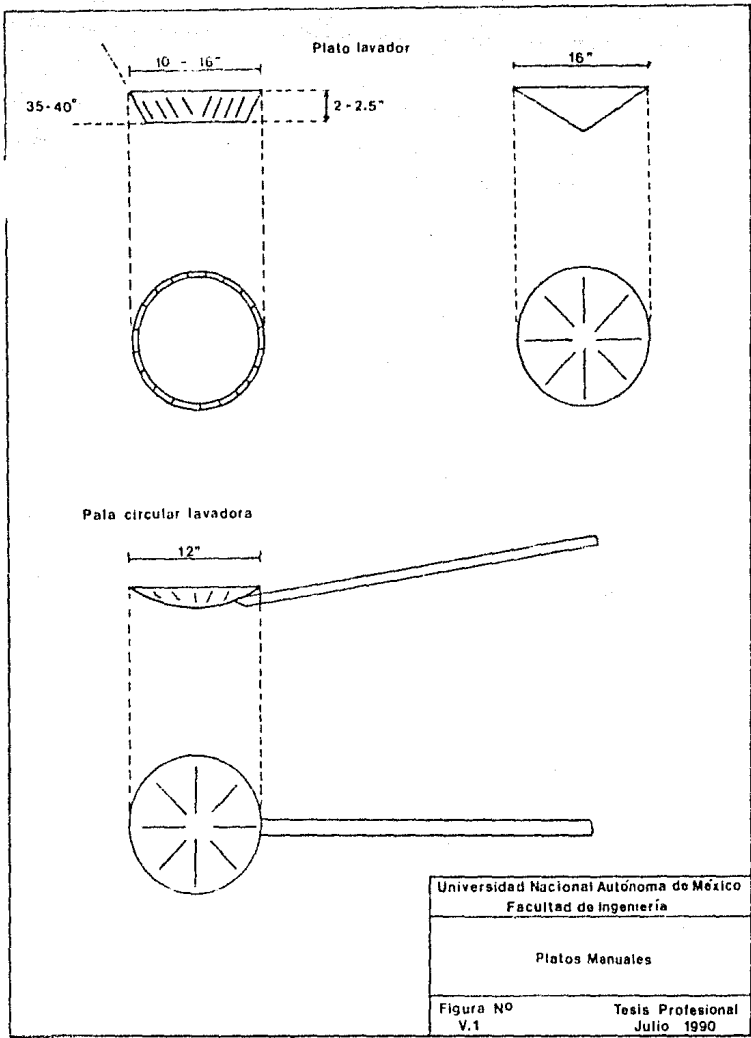
Batea o artesa.- Tiene la forma de un plato circular (madera o metal), y se usa para concentrar gravimétricamente minerales pesados, y para "tentaduras". Para la remoción del material de aluvión al utilizar este instrumento, se emplean herramientas adicionales (pico y pala).

Operación:

a) Se desmenuzan las arcillas y arenas (material de aluvión) a mano, dentro de la batea sumergida en agua.

b) Se le imprime a la batea un movimiento giratorio horizontal para que las partículas más pesadas se asienten y las más ligeras sobrefloten por derrame al ser arrastrados en suspensión por el agua.

Pala circular.- Esta se utiliza para la separación de minerales pesados y ligeros en productos que van de 3 a 4 mm de diámetro hasta tamaños de lamas. Sirve además para determinar si el material o mineral es susceptible de ser concentrado gra



Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería	
Platos Manuales	
Figura Nº V.1	Tesis Profesional Julio 1990

vimétricamente. Consiste de un plato ligeramente cóncavo con un mango largo.

Operación:

Se toma una pequeña cantidad de material de aluvi3n sobre el plato de la pala, con agua, y se le imprime un movimiento circular horizontal, por medio del cual los fragmentos m3s pesados son asentados. Se repite el proceso hasta formar la cabeza del mineral ya limpio, imprimiendo para esto, un peculiar movimiento de "tirones".

Plato de tentadura.- Es aproximadamente del mismo tama3o y forma de la pala circular, pero no tiene mango. Esta hecho de l3mina y tiene un esmalte blanco en la superficie, lo cual permite que minerales coloreados puedan ser vistos f3cilmente.

El minado de placeres por m3todos manuales es una vieja gloria que relata los d3as que recuerda la historia. Ha sido y es actualmente practicado en todo el mundo, para la obtenci3n de minerales y metales pesados (principalmente oro, plata y platino), utilizando los platos manuales y los canalones a partir del siglo XIX.

A) Cuchar3n de arrastre y l3nea de cable.

Este cuchar3n de arrastre se emplea con 3xito para el minado de cortes abiertos y dep3sitos de placer; hasta una profundidad de 30 pies. Est3 provisto de un cable de l3neas altas y descarga autom3tica. Tiene una capacidad de alrededor de 1.5 yd³.

B) Equipo m3vil.

i) Bulldozer.- Empleados en los a3os 30's, vinieron a revolucionar los cortes abiertos; siendo un importante auxiliar en

el dragado. La sección minada es empujada cuesta arriba hacia la cabeza de los canales, donde la desintegración del material es completada y clasificada mediante un flujo controlado de agua.

ii) Minado con dragalinas. - Funcionan en combinación con un canalón elevado montado en una rampa de orugas o ruedas, (en su mayoría autopropulsado). El minado con dragalinas se ha probado con éxito donde la topografía del terreno es homogénea y se tienen depósitos extensos y potentes, así como también donde el material de aluvión no esté muy cementado ni contenga abundancia de rocas grandes.

iii) Palas mecánicas. - Utilizadas en diferentes actividades para excavar y cargar material en camiones o vagones; se le incluye como un equipo principal junto con las excavadoras, bulldozers y autocargadores.

Ruedas excavadoras. - Son excavadoras continuas montadas sobre orugas autopropulsadas; operadas eléctricamente en su mayoría, pero también las hay hidráulicas. Están equipadas con una rueda excavadora provista de una serie de cangilones. El "cuchareo" de la roca se opera al girar la roca; y la roca es descargada de los cangilones sobre una banda transportadora montada en el bastidor de la máquina. El brazo del rotor o rueda, se extiende o se retrae en el proceso de trabajo, siendo levantada o bajada con ayuda de cables de acero. La capacidad de los cangilones es del orden de 200 a 4000 litros; y el diámetro de la rueda varía de 4 a 17 m.

C) Utilizando agua.

Canalones. - Se definen como cajones de madera, formados en secciones planas, a las cuales se les coloca en los costados tablas para formar secciones en forma de "U"; donde cada sec-

ción del canalón va a tener una longitud de 6 a 12 pies, (que corresponde al tamaño de la madera comercial). Sirven para lavar con agua corriente y concentrar por gravedad, los metales o minerales valiosos y pesados contenidos en un depósito de placer.

Características de los canalones:

Longitud.- Varía desde 3 secciones (36') hasta 25 secciones de (300').

Ancho.- Para beneficiar oro varía de 0.66' a 2.0'.

Altura.- Varía desde 1' hasta 3'.

Pendiente.- Esta varía en un rango del 2 al 12.5% teniendo un promedio de 4.17%.

Riffles y su espaciamento.- Los riffles son obstáculos que se colocan en el fondo de los cajones o canalones, transversalmente, y pueden ser tiras de madera, fierro, ángulo, guijarros etc. Estos se espacian o separan desde 0.25" hasta 4.0", dependiendo del tipo de mineral o metal presente, y del peso específico de éste, es decir, aquellos metales más pesados requerirán de un espaciamento mayor entre riffle y riffle para asentarse.

Los riffles desempeñan tres funciones principales:

i) Retardan el movimiento de la pulpa, para que las partículas más pesadas se asienten.

ii) Forman trampas para retener los minerales o metales pesados.

iii) Producen remolinos que clasifican por tamaños los metales o minerales atrapados entre los riffles.

El ángulo de inclinación de los canalones dependerá o estará en función del tipo de mineral, del peso específico, tipo de riffles y cantidad de agua disponible. Por ejemplo, gravas en forma tabular requerirán de más pendiente que las gravas redondeadas; gravas ásperas y pesadas requerirán pendientes mayores que las gravas finas.

Como una regla general de operación, la pendiente óptima debe ser tal que el agua usada en el canalón, transporte el material y al mismo tiempo se prevenga que las arenas no se acumulen en los riffles. Las pendientes excesivas incrementan el desgaste y reducen la efectividad de los riffles, por lo que, el tirante de agua no debe ser mayor o tener una altura mayor a la de los riffles.

La capacidad de los canalones dependerá de los siguientes factores:

- 1.- Ancho
- 2.- Pendiente
- 3.- Tirante del agua
- 4.- Gasto de agua
- 5.- Naturaleza del material de aluvi6n.

Descripci6n de las operaciones:

El material de aluvi6n se vuelca o descarga sobre una criba (con orificios de 1/4, 3/8, 6 1/2 pulgada), colocada sobre un caj6n de carga o tolva de alimentaci6n del canal6n, que es el medio para la explotaci6n del placer. Este canal6n debe estar suficientemente elevado para que proporcione una pendiente adecuada, as6 como una 6rea suficiente para depositar las colas.

La explotaci6n y beneficio de placeres mediante el empleo

de canalones, según la manera de excavar y de acarrear el material de aluvi6n hasta el caj6n de carga, tiene las siguientes variantes:

a) Operaciones a peque1a escala.- El material de aluvi6n se traspalea directamente con pico y pala al caj6n de carga del canal6n.

b) Operaci6n a escala media.- El material de aluvi6n se transporta en carretillas llenadas a pico y pala.

c) Operaci6n a gran escala.- Se hace el acarreo con carritos sobre v1as que convergen al caj6n de carga, con escrepas mec1nicas, con cables a6reos, palas autom1ticas (cavo, scooptrams, palas y/o dragalinas), seg6n sea el caso.

En la figura V.2 se muestra la secci6n de un canal6n con sus elementos.

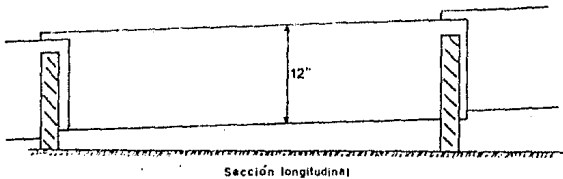
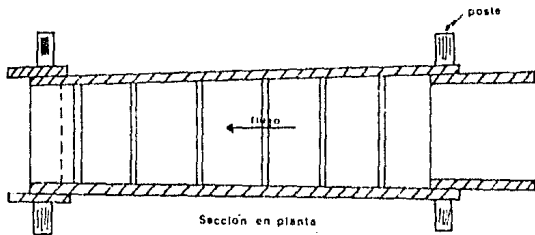
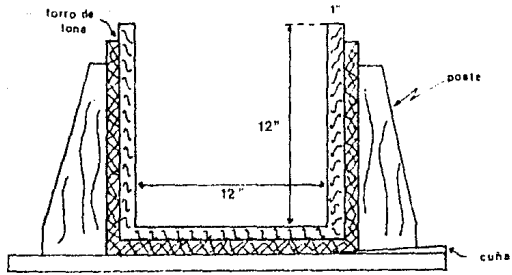
Variantes de los canalones.

Caja de Lodos.- Este tipo de canal6n se utiliza en la cabecera de una l1nea de canalones sencillos (Ver figura V.3), permitiendo que el mineral de desperdicio y cementante se asienten en el fondo de la caja; este canal6n es ocupado cuando existe escasez de agua, ya que permite un tipo de pileta donde se puede separar mejor el mineral. Este canal6n puede o no ser enriflado, cuando se enrifla se utiliza com6nmente piedra en lugar de madera. La pendiente es m1s empinada que la de la l1nea principal. Su longitud usual es de 12 a 15 pies.

Lote/ Tom.- Este es un canal6n peque1o considerado como el padre de los canalones. (como se aprecia en la figura V.4).

- Tiene una longitud de 10 a 12 pies.

Sección del Canalón en forma de "U"



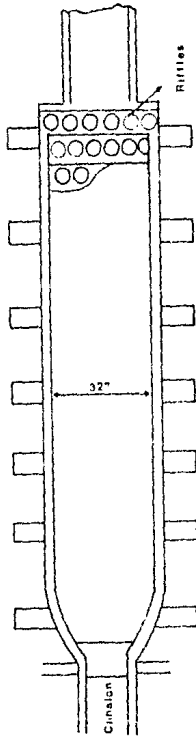
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Canalón

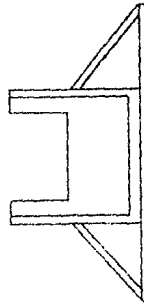
Figura N°
V.2

Tesis Profesional
Julio 1990

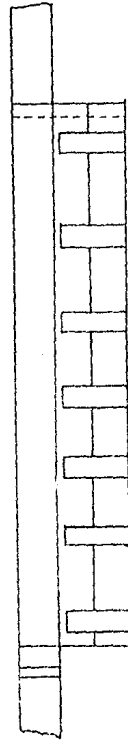
Caja de Lodos



Sección en Planta



Sección Transversal



Sección Longitudinal

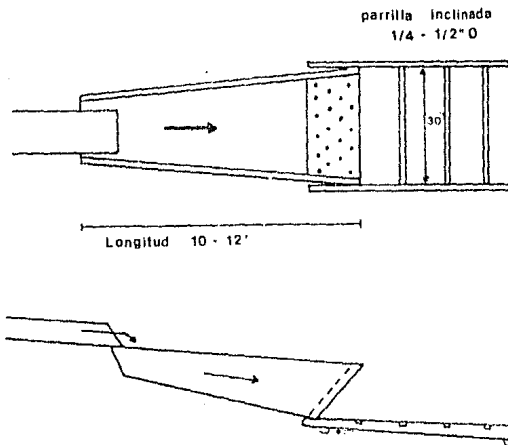
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Tipo de Canalón

Figura NO
V.3

Tesis Profesional
Julio 1990

Long - Tom



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Variante del Canalón

Figura Nº
V.4

Tesis Profesional
Julio 1990

- En su extremo superior tiene un ancho que varía de 15 a 20".

- En su extremo inferior tiene un ancho de 30", provisto de una criba inclinada en sentido contrario a la pendiente del canal con orificios de 1/2". Debajo de la criba existe otro cajón abierto provisto de riffles transversales en su fondo, con una anchura mayor que el cajón anterior.

Monitores hidráulicos.- Los monitores hidráulicos son dispositivos especiales conectados con una tubería de alimentación de acero, cuyo extremo libre está provisto de un chiflón. Se encuentra montado sobre un bastidor equipado con ruedas metálicas (ilustrado en la figura V.5), para desplazar el aparato sobre unos carriles de la armadura de soporte. Además, está equipado con una caseta para el operador, que es desmontable. Su radio de movimiento es de 360° en un plano horizontal y en un plano vertical se limita el ángulo a 30° por motivos de seguridad.

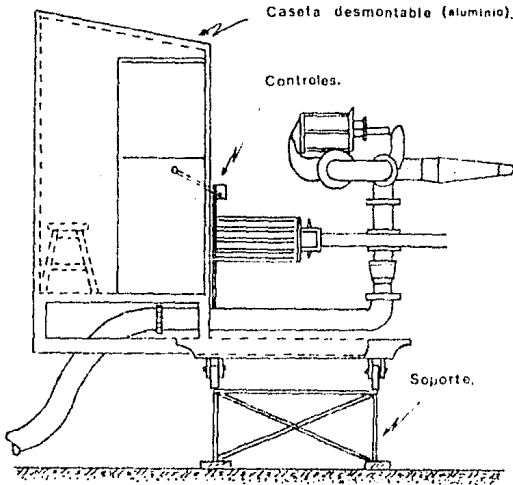
El minado hidráulico, utilizando monitores, consiste básicamente en aflojar y desintegrar el material de aluvión mediante el potente chorro de agua que sale de un chiflón. El material desintegrado es acarreado por la misma agua, por gravedad, a través de zanjas canales y acequias, hasta un circuito de canales donde el mineral pesado es concentrado en los riffles (planta de tratamiento).

Clasificación del minado hidráulico:

- i) Minado con cortadores a baja presión (10 a 300 kg/cm²).
- ii) Minado con cortadores a alta presión (1400 a 1700 Kg/cm²).

El minado hidráulico a baja presión se aplica específicamente en la explotación de depósitos sueltos o no consolidados,

(Monitor Hidráulico.)



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Módulo Hidráulico

Figura N°
V.5

Tesis Profesional
Julio 1990

erosionando las formaciones o depósitos de material blando.

Aplicabilidad de los monitores hidráulicos.

i) Cuando se trate de la explotación a gran escala de placeres extensos y potentes; o bien, para descapotar el material de aluvión que cubra a un criadero mineral.

ii) Cuando la roca del fondo del depósito de placer tenga pendientes de 2 a 6% para material de aluvión fino o grueso respectivamente.

iii) Cuando se disponga de grandes cantidades de agua a presión.

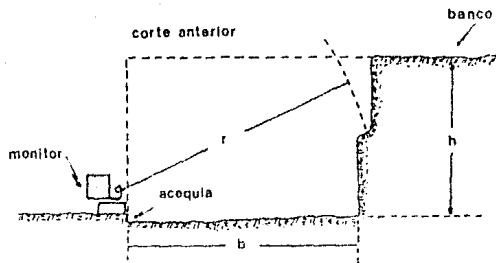
Variantes del minado hidráulico.

a) Minado por bancos.- Consiste esencialmente en preparar bancos en donde se desplazará el monitor a lo largo de una línea recta, sobre dos soportes o carriles que van colocándose alternativamente uno a continuación de otro. El monitor se desplaza empujándolo manualmente.

Una vez que se ha hecho el corte a todo lo largo del banco, se procede a llevar el aparato al principio del nuevo banco. La altura de los bancos varía de 0 a 10 m.

b) Minado por abanicos.- En este método de minado, el cono formado al efectuar el corte sirve de base de sostenimiento al aparato. En este método el monitor se deja fijo en un punto, es decir, no se desplaza. La altura de los bancos está en función directa del alcance efectivo del chorro, siendo ésta mucho menor que en el método de minado por bancos.

