



Comisión Nacional
de Energía Atómica

XLVI Reunión Anual de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear

Minerales Nucleares: Torio y Uranio

CCK, CABA, 1 de diciembre de 2023



Luis López
lopez@cnea.gov.ar

Descargo de Responsabilidad

Para la elaboración y compilación de la versión final de esta presentación se han utilizado diversas fuentes, haciéndose un esfuerzo genuino de citarlas adecuadamente.

La selección de la bibliografía no es necesariamente completa, ya que existe una enorme cantidad de información y opinión disponible en la materia.

Tanto los documentos fuente utilizados como las opiniones expresadas y los análisis realizados por el autor, pueden no representar la política oficial de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA).

Para contar con la información institucional es menester consultar el sitio web de la CNEA e informes oficiales que se encuentren en el dominio público:

<https://www.argentina.gob.ar/cnea>

Torio y Uranio: Generalidades

Abundancia de Th y U

	Torio (ppm)	Uranio (ppm)
Corteza Total	5,6	1,7
Corteza Superior	10,5	2,7
Agua de Mar	0,0000004	0,0033

Fuente: Australia Geoscience, 2005; Cuney & Kyser, 2008

Propiedades Químicas de Th y U

	Torio	Uranio
Número Atómico	90	92
Masa Atómica	232,03810	238,05079
Estados de Oxidación	Th⁴⁺	U⁴⁺, U⁵⁺, U⁶⁺ (UO₂)²⁺

Tabla periódica de los elementos

Grupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	I	II											III	IV	V	VI	VII	VIII
Periodo	1																	2
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	* La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	** Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
Lantánidos	*		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
Actínidos	**		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

Alcalinos
Alcalinotérreos
Lantánidos
Actínidos
Metales de transición
Metales del bloque p
Metaloides
No metales
Halógenos
Gases nobles y Transactínidos

Isótopos Naturales de Uranio

U Natural		
Isótopo	Abundancia	T 1/2
Fértil → ^{238}U	99,284 %	$4,46 \times 10^9 \text{ a}$
Físil → ^{235}U	0,711 %	$7,04 \times 10^8 \text{ a}$
^{234}U	0,0085 %	$2,46 \times 10^5 \text{ a}$



Isótopo Natural de Th

Fértil →

Th Natural		
Isótopo	Abundancia	T 1/2
^{232}Th	100,00 %	$14,5 \times 10^9 \text{ a}$



Consumo de Uranio en un Reactor Nuclear de Agua Liviana (1.000 MWe)

✓ Carga inicial: 72 tU (LEU)

LEU 4 % U-