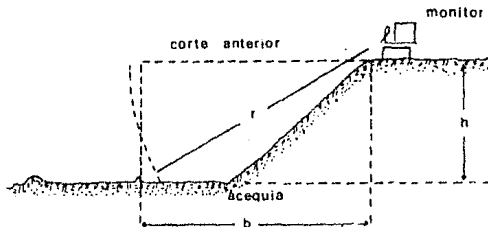
En las figuras V.6 y V.7 se aprecia la diferencia del minado entre uno y otro método hidráulico.



Tumba por Bancos

donde:

- r = alcance efectivo
- h = altura del banco
- b = ancho del corte



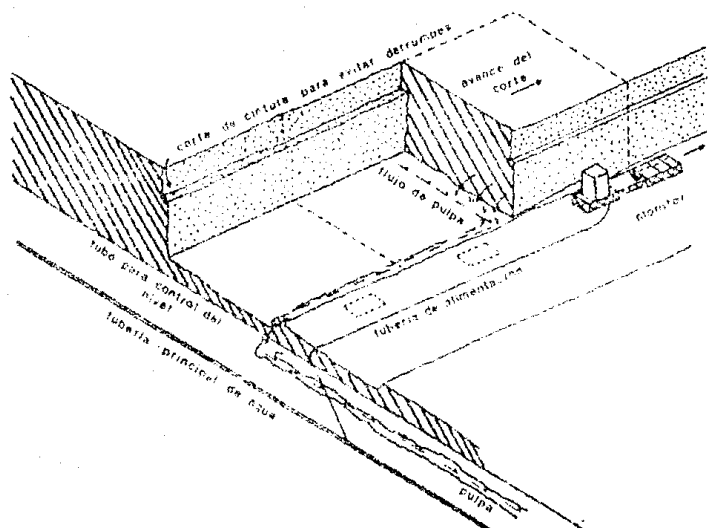
Tumba por Abanicos

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Minado Hidráulico

Figura Nº
V.6

Tesis Profesional
1990



Universidad Nacional Autónoma de México
 Facultad de Ingeniería

Minado Hidráulico

Figura N°
 V.7

Tesis Profesional
 1990

Ventajas y desventajas del minado hidráulico.

Ventajas:

- a) Alta productividad.
- b) Bajo costo de operación.
- c) Baja inversión inicial.
- d) Poca mano de obra.
- e) Buena recuperación.
- f) Alta seguridad.

Desventajas:

- a) Se requiere una gran capacidad de bombeo.
- b) Gran abrasión en equipos y tubería.
- c) No es selectivo.
- d) Requiere de personal capacitado.
- e) Influencia de las condiciones climáticas (lluvia).
- f) Requiere de fuentes de abastecimiento de agua abundantes.

V.1.2.2 Instalaciones Flotantes.

- A) Dragalinas y plantas de lavado flotantes (teledirigidas).
- B) Dragado en línea con cucharón.
- C) Dragado hidráulico sobre una barcaza o sobre un barco.

Aplicabilidad:

- i) Cuando se trate de explotar a gran escala placeres extensos y potentes (de hasta 60 m. de potencia).
- ii) Cuando el material de aluvión no esté muy cementado ni contenga abundancia de rocas grandes.
- iii) Cuando la roca del fondo sea casi horizontal (menos

del 2% de pendiente).

iv) Cuando se disponga de agua suficiente para formar un lago artificial, y para reponer el agua perdida por percolación.

Minado por dragas.

El dragado de un placer extenso y potente, consiste en la excavación bajo el agua del material de aluvión de baja ley. La draga es una excavadora continua de grandes volúmenes de material detrítico, unida a una planta de concentración gravimétrica (canalones, jigs, mesas, etc.), con dispositivos para el transporte y depósito de jales. Todo lo anterior se encuentra montado en una plataforma flotante, pontón o barcaza. Normalmente las dragas pueden excavar bancos de 3 a 40 m debajo de la superficie libre del agua, y de 4 a 8 m de altura arriba de dicha superficie.

Descripción de la draga.

Una draga es una instalación flotante que está provista de los siguientes elementos:

- i) Equipos de excavación continua (rosario de cangilones).
- ii) Equipos de transporte (bandas).
- iii) Equipo de lavado y clasificación (trommel).
- iv) Equipos de concentración gravimétrica del material de aluvión (canalones, mesas y jigs).
- v) Sistema de bombeo.
- vi) Planta generadora diesel-eléctrica.

Es decir, una draga es una máquina flotante de excavación continua, combinada con una planta de concentración gravimétrica y otra planta diesel-eléctrica.

Realiza todas las operaciones principales de explotación y extracción del depósito, desintegración hidráulica, concentración y evacuación de las colas. A medida que avanza la extracción de los materiales, la draga va desplazándose en pos del depósito. Por medio de la draga se explotan placeres inundados, de un ancho no inferior a 30 ó 40 m y exentos de intercalaciones de rocas duras. La profundidad máxima del depósito no debe superar la profundidad máxima de dragado de 40 m como ya se había dicho.

Un obstáculo para la explotación por dragado, lo constituirá una pendiente considerable del lecho del depósito, lo que dificulta el mantenimiento del nivel del agua en las cotas determinadas. Las reservas de mineral deben asegurar el funcionamiento de la draga en una explotación por lo menos durante 3 ó 12 años, puesto que el traslado de la draga a un sitio nuevo acarrea grandes costos de montaje y desmontaje de la instalación.

Descripción de operación.

La draga debe flotar en un estanque artificial o natural moviéndose a medida que avanza excavando por delante, y descarga y rellena hacia atrás. Un rosario o cadena sin fin de cangilones de acero al manganeso excava el material de aluvión y lo transporta a una tolva o depósito, de la cual pasa a través de un chute o plano inclinado a un trommel o cilindro lavador. El material fino que pasa a través del trommel es descargado sobre canalones, jigs o mesas concentradoras, y el material grueso que no pasa el trommel es descargado sobre una banda transportadora instalada sobre una pluma inclinada, que lo acarrea y descarga en la parte trasera de la draga. Los gruesos de los metales o minerales valiosos se recuperan en los jigs, los finos en las mesas concentradoras.

En la figura V.8 se muestran los elementos que constituyen una draga y que se describen a continuación:

La barcaza o pontón de la draga (1), viene a ser un barco de fondo plano, construido con acero o madera, sobre la cual va instalado todo el equipo de minado. En la proa del pontón hay una abertura para la guía de los cangilones, el espesor del revestimiento de los pontones metálicos es de 5 a 20 mm. En el pontón van montadas dos vigas metálicas (2), a las que se fijan los mecanismos de la draga. En el mástil de proa (3), va suspendida la guía de cangilones (4). Para la suspensión de los pilotes (5) y el transportador de colas (6), se utiliza el mástil de popa (7).

La extracción de los valores comerciales del depósito y su acarreo sobre la draga, son efectuados por el aparato recogedor (guía y cadena de cangilones).

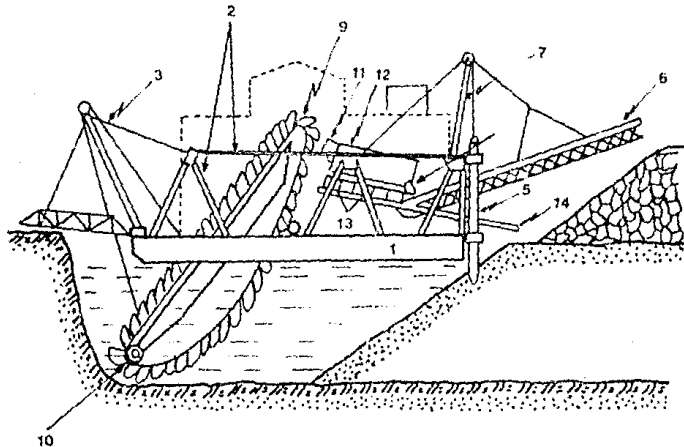
La cadena de cangilones (8), consta de cangilones separados entre sí. Los cangilones tienen una capacidad que varía entre 50 y 570 litros.

La guía está constituida por una viga metálica de sección cuadrangular, cuyo extremo superior se apoya con su abrazadera en el árbol del tambor superior. (9).

La guía de cangilones lleva fijos los rodillos de apoyo que soportan la cadena de cangilones. El largo de la guía (12 a 66 m), determina la profundidad de extracción posible. El tambor superior de forma exagonal, es el de mando, y el inferior de forma redonda, (10) el de guía.

Al pasar por el tambor superior el material minado, es descargado de los cangilones a una artesa o tamiz de carga (11) y de ésta las arenas desintegradas pasan por los agujeros del tambor lavador o trommel (12) y de éste a el canalón (13), o a las cribas.

"Esquema de una Draga."



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Minado con Dragas

Figura N°
V.8

Tesis Profesional
1990

Las arenas que han recorrido los canalones son encauzadas a los desechos (situados en la parte inferior o parte trasera de la draga), por los vertederos de colas o relaves (14). El material grueso, pasando por la artesa o tamiz (15) se vierte sobre la banda transportadora para ser descargado y apilado.

El desplazamiento de la draga se opera por medio de malacates de maniobra y pilotes.

En calidad de equipo de fuerza motriz, las dragas llevan motores eléctricos o motores de combustión interna, cuya potencia total alcanza de 1500 a 2000 kW. La draga es manejada por un total de 10 a 15 hombres, bajo el mando de un supervisor, encargado de la dirección general de los trabajos.

Ventajas y desventajas del dragado en depósitos de placer.

Ventajas:

- i) Alta productividad.
- ii) Poca mano de obra.
- iii) Factibilidad de explotar yacimientos de baja ley.
- iv) Bajos costos de operación.
- v) Presenta recuperaciones del 85-90%.

Desventajas:

- i) Alto costo de mantenimiento.
- ii) Sólo se explotan yacimientos no compactados.
- iii) Requiere gran capacidad de bombeo.
- iv) Si el yacimiento es muy grande requiere de una plataforma flotante.
- v) Gran abrasión en equipo y tuberías.

- vi) No es selectivo.
- vii) Destrucción ecológica.
- viii) Requiere de un alto costo inicial.

V.2.1 Explotación a Tajo Abierto.

El minado a cielo abierto o tajo abierto es uno de los métodos más usados en el mundo; por ejemplo, en la unión soviética más de 2/3 partes del total de los minerales extraídos, son obtenidos mediante el minado a cielo abierto, y según las investigaciones más recientes, con dicho método se podrían obtener cerca del 55% del total de carbón, el 75% de las minas de metales no ferrosos, así como hasta el 82% de minerales de hierro, dentro de los cuales se encuentra asociado el mineral de titanio llamado Ilmenita.

Históricamente la minería superficial ha sido aplicada esencialmente en la explotación del carbón mineral, del cobre (más del 80% en E.U.A.), del hierro (más del 90% en E.U.A.) y minerales de aluminio en los que se encuentra asociado el mineral de titanio también, en la explotación de canteras que producen arcilla, yeso, roca fosfórica, arena, grava y piedra.

La gran difusión de los métodos de minado superficial y la ampliación continua de su campo de aplicación, se explican por toda una serie de ventajas de este método de minado, en comparación con los métodos de minado subterráneo, así como a las innovaciones tecnológicas que fueron desarrolladas después de la segunda guerra mundial (1945), las que vinieron a favorecer el desarrollo de la minería superficial.

V.2.2 Innovaciones Tecnológicas.

La explotación a cielo abierto hizo notables progresos a partir de 1945 a 1965, debido a cuatro innovaciones tecnológicas, que fueron:

1.- Campo de los explosivos: con la introducción de las mezclas "ANFO" (Amonium. Nitrate. Fuel. Oil). El costo de esta mezcla se redujo a menos de 1/3 parte del costo de las dinamitas. Esta mezcla se patentó y comenzó a usarse a partir del año - 1955.

2.- Introducción de la perforadora rotaria: antes de la segunda guerra mundial (1939-1945), se usaban casi exclusivamente perforadoras del tipo "Churn-Drills" en los bancos de las minas a tajo abierto, perforadoras que daban barrenos de 6 hasta 12 pulgadas de diámetro por 60 a 90 pies de profundidad, y a una velocidad de 15 a 80 pies por turno, según la dureza de la roca por barrenar.

Después de la segunda guerra mundial, se introdujeron las perforadoras rotarias, las cuales daban barrenos de las mismas dimensiones antes señaladas, pero a velocidades de 200 a 400 pies/turno. Es decir, en promedio, la perforadora rotaria resultó cinco veces más rápida que la "Churn Drill", y requería sólo de la cuarta parte de los operadores (mano de obra), por consiguiente esta innovación en el campo de las perforadoras - también abatió los costos por concepto de perforación o barrenación.

3.- Incremento de la capacidad de los equipos de excavación y rezagado:

i) Palas de ataque.- Pala montada sobre orugas y con radio

de giro de 360°, accionadas eléctricamente.

ii) Dragalinas.- Pala excavadora de cucharón de arrastre.

iii) Ruedas excavadoras.- Rueda excavadora muy usada en Europa, en lugar de la dragalina, para la explotación de grandes mantos, particularmente de carbón y de potasa.

Antes de 1945, se utilizaban palas mecánicas con cucharones de 3 a 5 yd³ para cargar, y para descapotar se usaban palas o dragalinas con cucharones de hasta 33 yd³. Después de la segunda guerra mundial, las capacidades de dichos cucharones se incrementaron de 5 a 15 yd³, y de 33 a 180 yd³ respectivamente (5 veces); además también aumentaron proporcionalmente la longitud y alcance de la pluma de palas y dragalinas. Todo esto incrementó la capacidad de trabajo de estos equipos de excavación y rezagado y en consecuencia abatió los costes por dicho concepto.

4.- Incremento de la capacidad de los equipos de acarreo. - Después de la segunda guerra mundial, las locomotoras de vapor, trolley y diesel comenzaron a ser desplazadas por los camiones los cuales podían vencer pendientes más fuertes y curvas más pronunciadas que los ferrocarriles.

Por otra parte, al aumentar la capacidad de los cucharones de las palas, fue necesario aumentar la capacidad de los camiones que les daban servicio, (un camión debe llenarse con 4 ó 6 cucharones de pala). Antes de 1950, se usaban camiones de 2, 5, 10, 20 y hasta 30 toneladas de capacidad. La revolución en el transporte de camiones se inició entre 1955 y 1960, con la introducción de camiones de 85 y 100 toneladas de capacidad. - En 1965, se introdujo al mercado un camión de 240 toneladas de capacidad. en las minas de carbón a tajo abierto de Illinois.

En 1980 en la exposición de maquinaria minera en las Vegas Nevada, E.U.A., se mostró un camión de 300 ton. de capacidad.

Resumiendo, de 1945 a 1965, la minería superficial aprovechó mejor las innovaciones tecnológicas que la minería subterránea; sin embargo, durante lo que resta del siglo XX, la minería subterránea deberá ponerse a la par en avances, así como lo muestra y lo está haciendo la minería a cielo abierto.

V.2.3 Definición de Tajo Abierto.

Se define como el método indicado para la explotación de grandes criaderos minerales que afloran o que se localicen cercanos a la superficie del terreno, y que permitan altos ritmos de producción. También se puede definir como una operación de minado, de un mineral en específico, que debe ser extraído de una matriz o formación donadora.

Después de que el material económicamente aprovechable (mineral) ha sido removido, el material remanente se considera como desperdicio y debe disponerse de él en una forma que resulte conveniente y sobre todo económica de acuerdo al medio ambiente de la zona.

El diseño de una mina a cielo abierto toma en cuenta los siguientes factores: orientación de los estratos, fracturas y fallas (del cuerpo mineral y del encape); relación tepestate mineral; condiciones metereológicas; ritmo de producción y equipo disponible.

Se distinguen cuatro tipos de minas a cielo abierto:

1.- De un solo banco: donde se tiene un solo nivel de opera

ción, y la altura normal de los bancos varía de 12 pies (en roca floja), a 25 pies.

2.- Bancos múltiples: se aplica a criaderos o mantos con espesores mayores de 50 pies. El ancho de los bancos varía de 20 a 75 pies, dependiendo del tamaño de los equipos de acarreo, y su altura varía de 20 a 60 pies, (el promedio de altura en tajos grandes tipo Cananea, la Caridad y R. de Angeles es del orden de 50 pies).

Estos bancos pueden formar una espiral hasta el fondo del tajo, o bien, pueden ser bancos horizontales unidos por rampas (con una pendiente del 8 al 12%). Ver figura (V.9).

3.- Descapote de mantos de carbón.

4.- Canteras.

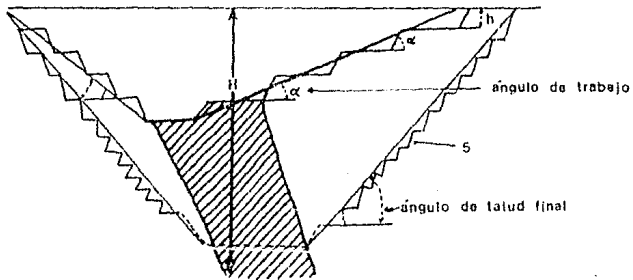
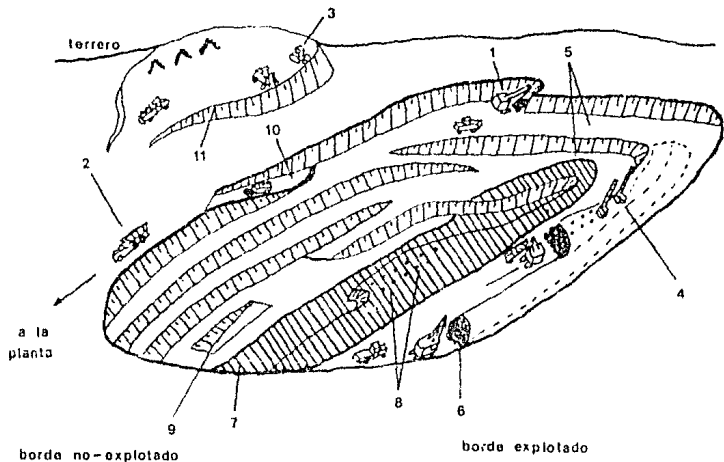
Para fines de este trabajo, no se analizan los métodos de descapotes de mantos de carbón, que como su nombre lo indica, se aplica en el minado del carbón; así como el minado de canteras, que se utiliza para explotar minerales no metálicos utilizados en la industria de la construcción.

V.2.4 Características Generales del Minado a Tajo Abierto.

Cuando un yacimiento es explotado a cielo abierto, la zona a explotar se divide en capas horizontales. Los tajos adquieren en el proceso de explotación una forma escalonada (como se muestra en la fig. V.10), puesto que se explotan varias capas horizontales simultáneamente.

Las partes del cuerpo que toman la forma de un escalón reci

Esquema de Explotación a
Cielo abierto



(Sección Transversal)

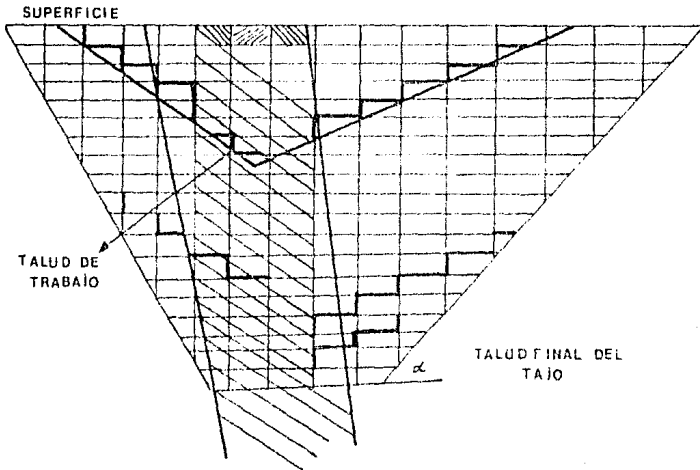
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Minado a Cielo Abierto

Figura Nº
V.9

Tesis Profesional
1990

Secuencia de Minado en un Tajo Abierto



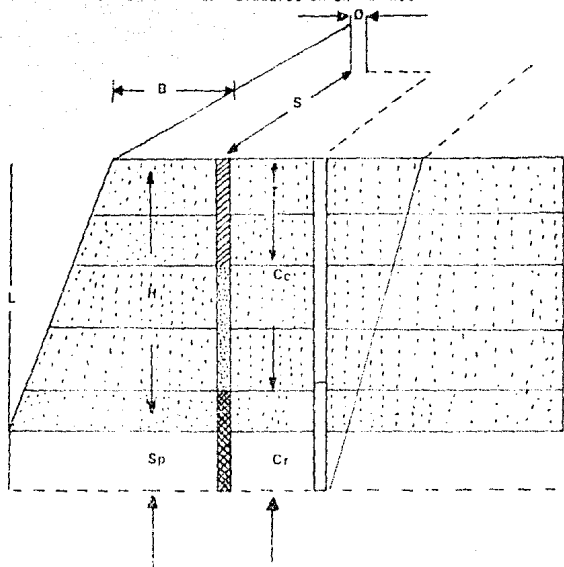
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Minado a Cielo Abierto

Figura N°
V.10

Tesis Profesional
1990

Parámetros de Voladuras en un Banco



Donde:

- D = Diámetro del barreno (pulgadas).
- B = Bordo (m).
- S = Espaciamiento (m).
- L = Longitud del barreno (m).
- H = Altura del banco (m)
- r = Taco (m).
- Sp = Sub-perforación
- Cc = Carga de columna (m/kg)
- Cf = Carga de fondo (m/kg).
- Fc = Factor de carga (gr/m^3)

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Minado a Cielo Abierto

Figura N°
V.11

Tesis Profesional
1990

ben el nombre de bancos. En los bancos se pueden distinguir - los siguientes elementos:

- i) Banco superior e inferior.
- ii) Cara libre del banco.
- iii) Inclinación o ángulo de talud del banco.
- iv) Altura del banco.
- v) Ancho del banco.

En las minas donde se utiliza el método de bancos múltiples también existe un ángulo de talud general que estará en función de las características del cuerpo mineral y roca encajonante.

V.2.5 Angulo de Talud.

El ángulo formado por la intersección del plano o cara del banco con el plano horizontal se llama ángulo de talud del banco (α). Los conceptos de banco superior o inferior son relativos, ya que el nivel superior de un banco es a la vez el nivel inferior de otro banco que está sobre el anterior.

La distancia vertical entre el nivel superior e inferior es la altura del banco (h), y varía dependiendo de varios factores como lo son: equipo de perforación, necesidades de producción, etc..

V.2.6 Ciclo de Operación.

A diferencia de una explotación subterránea, en una a cielo abierto, a la par del mineral, se extrae necesariamente el material no aprovechable o tepetate que circunda al cuerpo mineralizado. El proceso de extracción del mineral recibe el nom-

bre de trabajos de extracción, y el de la remoción del tepetate, descapote.

Dentro del proceso general de los trabajos de extracción y descapote, se llevan a cabo las siguientes operaciones:

- a) Barrenación o perforación.
- b) Voladura o disparo.
- c) Cargado o rezagado.
- d) Acarreo del mineral a la planta de beneficio.
- e) Acarreo del tepetate a los terreros.

DESCRIPCION DEL ESQUEMA DE EXPLOTACION A CIELO ABIERTO.

- 1.- Equipo de cargado (pala mecánica).
- 2.- Equipo de acarreo (camiones).
- 3.- Bulldozer.
- 4.- Equipo de perforación (perforadoras rotarias).
- 5.- Bancos o niveles de explotación.
- 6.- Material fracturado con explosivos.
- 7.- Cuerpo mineralizado.
- 8.- Perforaciones o barrenos.
- 9.- Rampa de entrada al 4° nivel.
- 10.- Rampa de acceso al tajo.
- 11.- Terrero.

V.2.7 Selección y Aplicabilidad del Método.

En la selección de un método de explotación, hay que tomar en cuenta muchos factores que en un momento dado pueden hacer incoesteable el uso de éste, así como también la aplicabilidad del mismo. Para la selección del minado a cielo abierto, a continuación se enuncian algunos de los parámetros más importantes para su aplicación:

1.- Es aplicado en yacimientos que se encuentran a poca profundidad, o donde la relación estéril-mineral permite una operación económica.

2.- Es aplicado en yacimientos que contengan grandes volúmenes de mineral con bajas leyes; donde el manejo de estos grandes volúmenes hagan rentable la operación.

3.- En aquellos lugares donde la topografía del terreno no sea abrupta, e impida la operación de la mina.

V.2.8 Relación de Descapote en una Operación a Tajo Abierto.

Al aplicar cualquier método de explotación bien sea a cielo abierto o subterráneo, parte del mineral, por razones técnicas o económicas, debe quedar in-situ, es decir, sin explotarse o removerse como estéril o encape en las operaciones del tajo.

En las operaciones a tajo abierto, la remoción de la parte estéril o del encape, constituye un costo adicional que debe cargarse proporcionalmente a la tonelada aprovechada de mineral.

En las operaciones a cielo abierto para determinar volúmenes y tonelajes de los encapes y de las zonas estériles o incoesteables, es necesario partir del estudio y análisis de los

barrenos o de las obras, hechas en la etapa de exploración, a fin de poder hacer el cálculo de las reservas mineras y poder ubicarlo dentro del yacimiento.

El descapote puede ser una parte muy grande del costo de la explotación de una mina a cielo abierto; deberán tomarse en cuenta varios factores antes de realizar esta operación. El espesor del material que debe removerse (encape), depende de su carácter y accesibilidad del valor de la formación mineral, del costo comparativo de la explotación subterránea con la explotación superficial, y hasta del costo total de la porción de material removido.

Un yacimiento mineral puede ser explotado por métodos a cielo abierto hasta la profundidad necesaria para que el costo total de una tonelada de mineral (incluyendo costos por trabajos de descapote), sea igual o menor al costo asignado por el minado subterráneo.

V.2.9 Planeación y Diseño de una Mina a Tajo Abierto.

El minado a tajo abierto debe proyectarse de tal manera que el nivel más bajo de explotación y tumba tengan las dimensiones necesarias para extraer el mineral disponible a este nivel, aumentando sus dimensiones en cada uno de los niveles o bancos superiores.

La altura de cada banco se proyectará de acuerdo con el volumen de mineral que hay necesidad de mover, y del tamaño de los equipos requeridos para barrenar y cargar el equipo de transporte que llevará el mineral a la planta de beneficio, a los terreros de lixiviación si los hay, o a los terreros de es téril o tepetate.

La anchura de los bancos se calculará en forma tal que permita con amplitud trabajar los equipos de carga y limpia en las zonas que se ha hecho la remoción del mineral y al mismo tiempo accionar y cargar el equipo de transporte con amplitud y seguridad, y que también permita la doble circulación de dicho equipo de transporte.

Al mismo tiempo este ancho deberá ser tal que permita alojar las "bermas" laterales y las rampas de seguridad necesarias para prevenir accidentes que eventualmente se pueden presentar en los caminos de acarreo del tajo, especialmente cuando las pendientes son a favor de la carga.

V.2.10 Procedimiento para la Planeación y Diseño de una Mina a Cielo Abierto.

Hay muchos factores que influyen en la eficiencia del tajo en el minado superficial, entre otros se tiene:

- 1.- El elemento humano, eficientes superintendentes, operadores, etc.
- 2.- Localización y topografía del lugar.
- 3.- Condiciones climáticas.
- 4.- Características geométricas, geológicas y de mecánica de rocas (tanto del mineral como del encape del yacimiento).
- 5.- Tonelaje de las reservas geológicas y mineras, así como el volumen de tepetate a mineral.
- 6.- Selección y uso del equipo.

V.2.11 Características del Cuerpo Mineral.

En la etapa de planeación de una operación minera a tajo abierto, el primer trabajo a seguir es ubicar y determinar el tonelaje de mineral del yacimiento, (determinar características geométricas, geológicas y mecánicas del yacimiento), incluyendo su forma, leyes, estructura, consistencia mecánica, etc.

El inventario de la mineralización se elabora en función del resultado obtenido de los programas de barrenación y en la topografía de la superficie del terreno; dicho inventario, deberá representar un modelo completo de la topografía y de la geología del yacimiento, así como de la distribución de la mineralización o de los valores dentro del mismo yacimiento.

Esto lleva a estudios para determinar la densidad del tepe-tate y del mineral, tanto quebrado como in-situ, así como su dureza, expresando el peso del material in-situ en ton/yd^3 y en lb/pie^3 el del material quebrado; el contenido de humedad, los esfuerzos y propiedades para soportar la carga de los materiales. De estos datos, el ángulo de la pendiente del tajo (ángulo de talud), tanto final como de trabajo, se determina en función de las condiciones estructurales del mineral y del encape, así como la relación de descapote permisible.

Para determinar las pendientes finales del tajo, se deberá considerar la localización, la orientación y las características de las estructuras geológicas (fallas, discontinuidades etc.); la experiencia operativa con tajos; las técnicas de mecánica de suelos y de rocas; la posición del nivel freático y los problemas geohidrológicos potenciales; además deberá tomarse en cuenta la variable tiempo: bancos muy parados pueden sostenerse algunos meses, y hasta años, lo que permitiría la rá-

vida extracción del mineral.

Las pendientes del tajo, convenientemente determinadas, podrán reducir la relación de descapote y aumentar la cantidad de mineral que pueda ser económicamente minado, incrementando así las reservas mineras y la vida de la operación.

La estabilidad del tajo junto con la localización y pendiente del sistema final de la rampa, jugará una parte importante en la eficiencia de todo el tajo. La pendiente de trabajo del tajo, generalmente es menor que la pendiente final de éste, manteniéndose en el ángulo de seguridad máximo para incrementar la eficiencia y bajar los costos de operación.

V.2.11 Futuro de la Minería Superficial.

La minería superficial es considerada más ventajosa en la recuperación y extracción de mineral que la minería subterránea, (productividad, flexibilidad, seguridad, control de minado, etc.). Hay sin embargo muchos depósitos que por ser muy pequeños, irregulares y muy inclinados, no son económicamente explotables por métodos superficiales; además donde el nivel de mineralización se extiende a grandes profundidades en el tajo abierto, el rápido incremento de la cantidad de encape que va a ser manejado, impone límites económicos más allá de los cuales o el minado debe ser abandonado o se convierte de una operación superficial a una operación subterránea.

Algunos autores creen que las condiciones futuras, forzarán a un regreso de las tendencias de minería subterránea a minería superficial, con un cambio regresivo gradual a los subterráneos.

Los cambios en la actitud del público y de los gobiernos, - sobre el control ambiental tenderán, para algunas extensiones, a incrementar los costos de las operaciones superficiales. Ejemplo de esto es el caso que en los E.U.A. y en todos los países altamente industrializados y densamente poblados, el público y el gobierno están ejerciendo una fuerte presión para reducir o eliminar las minas superficiales, porque destruyen la belleza natural del paisaje, envenenan los ríos con desechos y ácidos, y contaminan la atmósfera con partículas de polvo y con gases de las disparadas. En conclusión dañan la ecología del lugar.

Actualmente la minería superficial tiene una productividad promedio de 100 ton/hombre-turno para minas pequeñas (metálicas, no-metálicas), y arriba de 500 ton/hombre-turno para grandes operaciones de carbón y de minerales industriales, incluyendo todo el manejo de tepetate y mineral.

V.3.1 Explotación de Canteras.

Se denomina cantera a la explotación a tajo abierto de los yacimientos de donde se extraen los materiales empleados en la construcción (arena, grava, piedra de sillar, tezontle, mármol etc.).

Para explotar una cantera es necesario conocer:

- a) Naturaleza del yacimiento.
- b) Características físicas del mismo.
- c) Importancia de los materiales que recubren el yacimiento entre otras.

V.4.1 Glory-Hole.

Este método de minado consiste en combinar el tumba a tajo abierto o cielo abierto con el acarreo y el manto subterráneo.

El método de minado "glory-hole" representa el paso de transición entre los métodos superficiales y subterráneos de explotación de minas.

El método de Glory-Hole se caracteriza por ser una excavación en forma de embudo a partir de un contrapozo, con el fin de que el mineral caiga por gravedad en éste.

Aplicabilidad:

a).- En tajos abiertos

i) Se aplica en roca de cualquier tipo que no tenga tendencia a la compactación cuando esté quebrada.

ii) La roca como el mineral deben ser homogéneos (roca sana).

iii) Se aplica en vetas de gran potencia, mantos y chimeneas poco profundos.

b).- En minado subterráneo.

i) Se debe tener roca autosoportable.

ii) Inclinación o buzamiento del cuerpo mayor de 60° en el caso de vetas.

iii) Paredes resistentes.

iv) Cuerpos consistentes o uniformes.

EJEMPLOS DE CONCENTRACION DE DEPOSITOS DE PLACER.

El siguiente cuadro muestra a continuación algunos minerales o metales contenidos en depósitos de placer, así como ciertas técnicas para su beneficio, aprovechando algunas propiedades de éstos (peso específico, propiedades magnéticas entre otras).

Mineral	Primaria	Secundaria
<u>Aluviones</u>		
Oro	Canalones con riffles.	Amalgamación
(dependiendo del tamaño de los fragmentos)	Jigs o pulsadoras	Cianuración
Platino.....	Canalones o jigs	Mesas Wilfley
<u>Arenas de Playa</u>		
Magnetita.....	Separación magnética (vía húmeda) tambor.	Separación magnética - (alta intensidad)
Ilmenita.....	Espiral Humphrey Mesas concentradoras	Separación magnética (alta densidad)
Otros.....	Monitores hidráulicos (casiterita, granate, oro, plata, etc..)	Mesas vibradoras
Rutilo.....	Conos Reichert	Mesas Concentradoras.

Fuente: Cummins & Given, 1973

Es importante señalar que para fines de este trabajo los métodos de concentración se centrarán en el tratamiento de arenas de playa, ya que es en este tipo de depósitos donde generalmente se encuentran los minerales que contienen titanio. Como lo muestra el cuadro anterior, para el beneficio de minerales de titanio se requerirá de una concentración primaria (en el caso de la ilmenita (FeO.TiO_2), utilizando espirales Humphrey, complementando la limpia del mineral con una concentración magnética de alta intensidad para separar los minerales de interés (ilmenita); y en el caso del rutilo (TiO_2), se beneficiará utilizando los conos Reichert en combinación con mesas concentradoras.

CONCENTRACION GRAVIMETRICA.

El método de concentración gravimétrica consiste en la separación de los valores minerales de su matriz, aprovechando la diferencia de pesos específicos en un medio separador, con una viscosidad y densidad determinadas. También influyen en esta separación la forma y tamaño de las partículas, ya que la separación resultará más fácil si se lleva un control de estas variables, ya que se tendrá una velocidad de asentamiento mayor cuando éstas tienden a una forma esférica que cuando tienen forma laminar, sin olvidar también el tomar en cuenta su peso específico.

Los medios separadores en la concentración gravimétrica se clasifican en dos tipos: flujos en movimiento y medios estacionarios. En el presente estudio se analizarán los flujos en movimiento, que consisten en separar las partículas tomando en cuenta la velocidad y trayectoria a la cual se mueven éstas en el medio separador.

A esta suspensión de sólidos se le da el nombre de "medio pesado", pudiendo estar constituidos por ferromagnesianos, arena de cuarzo, arcillas, pizarras, magnetitas, etc..

ESPIRAL HUMPHREY.

Es un aparato de concentración gravimétrica en forma espiral, de diámetro constante en su fondo curvo (Ver Figura V.12). Su ciclo de operación consiste en alimentar una pulpa (previamente deslamada) que contenga minerales o metales de diferente gravedad específica, refiriéndose en particular a las arenas de playa, en donde los materiales más ligeros, que son los que más rápidamente entran en suspensión por efecto del impulso del agua, adquieren una velocidad tangencial sensiblemente mayor que la de los materiales pesados no suspendidos; esto provoca, que el material ligero, en suspensión, ascienda a través de la orilla exterior del espiral por efecto de la fuerza tangencial del flujo; mientras que el material pesado avanza hacia la parte más baja del lavador curvo (b). Unos separadores removibles y ajustables guían el flujo de concentrados a su respectiva salida de descarga.

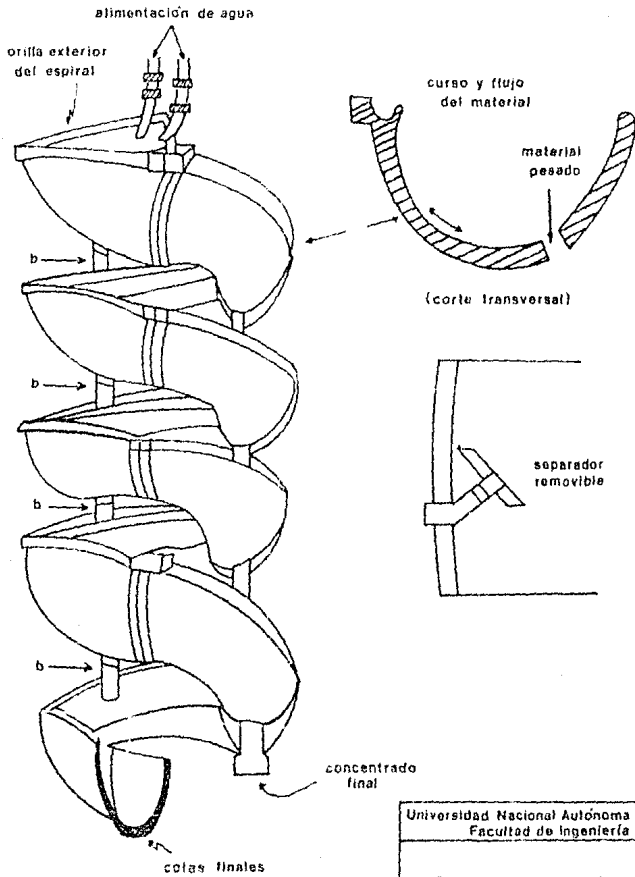
El agua de lavado es decantada por medio de pequeños tubos sujetados a lo largo del espiral, en lugares estratégicos para sacar la cantidad de agua deseada en un determinado lugar.

El volumen de la corriente disminuye hacia el extremo inferior del espiral; por lo que la fuerza de arrastre del flujo o tirante de agua disminuye, lo que permite el asentamiento de los medios en la parte inferior de la canal.

Las colas descargan al final del espiral.

Los espirales Humphrey son utilizados para hacer separacio-

Espiral Humphrey



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Concentración Gravimétrica

Figura NO
V.12

Tesis Profesional
1980

nes burdas, por lo que no producen concentrados, sino simplemente son preconcentradores.

CONOS REICHERT.

Desde hace muchos años Australia ha sido uno de los productores más grandes de rutilo (TiO_2) y zirconio, debido a los minerales que recupera de sus playas orientales desde Queensland, hasta New South Wales. Las operaciones antiguas que procesaban depósitos de alta ley, se llevaban a cabo esencialmente con mesas concentradoras. Sin embargo, al correr de los años las leyes fueron disminuyendo, y las mesas concentradoras tuvieron que ser reemplazadas por equipos que permitieran una mayor capacidad de procesamiento; entonces aparecieron los espirales. Cuando las plantas requirieron aún más capacidad y mayor movilidad se inventaron los conos Reichert.

Estos aparatos tienen la ventaja de que no hay rozamiento de partículas contra ninguna pared, puesto que en estos conos el lecho es circular; no tiene partes móviles y dispone de capacidades de hasta 80 ton/hr.

La aplicación de los conos en los procesos de concentración gravimétrica, es de gran trascendencia, ya que un solo juego de éstos puede efectuar el trabajo de 50 mesas concentradoras.

Es importante señalar que estos aparatos al igual que los espirales Humphrey, no producen concentrados finales de ley comercial, sólo son preconcentradores que originan materiales de mucho mayor ley que el de las cabezas originales.

OPERACION Y DESCRIPCION.

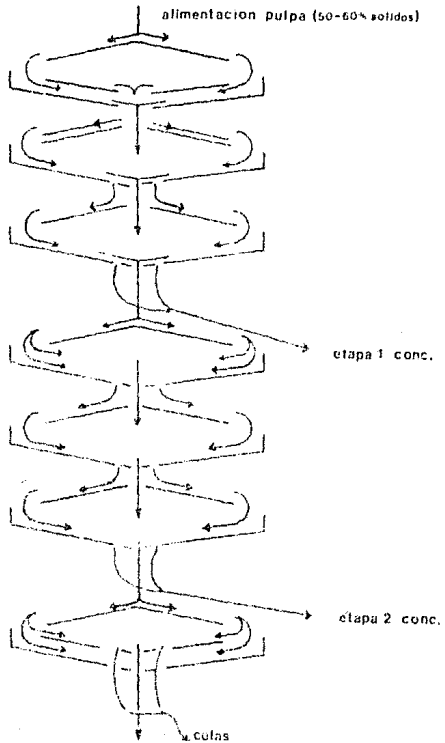
Una unidad, está formada de varios conos apilados unos sobre otros (en la figura V.13 ilustrativa se presenta una unidad de 7 conos apilados), para permitir varias etapas de concentración dentro de la misma estructura. Los conos tienen un diámetro de 2 metros y están fabricados de fibra de vidrio, re vestidos de una cubierta de hule para protegerlos del desgaste ya que el material que se maneja en estas unidades preconcentradoras es sumamente abrasivo.

La unidad completa se instala sobre una estructura circular construida de tubos de acero. La instalación completa pesa aproximadamente una tonelada y tiene una altura de 7 m.

Los conos colocados con el ápice o punta hacia arriba, sirven solamente para recibir el flujo de pulpa (alimentación), y distribuirlo uniformemente a los conos concentradores, los cuales se encuentran con el ápice hacia abajo.

La carga se alimenta en forma de pulpa (previamente deslamada), con un contenido de sólidos entre el 50 y 60%; se alimenta por gravedad a un distribuidor circular de hule colocado en el primer cono (con el ápice hacia arriba), que distribuye la carga uniformemente por medio de un repartidor anular de dos vías en su periferia, el cual a su vez divide la carga pasándola a los dos conos inferiores, aprovechando el principio de concentración gravimétrica y velocidad tangencial que adquiere el material al entrar en contacto con la superficie de los conos, completándose la etapa de concentración primaria. Finalmente, las colas de los segundos conos primarios pasan a la última sección de conos dobles que producen un concentrado agotativo.

Cono Concentrador Reichert.



(Configuración interna)

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Concentración Geométrica

Figura N°
V.13

Trabajo Profesional
1990

CONCENTRACION MAGNETICA.

La separación magnética de los minerales, es aquella que utiliza la fuerza de un campo magnético, en combinación con alguna otra fuerza (gravedad, fricción, etc.), para producir movimientos diferenciales de las partículas de mineral a través de un campo magnético.

Dado que en párrafos anteriores se analizó la concentración de depósitos de placer refiriéndose a los minerales de titanio; éstos después de ser precocentrados (en el caso de la ilmenita), requieren de una segunda etapa agotativa, utilizando la concentración magnética, que aprovecha la atractividad magnética relativa de los minerales, para obtener un concentrado de mayor ley.

Fundamentalmente, las diferencias en permeabilidad magnética de los minerales, constituye la base para la separación; pero prácticamente la separación está influenciada por la gravedad específica, el tamaño de partícula, pureza de los minerales y por atributos mecánicos y eléctricos del separador.

Todos los minerales tienen un cierto grado de atracción por los magnetos, y éstos son clasificados como fuertemente magnéticos, débilmente magnéticos y no-magnéticos. Es obvio pensar que la separación tendrá mayor éxito en minerales fuertemente magnéticos, que tenderán a adherirse fácilmente a el magneto, por acción de su campo. Por ejemplo la magnetita, franklinita ilmenita, etc...

A continuación se muestra la tabla V.2 con la clasificación de los minerales de acuerdo a su susceptibilidad magnética.

TABLA V.2

ATRACTIVIDAD MAGNETICA, RELATIVA DE LOS MINERALES.

	Substancia	Atractividad relativa
Fuertemente magnéticos	Fierro (tomado como base).....	100.00
	Magnetita	40.18
	Franklinita.....	35.38
	Ilmenita	24.70
	Pirrotita	16.69
Débilmente magnéticos	Siderita	6.69
	Hematita	1.32
	Zircón	1.01
	Limonita	0.84
	Corundo	0.83
	Pirolusita	0.71
	Manganita	0.52
Calamina	0.51	
No magnéticos	Granate	0.40
	Cuarzo	0.37
	Rutilo	0.37
	Cerusita	0.30
	Cerargirita	0.28
	Argentita	0.27
	Oropimente	0.24
	Pirita	0.23
	Esfalerita	0.23
	Molibdenita	0.23
	Dolomita	0.22
	Bornita	0.22
	Apatita	0.21
	Wilemita	0.21
	Tetraedrita	0.21
	Talco	0.15
	Arsenopirita	0.15
	Magnesita	0.15
	Calcopirita	0.14
	Fluorita	0.11
	Zincita	0.10
	Celestita	0.10
	Cinabrio	0.10
Calcocita	0.09	
Cuprita	0.08	
Galena	0.04	
Calcita	0.03	
Whiterita	0.02	

SEPARADORES MAGNETICOS.

Los diversos tipos de separadores magnéticos, están clasifi-
cados dependiendo de la forma en que la superficie colectora -
atrae las partículas magnéticas; así se tienen dos grandes gru-
pos:

- i) Separadores del tipo retenedor o de magneto permanente.
- ii) Separadores del tipo recogedor.

En el primer grupo el material de alimentación es deposita-
do sobre la superficie colectora, y en el segundo grupo la su-
perficie colectora debe atraer las partículas desde un flujo en
movimiento. En algunos separadores el banco de magnetos perma-
nece fijo y la superficie colectora se encuentra en movimiento;
en el otro tipo de separadores el banco de magnetos se encuen-
tra en movimiento y la superficie colectora puede encontrarse
fija o en movimiento, en sentido contrario a los magnetos.

Frecuentemente en la separación de minerales, hay fuerzas -
no-magnéticas que actúan en favor o en contra de la fuerza mag-
nética; estas fuerzas son entre otras:

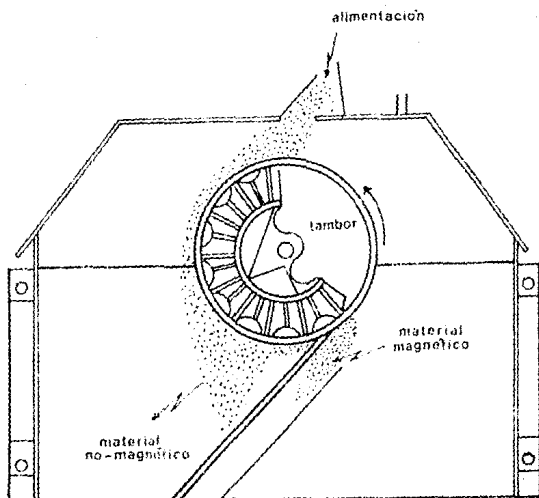
- i) Gravedad
- ii) Fricción
- iii) Fuerza electrostática.

Los separadores magnéticos en medios acuosos o húmedos, en
general, no poseen una atracción tan fuerte como los que se en-
cuentran en medios secos; especialmente cuando las partículas
tienen que ser sacadas del agua, ya que requieren de una fuer-
za adicional para vencer el efecto de tensión superficial del
líquido.

Los materiales finos son más fácilmente separados en un medio húmedo, ya que se tiene un producto mucho más limpio, (pe-se a la tensión superficial del líquido), que en medios secos; esto es debido a que el agua dispersa las partículas, tanto que una partícula magnética recubierta por una capa de material estéril no es atraída.

A continuación se muestran en las figuras (V.14) y (V.15) - ejemplos de separadores magnéticos.

Separador de tambor con Magneto estacionario

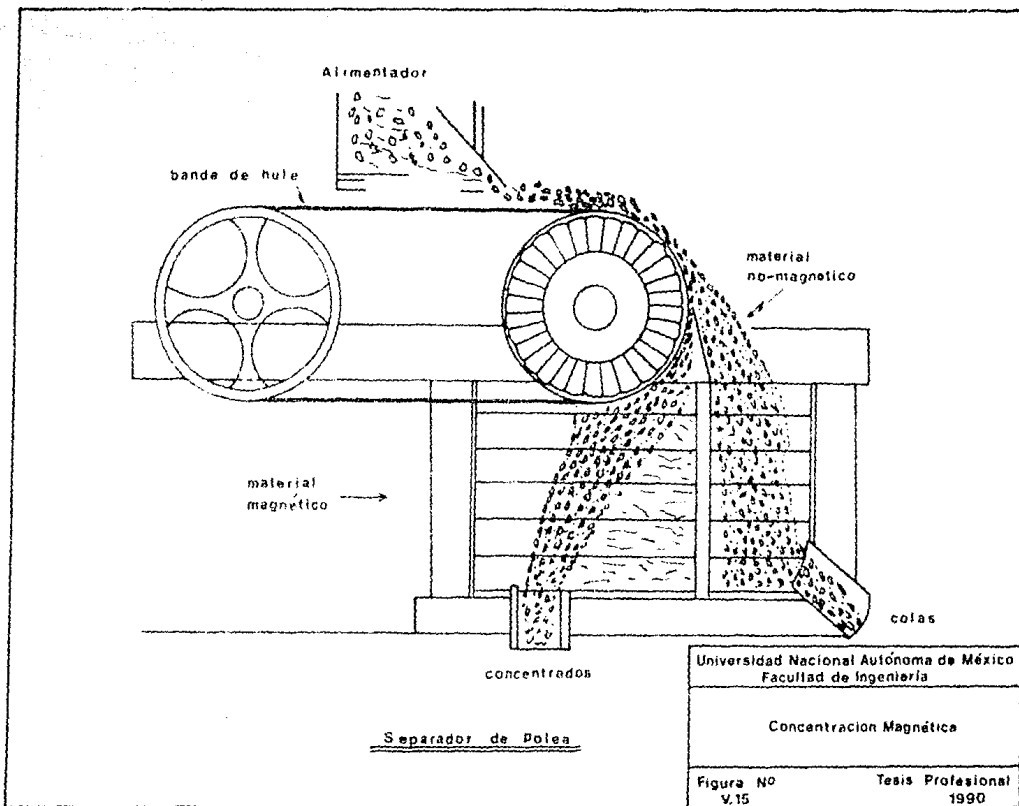


Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Concentración Magnética

Figura NO
V.14

Tesis Profesional
1950



CAPITULO VI

REVISION DE PROCESOS METALURGICOS

VI.1 MINERALES Y PRODUCTOS DE TITANIO

VI.2 CONCENTRACION Y LIXIVIACION DE MINERALES DE TITANIO

VI.3 OBTENCION DEL TITANIO METALICO.

VI.1 MINERALES Y PRODUCTOS DE TITANIO.

La ilmenita de los depósitos de roca y arena, contiene de 35 a 55% de TiO_2 y ocasionalmente puede presentar el 60% de TiO_2 . Es el principal mineral comercial de titanio que tiene una composición teórica de 52.3% de TiO_2 y 47.5% de FeO ($FeTiO_3$ o $FeO.TiO_2$).

El principal uso de la ilmenita es para la obtención del bióxido de titanio o "pigmento blanco", sus contenidos de cromo y pentóxido de vanadio no deben exceder de 0.2% como máximo ya que éstos son insolubles en la obtención del tetracloruro de titanio ($TiCl_4$) para obtener el producto metálico.

El rutilo es esencialmente cristalino y la mayor parte se extrae de depósitos en arenas de playa. La ilmenita es más abundante que el rutilo, sin embargo, el rutilo tiene mayor valor comercial por su alto contenido de titanio.

En 1983, alrededor del 40 al 50% de la ilmenita obtenida mundialmente provino de depósitos rocosos (asociados con rocas tipo anortosítico, nelsonítico y esquistos).

Para eliminar el contenido de hierro de la ilmenita y obtener un producto denominado "rutilo sintético", se sigue un proceso de oxidación-reducción y una lixiviación o disolución del hierro. Los concentrados de "rutilo sintético" al final del proceso contienen un promedio del 95% de TiO_2 . El ácido clorhídrico se usa principalmente como reactivo lixivante.

El leucóxeno es un mineral amorfo de TiO_2 finamente cristalino y formado por alteraciones variadas. Su contenido de dióxido de titanio depende del grado de alteración. Por ejemplo, Australia produce dos grandes concentrados de leucóxeno, con

contenidos que varían de 71 a poco más del 91% de TiO_2 .

El tetracloruro de titanio ($TiCl_4$) es un líquido volátil producido por la cloruración de minerales de titanio, útil en la manufactura de pigmentos y para la obtención de titanio metálico.

Las escorias de titanio, se producen fundiendo una mezcla de carbón y materiales que contienen titanio (generalmente ilmenita), en un horno eléctrico. Las escorias para que sean comercializadas deben contener entre 70 y 85% de TiO_2 .

La esponja de titanio, denominada así por su aspecto, es un producto metálico obtenido por la reducción del tetracloruro de titanio, ya sea con magnesio o sodio, (proceso Kroll o Hunter respectivamente). El tratamiento de la esponja de titanio consiste en someter ésta a fusión en hornos de arco eléctrico en presencia de una atmósfera inerte de helio o argón.

El blanco de titanio es la pintura mineral de más alta calidad que existe; se trata de un dióxido de titanio (TiO_2), pulverizado que supera la consistencia del blanco de plomo y poder cubriente del blanco de zinc. También el TiO_2 se usa, por ejemplo, como blanqueador de esmaltes, y para proteger piezas metálicas contra la corrosión atmosférica (intemperismo), sin embargo, hay que tener cuidado en seleccionar el tipo de "dióxido de titanio" de acuerdo a las necesidades y fines que se persigan; ya que se tienen tres variedades de TiO_2 que son: Anatasa, Brookita y Rutilo, que sólo se diferencian por el tipo de estructura y la colocación de los átomos dentro de la red cristalina.

Las tres formas cristalinas del dióxido de titanio se encuentran en la naturaleza, pero sólo la anatasa y el rutilo se pro

ducen industrialmente. Por ejemplo, dentro de la tecnología - del esmalte son importantes:

- i) Rutilo.- Que se forma a más de 900°C.
- ii) Anatasa.- Que es estable por debajo de los 900°C.

El rutilo tiene la propiedad de poder contener iones extraños en su estructura cristalina, que tiñen fuertemente la pintura. Además, con la luz artificial tiene un tono ligeramente amarillento. Sin embargo la anatasa no admite iones colorantes y es totalmente blanco. En los procesos de esmaltes se debe tener mucho cuidado de que sólo se forme dióxido de titanio tipo anatasa, de lo contrario se tendrá una gran pérdida de producción debido a que los acabados superficiales son de mala calidad.

La anatasa y el rutilo se caracterizan por sus altos índices de refracción, que son la causa de su gran opacidad y su alto poder de recubrimiento, en relación con otros pigmentos blancos.

A continuación se muestra en la tabla VI.1 la comparación de la composición química del rutilo y la anatasa.

TABLA VI.1

Compuesto	Rutilo (%)	Anatasa (%)
TiO ₂	96.0	91.0
Fe ₂ O ₃	1.2	2.0
FeO	---	---
CaO	0.04	0.40
MgO	0.20	0.50
Al ₂ O ₃	1.00	2.00
Mn, V, etc..	3.80	1.60
Tierras raras	---	0.40
Nb ₂ O ₃)	---	1.03

Fuente: E. Mining Journal, 1982

VI.2 CONCENTRACION Y LIXIVIACION DE MINERALES DE TITANIO.

Los depósitos de arena con altos contenidos de titanio de N. Jersey en Estado Unidos, son explotados por dragas o palas mecánicas, en los que se han adaptado plantas portátiles que efectúan una primera clasificación. Los concentrados son enviados por camión o por tuberías a la planta de beneficio, en donde, aprovechando el principio de concentración gravimétrica (mencionado en el capítulo V), se utilizan espirales Humphrey, y son sometidos a varias limpiezas.

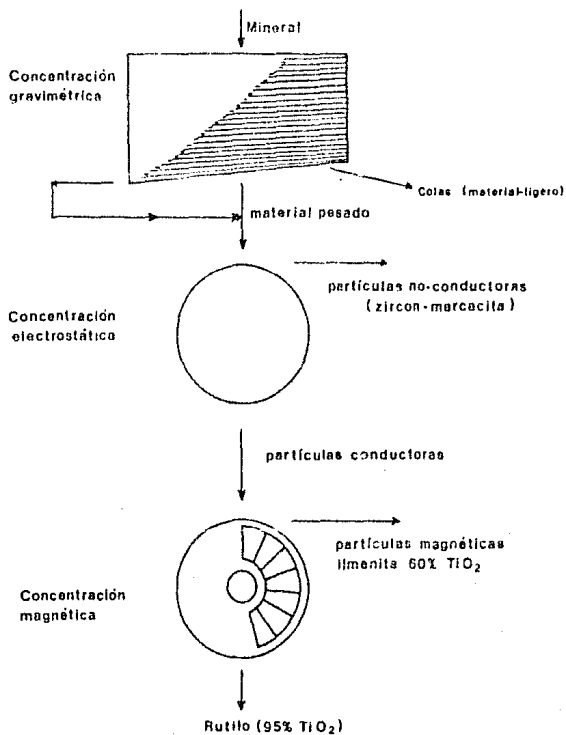
El producto es secado y sujeto a una separación electrostática obteniéndose fracciones conductoras (mineral de titanio) y no conductoras (zircón, marcasita y estauroлита).

La fracción del mineral comercial (titanio), es separada en máquinas de inducción magnética, donde se obtiene un producto ligeramente magnético (ilmenita con 60% de TiO_2 aproximadamente) y un producto no magnético (rutilo con 95% de TiO_2 aproximadamente).

En las figuras VI.1 y VI.2, se muestra diagramáticamente el proceso general para beneficiar minerales de titanio contenidos en arenas.

La explotación de la ilmenita contenida en depósitos de roca es generalmente a cielo abierto. Primeramente el mineral se pasa por una etapa de trituración, utilizando quebradoras de quijada y de cono; y por una etapa de molienda, para obtener un tamaño de liberación del mineral comercial de -28 mallas. La fracción magnética se separa en rotores magnéticos de baja intensidad, y la fracción no magnética es clasificada y concentrada en mesas Wilfley, espirales Humphrey o en conos Reichter.

Concentración de minerales de titanio
contenidos en arenas



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Beneficio en Arenas

Figura No.
VI.1

Tesis Profesional
Julio 1990

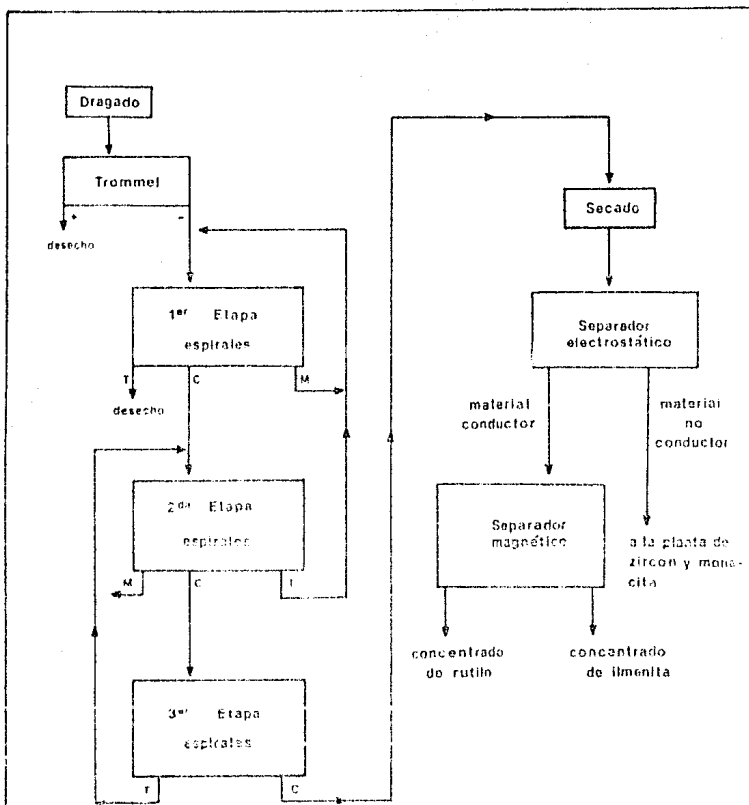


Diagrama de flujo en la recuperación de ilmenita y rutilo

(Humphreys Gold Co. 1967)

donde
 C = concentrado
 M = medios
 T = telas

Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería	
Concentración gravimétrica y magnética	
Figura No. VI.2	Tesis Profesional Julio 1990

La fracción magnética obtenida es sinterizada para alimentarse al horno.

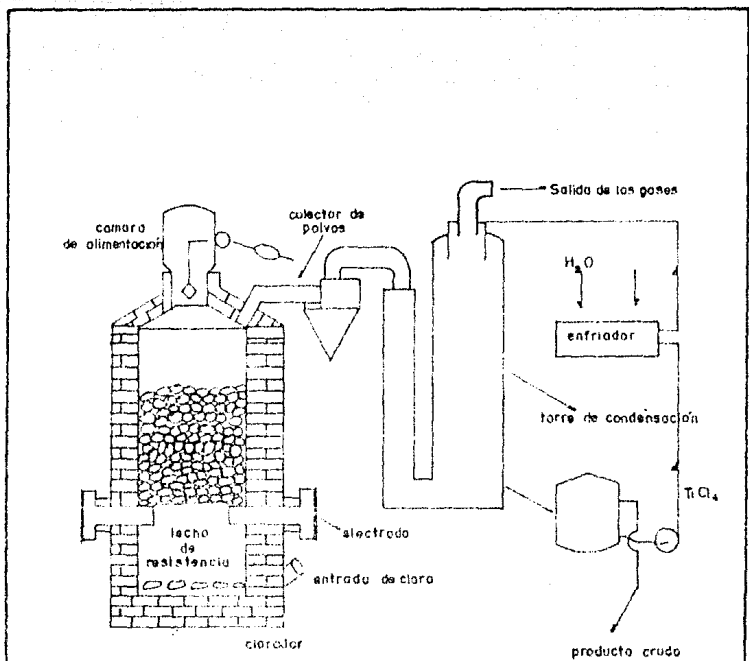
Existen varias técnicas para la producción de "rutilo sintético" a partir de la ilmenita. Dos de las cuales involucran reducción parcial o total del estado ferroso del fierro ilmenítico al estado metálico, y luego separar el fierro ilmenítico por acción química líquida, para producir un rutilo sintético de 90 a 96% de TiO_2 .

El fierro ilmenítico también puede ser separado por cloración selectiva o parcial en un clorador de lecho fluidizado, dejando una matriz enriquecida de TiO_2 , u obtener $TiCl_4$.

Los cloradores o cloradores son cilindros de acero de gran altura, (Ver figura VI.3) revestidos de ladrillo refractario, con dimensiones que van de 20 pies de altura por 13 pies de diámetro (6.1 x 3.96 m.). Los electrodos son introducidos aproximadamente a 6 pies del fondo del horno; y el tubo de admisión del cloro penetra a través del casco, por el fondo del recipiente, por debajo de los bloques de resistencia del carbón.

La carga se efectúa en forma intermitente a través de una tolva sellada situada en la parte superior del clorador; un poco abajo y a un lado de la abertura de carga, hay otra abertura por donde salen los gases de reacción. La capacidad de cloración del aparato es de 40 a 50 lb de $TiCl_4$ por hora y por pie cuadrado de área del lecho del clorador.

El $TiCl_4$ sale del clorador en forma de gas; la mayor parte de los sólidos en polvo que no reaccionaron (ilmenita y carbón), se separan mediante un colector de polvos ciclónicos. El gas separado se conduce a un condensador de tetracloruro de titanio, formado de una torre vertical en la cual se rocía $TiCl_4$



(C. Burroughs 1990)

Universidad Nacional Autónoma de México	
Facultad de Ingeniería	
Cloración del dióxido de titanio	
Figura No. VI.3	Tesis Profesional Julio 1990

líquido para enfriar el gas de tetracloruro de titanio del clorador para extraerlo en forma líquida.

El $TiCl_4$ sale del clorador condensado y se conduce a un tanque de sedimentación, en el cual se separan también los lodos y materias insolubles por medio de rocío de $TiCl_4$.

En virtud de que el fierro presenta una mayor afinidad por el cloro, que el titanio, éste se remueve en el clorador de lecho fluidizado; es decir, que la mayoría de las impurezas metálicas que lleva la ilmenita o el rutilo se cloran fácilmente - al igual que el titanio, formándose cloruro de hierro, oxiclорuro de vanadio ($VOCl_3$), tetracloruro de silicio, tetracloruro de estaño y otros cloruros metálicos.

Todos estos cloruros son insolubles en el tetracloruro de titanio, y como tienen puntos de ebullición más altos, pueden separarse por "destilación fraccionada" con bastante facilidad. El oxiclорuro de vanadio es un caso especial, debido a que éste hierve a $127^\circ C$, temperatura que está muy próxima al punto de ebullición del $TiCl_4$ ($136.4^\circ C$); por lo que el $VOCl_3$ se precipita químicamente en forma selectiva por medio de ácido sulfhídrico, separándose así con éxito, en gran escala.

La pureza del $TiCl_4$ producido es del orden de 99.98%, para su manejo se almacena en recipientes de acero en presencia de helio o argón, gases que evitan la hidrólisis o la adsorción del oxígeno o del nitrógeno atmosférico.

Este proceso hasta 1984 no había avanzado más allá de la etapa piloto; la razón principal es que en el presente no se cuenta con la suficiente información activa de cloruración parcial de la ilmenita; además, la disposición de grandes cantidades de cloruro férrico como producto de desecho y que hasta la fe-

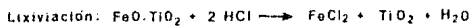
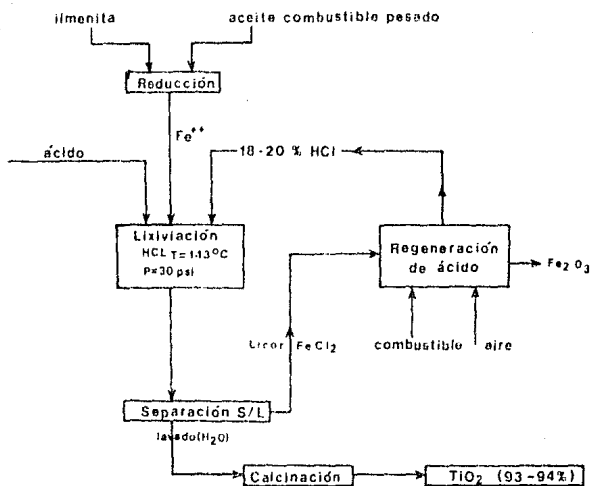
cha no se le ha encontrado una aplicación útil.

El proceso usado desde 1958 en las principales plantas de los Estados Unidos es el de cloruración, donde se produce el tetracloruro de titanio ($TiCl_4$), el cual es purificado y oxidado con aire u oxígeno para formar bióxido de titanio (TiO_2).

Un segundo proceso para la obtención del $TiCl_4$, es la reducción térmica o escoriado; este método consiste en la fusión del mineral de titanio en un horno de arco eléctrico, donde se obtiene una escoria de titanio, la cual es molida en presencia de ácido sulfúrico; por otra parte el hierro presente es reducido con chatarra de hierro, por lo que el sulfato de hierro formado queda en estado ferroso. El titanio es disuelto en agua como sulfato básico de titanio y después de una cristalización selectiva del sulfato ferroso, es precipitado por hidrólisis, filtrado, calcinado a óxido y finalmente molido a suficiente finura para usarse en pigmentos.

PROCESO KERR-MC GEE.

En este proceso se alimenta mineral de ilmenita con un contenido de 54 a 60% de TiO_2 en un horno rotatorio, calentando con aceite combustible pesado, a una temperatura de $900^\circ C$, bajo condiciones reductoras. La ilmenita reducida es entonces procesada en "batch" (campanas), con ácido clorhídrico en una concentración del 18 a 20%, a una temperatura de $143^\circ C$ y a una presión de 2.38 atmósferas, en digestores rotatorios de bolas, de 6.096 metros de diámetro. En el digestor se convierte el óxido ferroso de la ilmenita reducida, a cloruro ferroso soluble, dejando intacta la porción de rutilo (TiO_2) de la ilmenita. El residuo de TiO_2 es lavado con agua y calcinado a $870^\circ C$.



Reducción: al estado ferroso (+2)

(Bancroft Co. U.S. 1974)

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Proceso Kerr - Mc Gee

Figura No.
VI.4

Tesis Profesional
Julio 1990

agitador en presencia de una solución catalizada de cloruro de amonio. Se procede a seguir con una aereación, utilizando grandes volúmenes de aire. El oxígeno del aire causa la oxidación del hierro metálico y éste precipita fuera del TiO_2 remanente, en la forma de un óxido de hierro sucio, el cual es separado del dióxido de titanio por hidrociclones.

El producto final es secado y almacenado para su respectiva distribución. El rutilo sintético (TiO_2) obtenido normalmente, tiene un contenido de 91% de dióxido de titanio.

Un alto grado de rutilo sintético es obtenido por la adición de un 5% de ácido sulfúrico, el cual remueve las impurezas tales como calcio, manganeso y fosfato, obteniéndose finalmente un rutilo de 92.5%.

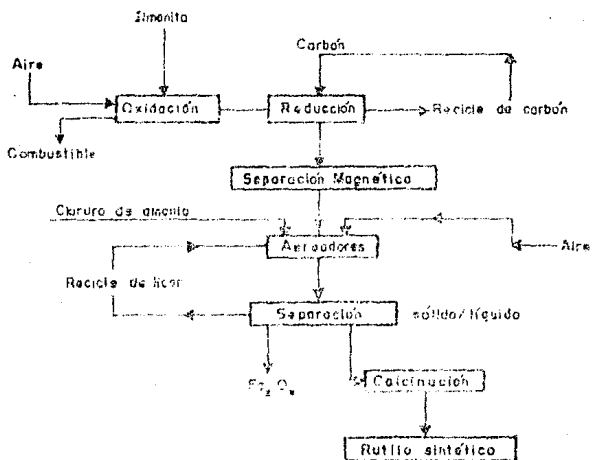
A continuación se ilustra en la fig. VI.5 el proceso Becher.

Los productores australianos de rutilo (Associated Minerals Consolidated LTD) utilizando el proceso Becher, alcanzaron un record de producción de rutilo de 300,000 toneladas largas en el año de 1979.

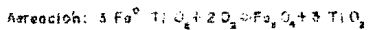
Existen otros procesos para el beneficio del mineral de ilmenita, como son:

i) K.N Han, T. Rubcuminara y Fuerstenau.- Realizaron un estudio de la velocidad de disolución de la ilmenita, con H_2SO_4 a concentraciones de 4.7 a 18.8 moles, en un rango de 88 a 115°C.

ii) Imahashi y Takamatsu.- Investigaron la lixiviación de la ilmenita y rutilo en un rango de temperatura de 40 a 20°C, usando como medios lixiviantes ácido sulfúrico y ácido clorhídrico.



Reducción a hierro metálico (complet).



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Proceso Sacher

Figura No
VI.5

Trabajo Profesional
Julio 1990

iii) Proceso de carbonato de sodio.

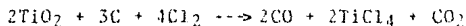
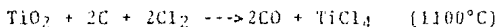
iv) Barton y Mc Connell.

v) Toromanoff y Habashi.

En la práctica para beneficiar los minerales de ilmenita se utiliza más comúnmente el proceso "Kerr-Mc Gee" y el proceso "Becher"; por lo que solamente se mencionaron los otros procesos existentes.

VI.3 OBTENCION DEL TITANIO METALICO.

Esencialmente, todo el titanio metálico producido en la actualidad se extrae de la reducción del tetracloruro de titanio ($TiCl_4$), ya sea con magnesio o sodio, el cual se obtiene por la cloración de los minerales de titanio (TiO_2) mezclados con carbón y cloro gaseoso, (en un clorador).



El hecho de que el tetracloruro de titanio sea un líquido - que hierve a $136^\circ C$, permite la purificación por destilación - fraccionada.

En 1910, Hunter produjo pequeñas cantidades de metal dúctil mediante la reducción por el sodio del tetracloruro de titanio en una pequeña bomba construida para resistir la alta presión que se producía al calentar al rojo.

Las primeras tentativas realizadas para beneficiar el titanio de sus óxidos minerales fracasaron. Diversos investigadores, creyendo que habían aislado el titanio puro, caracteriza-

ron como tal el impuro que obtuvieron, creando con ello gran confusión y falsas nociones acerca de las propiedades de dicho metal.

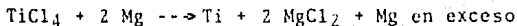
El dióxido de titanio (TiO_2), puede ser parcialmente reducido con carbón a altas temperaturas, pero el intento de completar la reducción, da como resultado un carburo.

Para la obtención del titanio metálico (esponja de titanio) se parte de la obtención del tetracloruro de titanio ($TiCl_4$) y ya sea mediante el proceso Kroll o el proceso Hunter se reduce el $TiCl_4$ a titanio metálico (esponja).

En 1940, Wilhelm F. Kroll obtuvo la patente de su método para reducir el tetracloruro de titanio con el metal magnesio a titanio metálico, a la presión atmosférica, en presencia de un gas noble, como el helio o el argón.

La razón de utilizar una atmósfera inerte al fundir el metal titanio es, que a altas temperaturas, éste tiende o tiene gran afinidad con el oxígeno, el nitrógeno, el carbono y el hidrógeno; y es capaz de retener cantidades limitadas de dichos elementos en solución sólida. Estos contaminantes se disuelven en los intersticios de la red cristalina sin reemplazar a los átomos de titanio. Pequeñas cantidades de estas impurezas, inferiores al 1%, hacen quebradizo e inútil el producto.

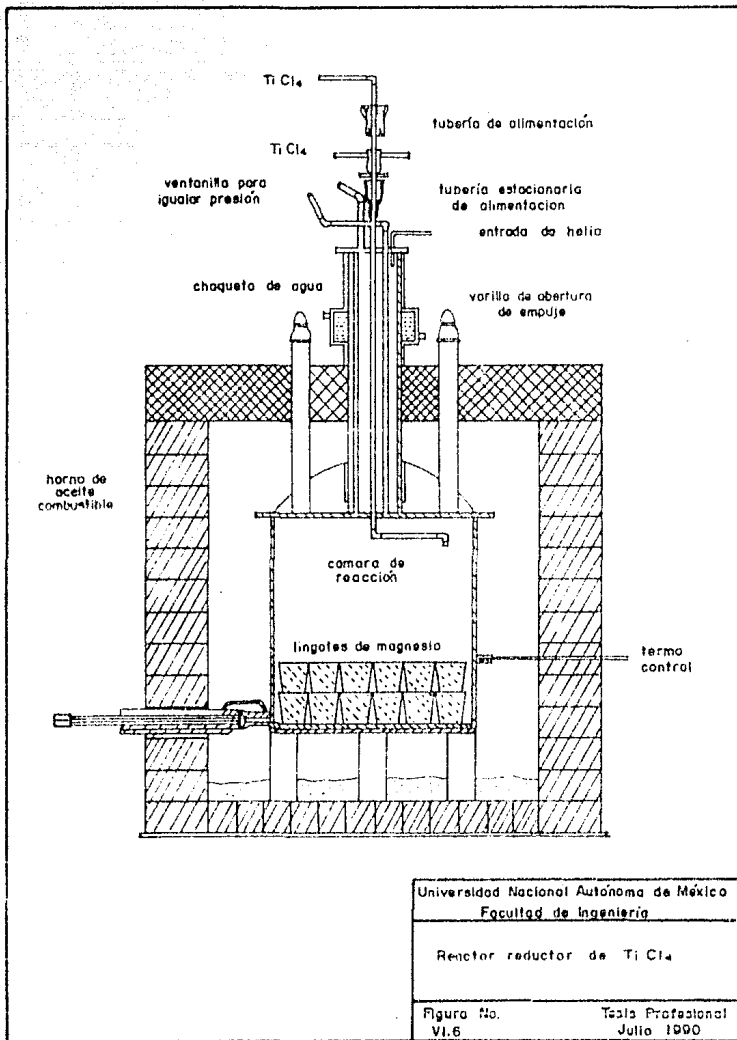
Proceso Kroll.- En este proceso se parte de un $TiCl_4$ obtenido previamente de una etapa de cloruración, para reducirlo a metal titanio, como ya se mencionó, en un recipiente de acero cerrado, en donde se efectúa la reacción, con una atmósfera inerte de helio o argón a un intervalo de temperatura promedio de 712 a 920°C. Dicha reacción se expresa de la siguiente forma:



La reacción de reducción con magnesio se efectúa en un recipiente de acero de forma cilíndrica (Ver figuras VI.6 y VI.7), que a menudo tiene fondo redondeado, y que pueden ser de diferente tamaño, desde unidades de 3 pies de altura por 2.5 pies de diámetro, que producen 250 libras de titanio metálico, hasta unidades de 9 pies de altura por 5 pies de diámetro que pueden producir hasta 3000 libras de metal. Se origina una reacción de corrosión despreciable a la temperatura de operación de la retorta entre el acero dulce del recipiente y el gas inerte (helio o argón); en consecuencia todo arrastre de hierro es muy pequeño. El problema es que el titanio reaccionará rápidamente con el óxido o escamas de hierro, siendo oxidados por éstos, y este óxido superficial se reduce a metal, llenando el recipiente con hidrógeno y calentando a temperaturas más altas que la del rojo vivo, para luego expulsar completamente el hidrógeno con helio o argón.

Se utilizan barras de magnesio o lingotes para la reacción con un 15 a 20% de exceso sobre el requerido teóricamente, se limpian y someten a un ataque químico en ácido clorhídrico, se secan y se colocan en el recipiente de reacción.

En la parte superior del recipiente, está soldada una caja de forma de domo (tapa), con dos agujeros de respiración a los cuales están conectados los tubos de entrada; entonces el recipiente se llena de helio o argón, se mueve y se baja en posición vertical a un horno calentado con gas o aceite. La caja se suelda en su posición. Una vez completado el proceso la soldadura se elimina con esmeril, para posteriormente abrir la retorta al término de la reacción.





Reactor reductor de $TiCl_4$
Proceso Kroll

(Mc Quillan & MC - 1956)

La reacción química que se produce es exotérmica, y la temperatura del reactor se controla por el régimen de adición de $TiCl_4$. En la práctica el intervalo de temperatura va de 712 a 920°C, siendo la temperatura mínima el punto de fusión del $MgCl_2$ (712°C). La temperatura máxima se alcanza y mantiene durante la última hora de la reacción (920°C). Se restringe o limita la temperatura máxima porque el titanio forma una aleación con el reactor de acero arriba de los 1000°C.

El segundo tubo de entrada que atraviesa la ceja o tapa, se utiliza para mantener la presión del gas inerte en el recipiente a un valor ligeramente mayor que la presión atmosférica. Una retorta de 3 pies por 2.5 pies que se carga con 350 libras de magnesio y 1070 libras de $TiCl_4$ líquido durante un período de 6 horas, produce 250 libras de titanio metálico.

El método menos complicado para tratar los productos de reacción, consiste en sacar el reactor del horno y dejarlo enfriar a la temperatura ambiente. Luego se desbasta a esmeril la soldadura de la ceja, se remueve ésta y se inclina el reactor sobre su lado. En esta posición la carga solidificada y fría se extrae con un mandril en un torno grande. El producto se alimenta a una quebradora de rodillos en la que se tritura a un tamaño de 1/4 a 1 pulgada.

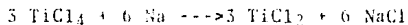
La mezcla triturada de titanio, cloruro de magnesio y magnesio en exceso, pasa a un tanque de lixiviación en el que con ácido clorhídrico diluido, se disuelve el cloruro de magnesio y el magnesio, dejando el titanio metálico presente en forma de esponja.

Este último método se explica con una serie de ilustraciones que a continuación aparecen tomados del boletín Bureau of

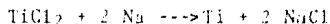
Mines 1955. H. Miller.

Proceso Hunter.- Comprende la reducción del $TiCl_4$ a titanio metálico utilizando sodio. El sodio es agregado al recipiente de reducción (cilindro de acero), en forma líquida; y el tetracloruro de titanio puede ser reducido en uno o varios pasos, - pero el cloruro de sodio es eliminado antes de la reducción final.

El metal obtenido es en forma de cristales o nódulos y es - purificado por lavados de agua; se seca, se reduce a briquetas y se funde, obteniéndose en forma de marmitas. Todo esto se - expresa con la siguiente reacción:



Estas marmitas se transportan enseguida a un horno en el que a $850^\circ C$, tiene lugar la segunda etapa de reducción, al reaccionar el dicloruro de titanio ($TiCl_2$) con el sodio, para producir finalmente esponja de titanio y cloruro de sodio. Expresado con la siguiente reacción:

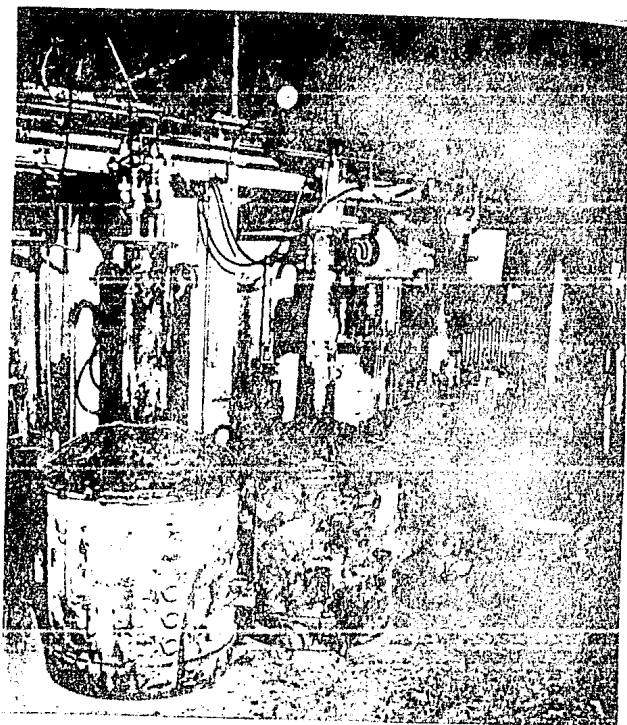


Para la obtención del titanio en forma de esponja, se procede al igual que en el proceso Kroll con una lixiviación utilizando ácido clorhídrico diluido para disolver el cloruro de sodio; el cual después de lavarlo con agua, se seca. La esponja de titanio se convierte a briquetas y se funde al vacío para vaciarla en lingoteras.



Colocación de los lingotes de MgO dentro del reactor.

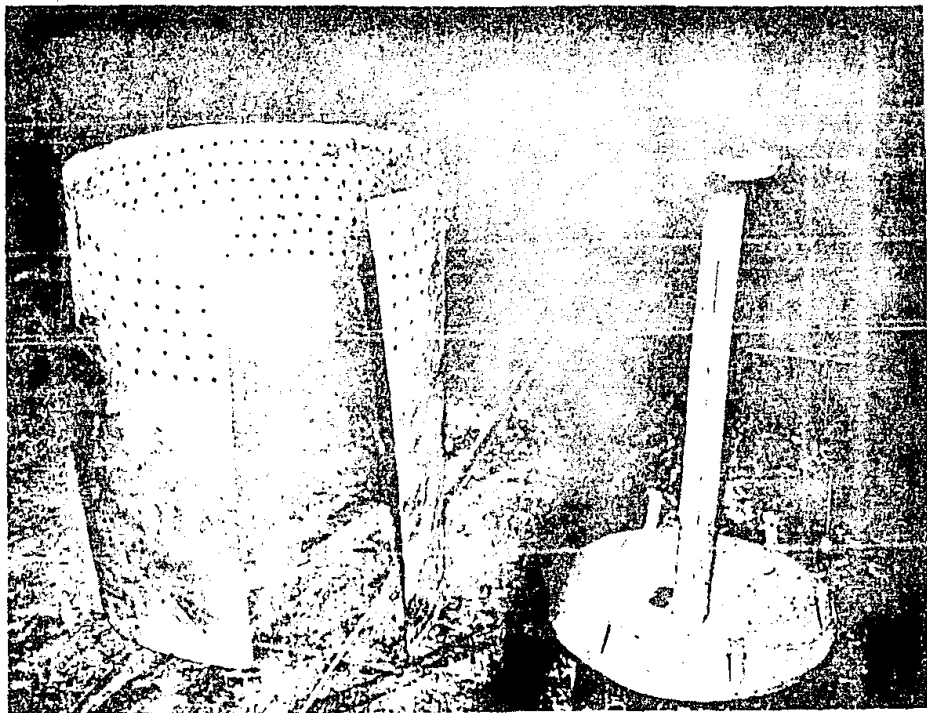
(H. Miller 1955)



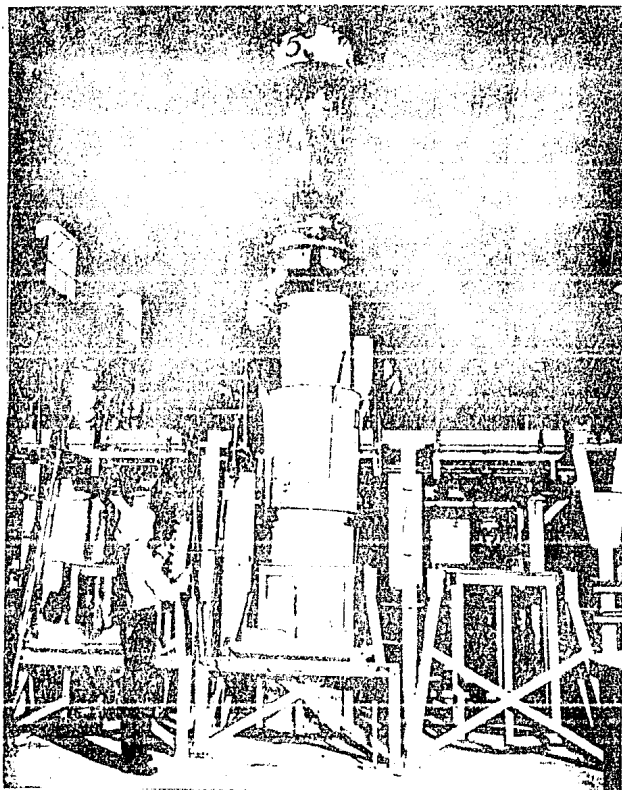
Serie de crucibles listos para introducirse al horno (320°C).



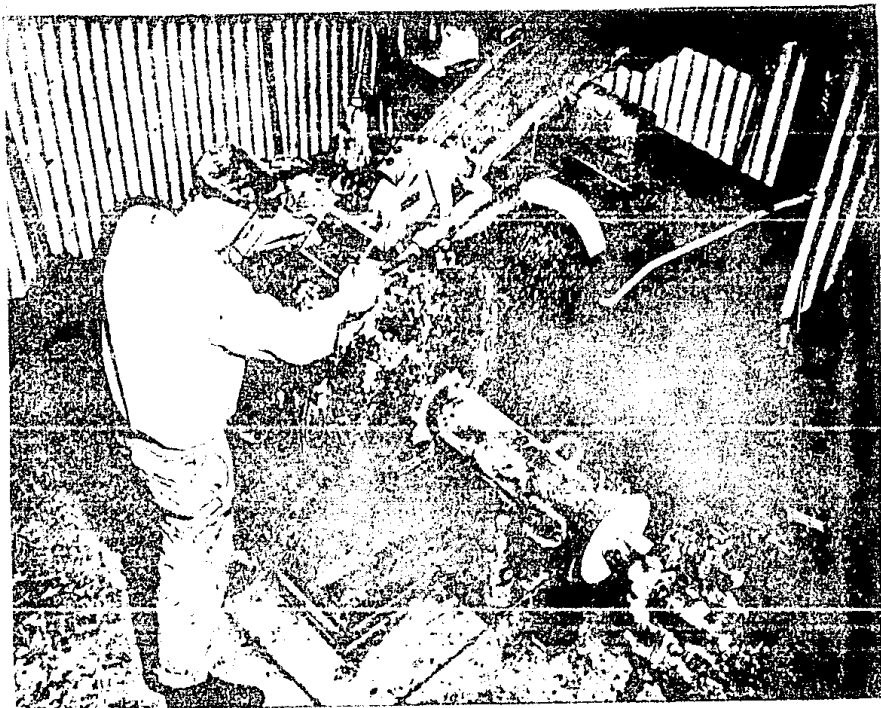
Soldado de la tapa o capo del reactor



Componentes internos del reactor.



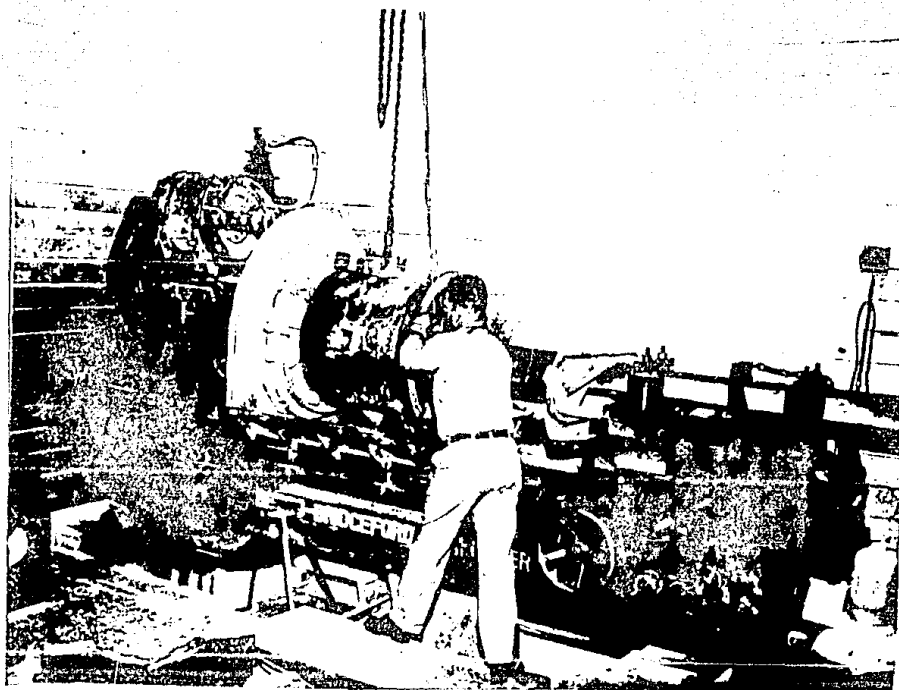
Ensamble de los componentes internos del reactor.



Eliminación de la soldadura de la caja
con esmeril



Vista interior del reactor que muestra el titanio reducido



Reactor montado sobre el torno



Aspecto final de la esponja de
titanio

DESCRIPCION DEL DIAGRAMA DE FLUJO. (Ejemplo)

Compañía de titanio brasileño CVRD (Compañía Valle de Rio-Doce), que procesa un mineral de TiO_2 de origen secundario asociado a peridotitas, piroxenitas, dunitas, sienitas y carbonatitas y que aflora en superficie. Presenta una ley o contenido de 20 a 25% de TiO_2 y un tonelaje estimado en un millón de toneladas métricas.

El diagrama de flujo muestra el beneficio del mineral y lo divide en cinco etapas en donde se van eliminando: el fierro, fosfuros, calcio, magnesio, y otras impurezas como tierras raras.

Etapas I.- El curso del mineral comienza con la extracción de éste (de su depósito mineral), y la descarga en una criba vibratoria, donde es clasificado en dos tamaños. El mineral, que pasa a través de la criba está a un tamaño de menos de 6 mm. El mineral de mayor tamaño se recircula en circuito, pasando a través de un molino de martillos, que equivaldría a una etapa de trituración.

El mineral de tamaño menor a 6 mm, es lavado, y mediante un clasificador en espiral se separan las arenas del material más grueso. Las arenas son bombeadas a un separador magnético de baja intensidad, para desechar la magnetita en un área de almacenaje.

La fracción no magnética se mezcla y clasifica nuevamente para un tratamiento posterior. En esta etapa, la fracción no magnética tiene un grado de 56% de TiO_2 .

Etapas 2.- El material mezclado, en pulpa, es alimentado a una criba vibratoria, que funciona en circuito cerrado con un

molino de barras que lo pulveriza (remolienda). El objeto de pulverizar no es otra cosa que liberar la magnetita que no se pudo desechar en la etapa anterior, para seguir con una separación magnética de baja intensidad. La fracción no magnética es lavada otra vez y pasada por una criba, y los sólidos son secados a un 17% de humedad por medio de un filtro de campana. Se obtiene la torta del filtro de campana con un promedio de al rededor del 64% de TiO_2 .

Etapa 3.- Inmediatamente después de obtener un producto filtrado, éste se pasa por una calcinación. El mineral se caracteriza por tener una estructura microcristalina, la cual está cementada por limonita e hidróxido férrico. Para la calcinación se utiliza un reactor de lecho fluido que maneja una reacción química combinada con agua.

Inmediatamente después se continúa con una tostación reductora, al caer en chorro o cascada el material sobre la cama fluida del reactor, utilizando gas de un generador de carbón. Tras de provocar microexplosiones durante la tostación de los granos de mineral, se crean poros en la estructura granular y se eliminan las impurezas (hidróxido férrico). En esta etapa se obtiene un grado de concentración arriba del 70% de TiO_2 .

Etapa 4.- El producto reducido y calcinado, es nuevamente concentrado por un sistema de baja y media intensidad magnética. El separador magnético arrastra el material que sufrió reducción, generalmente magnetitas contenidas aun en el concentrado.

Un separador electrostático, de polvos, de alta tensión elimina algunos de los silicatos, apatita y otras impurezas mine-

rales. Al finalizar esta etapa, el producto ha alcanzado una pureza del 80 a 82% de TiO_2 .

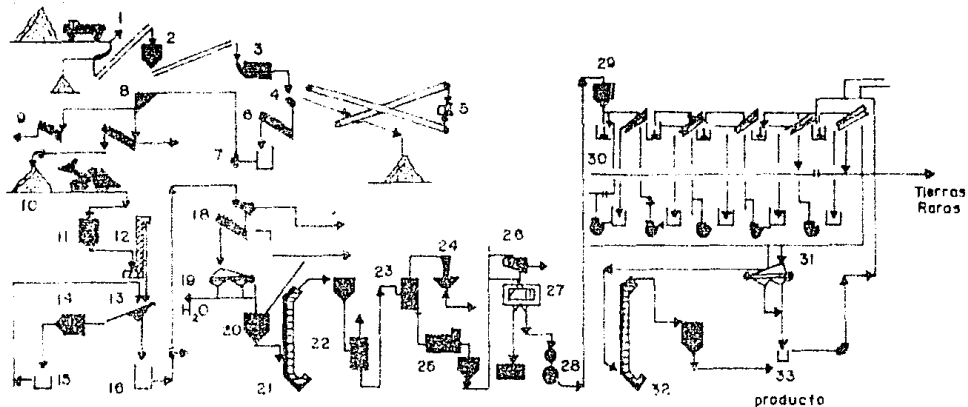
Etapa 5.- La etapa final consiste de una lixiviación en contracorriente, usando ácido sulfúrico para remover y eliminar - otras impurezas solubles, tales como el magnesio y calcio entre otros, y se recupera un producto final filtrado con un contenido de 90%. Se eliminan en esta parte las tierras raras.

Dado que la compañía CVRD, requiere de un concentrado de 91% de TiO_2 , se planea complementar la etapa final con una cloruración para eliminar los fosfatos en proporción de 2 a 2.5% de P_2O_5 , así como el calcio y magnesio.

DESCRIPCION DE LOS ELEMENTOS DEL DIAGRAMA DE FLUJO, MOSTRADO EN LA SIGUIENTE FIGURA (VI.8).

- 1.- Parrilla y criba vibratoria.
- 2.- Recipiente o tolva.
- 3.- Lavador de mineral.
- 4.- Criba vibratoria.
- 5.- Quebradora secundaria.
- 6.- Clasificador en espiral.
- 7.- Bomba de transferencia.
- 8.- Separador magnético de baja intensidad.
- 9.- Clasificador en espiral.
- 10.- Pila de material combinado.
- 11.- Recipiente o tolva.
- 12.- Elevador de cangilones.
- 13.- Criba vibratoria.
- 14.- Molino de bolas.

- 15.- Depósito de recirculación.
- 16.- Bomba de transferencia.
- 17.- Separador magnético de baja intensidad.
- 18.- Clasificador en espiral.
- 19.- Filtro de campana.
- 20.- Recipiente o tolva.
- 21.- Secador de aire.
- 22.- Horno de calcinación de lecho fluidizado.
- 23.- Horno de reducción de lecho fluidizado.
- 24.- Ciclón clasificador.
- 25.- Enfriador.
- 26.- Separador magnético (magnetita producida por la reacción química).
- 27.- Separador magnético de mediana intensidad.
- 28.- Separador electrostático.
- 29.- Recipiente o tolva.
- 30.- Tanques de lixiviación y clasificadores en espiral.
- 31.- Filtro de campana.
- 32.- Secador de aire.
- 33.- Producto terminado.



(Van R. Turner 1985)

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Diagrama de flujo
de una
Planta de Titanio

Figura No
VI.8

Tesis Profesional
Julio 1990

CAPITULO VII

USOS, PRODUCCION Y POSIBILIDADES FUTURAS

VII.1 USOS

VII.2.1 Producción

VII.2.2 Cotizaciones

VII.3 POSIBILIDADES FUTURAS

VII.1 USOS.

La mayor aplicación del titanio como metal, ha sido en la industria aeroespacial, y su consumo ha estado fuertemente dominado por las demandas realizadas por la aviación militar. La proporción en el consumo de titanio usado para fines militares ha disminuido poco, pero en 1981 todavía se estimaba ser del 35%, comparado con un 40% atribuido a la aviación comercial y 25% para aplicaciones no aeroespaciales.

En estructuras de aviación, el titanio es usado para reducir el peso de varias partes, tales como esqueletos, cabinas, largueros, cubiertas, sujetadores, ductos, etc.

El uso principal en las turbinas, es como material que sirve para la fabricación de discos y hojas compresoras.

También se utiliza en condensadores de plantas nucleares y en los intercambiadores de calor dentro de la industria química y petrolera; en ánodos utilizados en procesos electroquímicos, en evaporadores para desalinización de las aguas, bombas, válvulas, tanques, tuberías. (Lynd y Lefond, 1983).

El concentrado de rutilo, es usado en las cubiertas de los electrodos para soldadura. La ilmenita, escoria o el TiO_2 manufaturado puede también ser utilizado en las cubiertas de electrodos para soldadura; sin embargo, el rutilo es considerado como el más deseable para este propósito. El dióxido de titanio estabiliza el arco eléctrico, reduce la viscosidad de la escoria formada y disminuye la tensión superficial de las gotas de metal sobre los electrodos y da como resultado una soldadura suave o lisa.

El dióxido de titanio también es usado en la fabricación de capacitores de cerámica, fibras de vidrio y cortadoras de car-

buro de titanio. Los compuestos de organotitanio, tales como el alquil y butil, titanatos derivados de alcoholes por reacción con el tetracoloruro de titanio, y los ésteres de titanio son usados como catalizadores en varios procesos de polimerización y como repelentes de agua en procesos de teñido.

El titanio, primeramente usado como un desoxidante, ha asumido una importancia considerable en la manufactura de acero inoxidable; actúa como un elemento estabilizador del carbón y nitrógeno para impedir la corrosión intergranular.

El titanato de estroncito ha sido usado en aplicaciones ópticas, tales como en la fabricación de dispositivos para la detección de rayos infrarrojos. (Lynd y Lefond, 1983).

Otro de los grandes usos que tiene el titanio en forma de dióxido, es como pigmento, el cual debido a su blancura, alto índice de refracción y la consecuente capacidad para dispersar la luz, lo hacen inigualable para blanquear pinturas, papel, hule, plásticos y otros materiales (Lynd y Lefond, 1983; Bate-man, 1951).

VII.2.1 Producción.

A continuación, se enlistan los principales países productores de ilmenita desde 1983 hasta 1987, sin considerar la producción obtenida en E.U.A.; las cifras anotadas para el año de 1987, son preliminares. (Tabla VII.1).

TABLA VII.1 PRINCIPALES PAISES PRODUCTORES DE ILMENITA.

PAIS	MILES DE TONELADAS METRICAS				
	1983	1984	1985	1986	1987
Australia	893	1096	1269	1307	1451
Brasil	15	50	45	45	45
Canadá	612	726	844	850	898
Finlandia	154	167	136	-	-
India	181	150	170	140	150
Malasia	109	195	275	397	399
Noruega	544	550	736	802	816
Rep. de Sudáfrica	381	417	435	435	590
Rep. Popular China	136	80	140	145	145
Sri Lanka	82	140	160	160	160
URSS	431	440	441	445	445
T O T A L	3538	4013	4594	4666	5039

Fuente: Mineral Commodity Summaries. Bureau of Mines, U.S.A.

La siguiente tabla VII.2, muestra la importación de titanio en varias presentaciones, que ha realizado México de 1983 a 1987 y que proviene de diferentes países:

TABLA VII.2 IMPORTACIONES DE TITANIO REALIZADAS POR MEXICO.

FORMA DE PRESENTACION Y PAIS DE ORIGEN	TONELADAS (Peso bruto)				
	1983	1984	1985	1986	1987
Arenas de Rutilo	2296	2507	2507	2173	1484
Rep. Fed. Alemania	-	18	-	-	-
Australia	142	-	-	-	-
Canadá	-	66	-	-	-
E.U.A.	1723	2265	2526	2172	1484
Suecia	-	158	-	-	-
Suiza	431	-	1	1	-
Ilmenita	76157	95519	29577	47129	44562
Australia	64211	95517	29568	47124	44519
E.U.A.	11946	2	9	5	43
Escorias de mineral ferrotitánico con- centrado (con más de 65% de Titanio - combinado)	10495	10616	25843	38727	14200
Canadá	10495	10616	10478	-	-
E.U.A.	-	-	15365	38737	14200

Fuente: IMCE, INEGI, SPP; DIR. GRAL. DE EST. SEC. E INFORM. SECO
FIN.

VII.2.2 Cotizaciones.

A continuación se presenta la tabla VII.3 donde se establecen las cotizaciones en U.S. Dlls., que se han venido manejando desde 1983 hasta 1987, para algunos minerales de titanio o presentaciones del mismo.

TABLA VII.3

COTIZACIONES EN U.S. Dlls. PARA ALGUNOS MINERALES DE TITANIO

MINERAL	1983	1984	1985	1986	1987
Ilmenita 54% TiO ₂ *	(70.0 75.0)	(70.0 75.5)	-	-	-
Escorias 70% TiO ₂ **	150.0	150.0	150.0	150.0	-
Rutilo 96% TiO ₂ *** a me- nos de 12 ma- llas	(416.67 445.0)	(440.0 470.0)	(460.0 490.0)	(487.0 505.0)	-
Afinado. Es- ponja *** 99.3% con un máximo de 115 brinelli (dureza)	5.55	5.55	-	-	-

* Dólares por tonelada larga, L.A.B. Carro Puertos del Atlántico.

** Dólares por tonelada larga, L.A.B. Quebec.

*** Dólares por tonelada corta, L.A.B. Puertos del Atlántico y grandes lagos.

**** Dólares por libra, en lotes de 500 libras.

Fuente: Engineering and Mining Journal.

VII.3 POSIBILIDADES FUTURAS.

Con la tecnología actual, no existen sustitutos totalmente competitivos de minerales de titanio que funcionen como materias primas para la producción de pigmentos. Sin embargo, existen sustitutos potenciales de los depósitos de arena ricos en ilmenita, ilmenita alterada y rutilo. Estos se presentan en forma de grandes depósitos de ilmenita con bajo contenido de TiO_2 en varias partes del mundo, incluyendo Sudáfrica, Nueva Zelanda y posiblemente Egipto.

Además de estos, existen amplios depósitos de arenas con magnetita titanífera que podrían producir concentrados hasta con el 20% de TiO_2 . La explotación de estos últimos involucraría el desarrollo de una tecnología que permitiese la separación de concentrados de titanio y hierro, mediante la fusión o hidrometalurgia.

Las áreas de aplicación a futuro incluye electrodos de cristal individual de TiO_2 para la descomposición de agua; para la producción de hidrógeno combustible, catálisis por desnitrificación de gas-combustible y TiO_2 de alta pureza para hacer termistores de titanato de bario.

Otras áreas de oportunidad en crecimiento son: su uso en la fabricación de hojas o aspas de turbinas en plantas gasoelectricas, en los cascos de submarinos y posibles aplicaciones en la industria automotriz.

El crecimiento anual durante los próximos años, en cuanto, a consumo de pigmentos de TiO_2 ha sido estimado como de 2 a 3%, sólo en los E. U. A., mientras que en el resto del mundo será alrededor del 3 al 4%.

VIII. CONCLUSIONES

Por la producción de minerales importantes (Ag, Pb, Zn, Cu, entre otros), México mantiene su gran tradición de país minero, pero el avance tecnológico implica el revitalizar esta tradición y diversificar la exploración y explotación hacia los elementos que en el futuro inmediato se requieran. El titanio es uno de estos elementos y México presenta las características geológicas, geoquímicas y metalogénicas adecuadas para su exploración, ahora bien, dependiendo de los resultados de ésta se vería cuál sistema de explotación es el más adecuado.

La industria del metal titanio se ha desarrollado con más consistencia en esta última mitad del siglo y el metal titanio tiene una demanda proyectada bastante atractiva en distintos campos de la actividad del hombre. Por su uso algunos países industrializados han establecido etapas en cuanto a su aplicación; siendo la primera "metal para el aire" y la segunda "metal para el mar".

El titanio es un metal de transición, su número atómico es 22, en forma pura es suave y dúctil, tiene un color gris plata y se funde a los 1675°C. De acuerdo a la clasificación de Goldschmidt de los elementos, el titanio pertenece a la fase litófila, es decir, que ocurre preferentemente en o con silicatos. Como el acero inoxidable y el aluminio, el titanio debido a la formación de una película superficial de óxido que lo hace químicamente inerte, tiene una excelente resistencia a la corrosión en diversos ambientes.

Las clasificaciones de yacimientos de titanio, están basadas en los tipos de ambiente u origen ígneo o sedimentario principalmente, aunque a medida que se ha profundizado en el estu-

dio de ellos, se ha llegado a clasificaciones más detalladas - como lo es aquélla que ha sido establecida por Routhier.

La asociación de ambientes tectónicos con yacimientos minerales resulta de ayuda muy valiosa para la prospección o localización de ellos a nivel macro, ya que por medio de ella se podría hacer una discriminación preliminar entre áreas con posibilidades de titanio, y aquéllas donde estas posibilidades serían nulas o escasas.

Los diversos modelos de yacimientos de titanio, muestran las principales características propias de la mineralización y las rocas encajonantes, así como su posible relación genética con éstas. De acuerdo con esto, cada modelo de yacimiento tiene sus propias características que lo definen y determinan.

Los yacimientos de titanio asociados a rocas básicas y ultrabásicas son en la actualidad -con excepción de los depósitos de placer australianos-, los más importantes productores de titanio.

Los depósitos titaníferos se encuentran generalmente asociados a complejos anortosíticos y gabroicos. Aunque aún no se ha podido determinar con exactitud su origen, la mayoría de los autores coincide en señalar a los fenómenos de segregación magmática como los responsables de las acumulaciones de titanio para este modelo.

El modelo de yacimiento de titanio asociado a rocas alcalinas y sus carbonatitas es importante, porque presenta acumulaciones de minerales poco comunes (tierras raras, niobio, uranio), además de los minerales de titanio. Presentan en su composición una ausencia total o casi total de cuarzo. Estos yacimientos son menos importantes que los del primer modelo.

Las rocas metamórficas, en algunos casos, también se encuen

tran relacionadas o asociadas a yacimientos de minerales titaníferos. En algunos países como los E.U., la producción obtenida de este modelo de yacimientos está entre las más importantes. Sin embargo, no existen datos que demuestren su amplia distribución mundial.

Los placeres de playa siempre se han constituido como los principales productores mundiales de ilmenita y rutilo. Primero fueron las playas de la India, actualmente son las costas australianas las que presentan la mayor cantidad de minerales titaníferos. Además, varios países, entre los que se encuentra México, presentan en sus playas atractivos contenidos de TiO_2 .

Otra alternativa para la producción del titanio, la constituyen los yacimientos asociados a depósitos residuales, sobre todo a los depósitos de la bauxita, en donde los minerales de titanio se obtienen como subproducto. La formación de estos depósitos es debida a la alteración que sufren las rocas alcalinas, principalmente las sienitas nefelínicas.

Estos depósitos son muy pequeños comparados con los anteriores, pero aún así, deben tenerse presentes. Las características que presentan, lo determinan como un modelo aparte, diferentes de los demás.

Los modelos de yacimientos de titanio son más conocidos, mientras más alto sea su contenido de minerales valiosos. De aquí que los depósitos asociados a rocas anortosíticas, sobre todo, y a placeres de playa sean los que más se han estudiado.

Sin embargo, debido a la gran demanda que últimamente ha tenido el titanio en la industria (espacial, sobre todo), hace considerar que todos los modelos de yacimientos adquieran gran

importancia comercial, lo que conduciría a un mejor conocimiento de ellos, teniendo mejores bases para su prospección y explotación.

En México se encuentran yacimientos de titanio representativos de cada modelo, unos más importantes que otros; sin embargo, no han sido debidamente estudiados, por lo cual su aprovechamiento ha sido prácticamente nulo. Por tanto, sigue siendo un potencial productor de este mineral.

De lo expuesto para cada tipo de guías, se puede apreciar que las más útiles son las guías litológicas y geomorfológicas porque su aplicación se dirige directamente a la presencia del titanio; en cambio otras, como las guías geofísicas, tienen valor exploratorio antes que delatar la existencia del metal.

Las guías de exploración son intentos de ajustar las observaciones en un sistema racional y consistente y como tales tienen un valor en la creación del conocimiento, sin embargo su objetivo final es descubrir menas; debido a ello y a que todavía la tierra está dividida en naciones, se concluye este capítulo con el siguiente cuadro resumen de los estados de la República Mexicana y la factibilidad de existencia en ellos de titanio, con base en las guías descritas.

Del cuadro se desprende que, atendiendo únicamente a las guías de prospección, las entidades más promisoras para la existencia de depósitos de titanio son: Jalisco, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas, si se considera la presencia de titanio ya reportado, a éstas debe agregarse Tamaulipas.

Todos estos estados tienen en común la existencia de rocas fuente de titanio y playas donde éste podría depositarse para formar placeres.

Estado	Gufas del Titonio				Evidencias directas de Titonio
	Geomorfológicas	Litológicas	Minerológicas	Geotectónicas	
Ags					
BCN	X	X			
BCS	X	X			
Camp	X				
Coah			X		
Col	X		X		
Chis	X	X		X	
Chih			X		
Dgo			X		
Gro	X	X	X	X	X
Jal	X	X	X	X	X
Mich	X	X	X	X	X
Nay	X				
Oax	X	X	X	X	X
Pue		X			
Q. Roo	X				
Sin	X	X			
Son	X	X			
Tab	X				
Tamps	X	X			X
Ver	X				
Yuc	X				
Zac					
Gto					
Tlax					
Hgo					
Qro					
Mex					

Una "X" representa que la gufa en cuestión es favorable.

Dado que la ocurrencia y localización de los yacimientos titaníferos es muy cercana a la superficie; para su explotación, se emplean métodos de minado superficial utilizando principalmente el método de minado en tajos abiertos y el minado de depósitos de placer; aprovechando en este último el paso específico del titanio que es una de sus principales características y que a partir de ésta se obtendrá un producto enriquecido aprovechando y aplicando el principio de concentración gravimétrica.

Dentro de los avances tecnológicos que día a día logra la humanidad el titanio juega un papel muy importante, por sus propiedades que presenta; ya que en ciertas aleaciones, por ejemplo, su dureza puede compararse con la del diamante; así en la industria aeroespacial, entre otras, juega un papel muy importante. De ahí estriba la importancia de conocer los procesos de beneficio y la metalurgia de los minerales de titanio, refiriéndose a la ilmenita y el rutilo, que son los principales. El 95% del titanio consumido lo es en forma de TiO_2 y sólo el rutilo se encuentra en la naturaleza de esta forma; por lo que es necesario emplear técnicas sofisticadas para eliminar el FeO de la ilmenita; aplicando el proceso Kroll, Hunter o una cloruración en combinación con una lixiviación.

El desarrollo tecnológico que tiene la industria aeroespacial en los países industrializados da lugar a una gran oportunidad para el consumo de titanio, el cual ha sido considerado por algunos autores como uno de los metales del futuro.

Por otro lado, el amplio desarrollo que se tiene actualmente en el área de petroquímicos (plásticos, principalmente) convierten al titanio en uno de los pigmentos de más demanda.

Por lo anterior, en el caso de México, independientemente de las fluctuaciones en las cotizaciones de este metal en el mercado, es conveniente realizar un estudio con mayor profundidad, para determinar la localización de posibles yacimientos y reservas que pudieran ser explotadas cuando el momento lo requiera.

BIBLIOGRAFIA

- ANON., 1980. "Australia's Mineral Resources: Mineral Sands", - Australian Department of Trade and Resources, 10 pp.
- ATLAS, 1987. Uso de Explosivos en México. Grupo ICI, Cap. VIII.
- BARDOSSY, GYORGY, 1982. Karts Bauxites, Bauxite Deposits on - Carbonate Rocks. Elsevier Scientific Publishing - Company.
- BATEMAN, ALAN M., 1951. Economic Mineral Deposits. John Wiley & Sons, Inc.
- BATEMAN, ALAN M., and JENSEN, MEAD L., 1981. Economic Mineral Deposits, John Wiley & Sons, Inc.
- BELOUSOV, V.V., 1975. Los Regímenes Endógenos de los Continentes. Editorial Niedra, Moscú.
- BORISOV, KLOKOV y GORNOVOI, 1976. Labores Mineras. Ed. Mir.
- BOWEN, N. L., 1928. The Evolution of The Igneous Rocks. Princeton, N. J.: Princeton Univ. Press, 332 pp.
- BRADY, E. S., 1981. "China's Strategic Minerals and Metals-Titanium". The China Business Review, Vol. 8, No. 5 Sept.-Oct., pp. 62-65.
- BUDDINGTON, A. F., 1939. Adirondack Igneous Rocks and Their Metamorphism, Geol. Soc. Amer. Mem. 7, 354 pp.
- BURROUGHS G., CHARLES, 1989. Metalurgia Extractiva No Ferrosa. Linusa, Ed.
- CEPEDA-DAVIA, LEOVIGILDO. Apuntes de Yacimientos Minerales. - Facultad de Ingeniería, UNAM.

- CEPEDA-DAVILA, I.; PADILLA-LARA, P. y BLOOMFIELD, K., 1975. El Complejo Alcalino de la Sierra de San Carlos, Tamaulipas. Convención Nacional AIMMGM, memoria, pp. 333-375.
- CHOPPIN, JAFFE, SUMMERLIN y JACKSON, 1975. Química. Publicaciones Cultural, S.A.
- CONSEJO DE RECURSOS MINERALES, 1988. Sumario Estadístico de la Minería Mexicana 1983-1987. México.
- CRONAN, D. S., 1980. Underwater Minerals, Academic Press.
- CUMMINS & GIVEN, 1973. Mining Engineering Handbook, AIME, EUA.
- DAUGHERTY, F. W., 1965. La Cueva Intrusive Complex and Dome - Northern Coahuila, Mexico. Bull. Geol. Soc. America, V. 74, pp. 1429-1438.
- _____, 1965. Aligned Intrusive Complex in Northern Coahuila, Mexico. Bull. Geol. Soc. America, V. 74, pp. 1429-1438.
- DAWSON, S. B., 1966. Oldoinyo Lengai an Active Volcano with - Sodium lava flows: in Tuttle and Gittins, J. - (Eds.), "Carbonatites", pp. 155-158.
- DE CSERNA, ZOLTAN, 1977. Alóctono del Paleozoico Inferior en la Región de Victoria, Tamps., Rev. Inst. Geol. - UNAM, Vol. 1, p. 19.
- DEMANT, A. y ROBIN, C., 1975. Las Fases del Vulcanismo en México, una síntesis en relación con la evolución geodinámica desde el Cretácico. Bol. Rev. Inst. - Geol. UNAM, pp. 41-42.

- EHLERS, ERNEST G., and BLATT, HARVEY, 1980. Petrology Igneous Sedimentary and Metamorphic; W. H. Freeman and Company.
- ENGINEERING and MINING JOURNAL, 1982. Open Pit Mining, AIME, E.U.A.
- GILLSON, J. L., 1956. Genesis of titaniferous magnetites and associated rocks of the Lake Sanford District., - New York, Amer. Inst. Mining Eng. Trans. 205: 296 301.
- GILLSON, J. L., 1959. "Sands Deposits of Titanium Minerals", - Trans. SME-AIME, Vol. 214, pp. 421-429; Mining Engineering, Vol. 11, No. 4.
- GOLD, P. P., 1963. Average Chemical Composition of Carbonatites, Econ. Geol., Vol. 58, pp. 998.
- GOMEZ RUIZ, DAVID, 1985. Apuntes de Explotación de Minas III, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- GONZALEZ-PARTIDA, E., 1987. Evolución tectónica de la porción centrooccidental de México y su relación con los yacimientos minerales asociados, Geof. Int. Vol. 27, No. 4, pp. 543.
- GONZALEZ-REYNA, G., 1956. Riqueza Minera y Yacimientos Minerales de México, Banco de México, S.A.. Departamento de Investigaciones Industriales.
- GROSS, GORDON A., 1979. Los Yacimientos más Antiguos, citado en El Redescubrimiento de la Tierra, Conacyt, p. 138.
- HAMMOND, P., 1952. Allard Lake Ilmenite Deposits, Econ. Geol., Vol. 47, No. 6, Sep-Oct., pp. 634-649.

- HEINRICH, E. W., 1966. The Geology of Carbonatites. Chicago: Rand McNally, 555 pp.
- KERR, PAUL F., 1977. Optical Mineralogy, 4a. ed., McGraw-Hill, pp. 228.
- KILK, OTTOMER, 1983. Encyclopedia of chemical technology. John Wiley and Sons, Inc.
- KRAUSKOPF, KONRAD BATES, 1979. Introduction to geochemistry. McGraw-Hill.
- KREITER, V. M., 1978. Investigación y Prospección Geológica. Ed. Paraninfo.
- KRYNINE, 1942. Provenance versus mineral stability as a controlling factor in the composition of sediments. Citado por Pettijohn, 1975.
- KUUVART, M., & BÖHMER, M., 1986. Prospecting and Exploration of Mineral Deposit, elsevier.
- LEFOND, STANLEY J. (Edited), 1983. Industrials Minerals and Rocks, Society of Mining Engineers of The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc. New York, N.Y.
- LINDGREN, WALDEMAR, 1933. Minerals Deposits. Ed. McGraw-Hill.
- LOPEZ-ABURTO, VICTOR M., 1989. Apuntes de Métodos de Concentración de Minerales. Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
- LUGO H., JOSE I., 1985. Las Estructuras Mayores del Relieve Terrestre, Ed. UNAM, p. 124.
- LYND, L. F., 1985. Titanium Facts and Problems. Bureau of Mines, Bulletin 675, pp. 859-979.

- MASON, BRIAND & MOORE, CARLETON B., 1982. Principles of Geochemistry, John Wiley & Sons.
- MCDOWELL, F. W., and R. P. REISER, 1977. Timing of Mid-Tertiary Volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango City and Mazatlan, Mexico. Geol. Soc. Am. Bull., 1988, p. 1488.
- McKINSTRY, H. E., 1970. Geología de Minas, Ed. Omega.
- McQUILLAN & McQUILLAN, 1956. Metallurgy of The Rarer Metals, Butterworths Scientific Publications, pp. 483-539.
- MEZA-ESPINOZA, J. S., 1988. Cinética de la Lixiviación de Ilmenita con Acido Clorhídrico. Tesis Profesional grado (II) I. P. N.
- MILLER, H., Acting Director, 1955. Titanium Plant at Boulder - City Nev., Bureau of Mines, Bulletin 5248 Report of Investigations.
- MITCHEL, A. H. G., & GARSON, M. S., 1981. Mineral Deposits and Global Tectonic Setting. Academic Press.
- NICOLI, PIERRE, 1970. Catalogie de concentrations minérales - stratiformes. Gauthier-Villars Éditeur.
- NIETO-OBREGON, J. y GOMEZ-CABALLERO, A., 1983. Carbonatitas, Mineralizaciones asociadas. Inédito.
- ORTEGA-GUTIERREZ, F., 1975. Nota preliminar sobre las eclogitas de Acatlán, Puebla. Bol. Soc. Geol. Mexicana, Vol. 35, pp. 1-6.
- _____, 1978. El Gneis Nevillo y rocas metamórficas asociadas de los cañones del Novillo y la Peregrina, área de Cd. Victoria, Tamps., Rev. Inst. Geol. - UNAM, Vol. 2 (1), pp. 19-30, México.

- OTHMER, KIRK, 1962. Enciclopedia de Tecnología Química. Tomo II, Ed. BTEHA, pp. 452-520.
- PARK, CHARLES F., 1975. Fuentes de Recursos de Nuestro Planeta. Ediciones Marymar.
- PARK, CHARLES F., and MACDIARMID, ROY A., 1975. Ore Deposits, W. H. Freeman and Company, San Fco.
- PAULSON, E. G., 1964. "Mineralogy and Origin of the Titaniferous Deposit at Pluma Hidalgo, Oaxaca, Mexico", - Economic Geology, Vol. 59, No. 5, Aug., pp. 753-761.
- PECORA, W. T., 1956. Carbonatites A. Review: Bull. Geol. Soc. America, Vol. 67, pp. 1537-1556.
- PETRASCHECK, W. E., 1965. Yacimientos y Criaderos. Ed. Omega.
- PETTIJOHNS, F. J., 1975. Sedimentary Rocks, 3a. ed., Harper & Row, p. 195.
- POWELL, J. L.; HURLEY, P. M., and FAIRBEN, H. W., 1966. The Strontium Isotopic Composition and Origin of Carbonatites: in Tuttle, G.F. and Gittins, J. (Eds.) "Carbonatites", pp. 365-378. Interscience Publishers, Inc. New York.
- RAMDOHR, PAUL, 1950. The Ore Mineral and Their Intergrowths. Pergamon Press.
- RONOV, MIKHAILVOSKAYA y SOLODKAYA, 1963. Citados en Pettijohn, 1975.
- ROUTHIER, P., 1963. Les Gisements Métallifères Géologie et - Principes de Recherches, Masson et Cie, Éditeurs, 2 Tomos.

- SALAS, GUILLERMO P. (Editor), 1988. Geología Económica de México. Fondo de Cultura Económica.
- SCHULZE-SCHREIBER, CARLOS H., 1988. Análisis Estratigráfico y Metalogenético del Estado de Oaxaca, Tomo 2, Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- SMIRNOV, W. I., 1977. Ore Deposits. Editorial Mir. Moscú, URRS.
- , 1978. La Tectonósfera de la Tierra, Ed. Nauka, citado por Lugo H., José, 1985, en las Estructuras Mayores del Relieve Terrestre, Ed. UNAM. p.124.
- SMITH, F. H., and ADAMS, L. H., 1923. The Sistem Calcium Oxide Carbon Dioxide: Amer. Chem. Soc. J., Vol. 45, pp. 1169-1184.
- SØRENSEN, H., (Edited), 1974. The Alkaline Rocks. John Wiley & Sons.
- SPP-INEGI, 1987. Manual de Estadísticas Básicas del Estado de Tamaulipas, p. 13.
- STANTON, R.L., 1972. Ore petrology. McGraw-Hill Book Company.
- STRECKEISEN, A., 1967. Clasificación and Nomenclature of Igneous Rocks, Neus. Jb. Miner. Abh., 107, pp. 144-240.
- TEMPLEY, A. K., 1966. "Alteration of Ilmenite", Econ. Geol., Vol. 61, No. 4, June-July, pp. 695-714.
- THIEL, G. A., 1940. The relative resistance to abrasion of mineral grains of sand. Citado por Pettijohn, 1975.
- THORNBURY, WILLIAM D., 1969. Principles of Geomorphology, Ed. Wiley, p. 547.

- TURNER, FRANCIS J., and VERHOOGEN, JOHN, 1960. Igneous and Metamorphic Petrology. McGraw-Hill Book Company, Inc., N. Y.
- TURNER, VON R., 1986. Plant of Titanium. Engineer Mining Journal (revista), 187 Nr., pp. 40-43.
- TUTTLE, O. F., and GITTINS, J. (Eds.), 1966. "Carbonatites": Intersciencie Publishers, Inc., New York.
- WILLIAM C., PETERS, 1978. Exploration and Mining Geology. John Wiley & Sons.
- WINKLER, H. J., 1978. Petrogénesis de Rocas Metamórficas. Ed. Héroes, p. 175.
- WISEER, EDWARD, 1927. oxidation Subsidence at Bisbee, Arizona Econ. Geol., 22, pp. 761-790. Citado en Thornbury op. cit.
- WOOLLEY, ALAN R., 1987. Alkaline Rocks and Carbonatites of The World, Part. 1: North and South America. University of Texas, Press Austin.
- WRIGHT, J. B. (Edited), 1977. Minerals Deposits, Continental Drift and Plate Tectonics, Dowden, Hutchin Son & Ross, Inc.
- WYLLIE, P. J., 1979. Ultramafic and Related Rocks. Robert E. Krieger Publishing Company Huntington, New York.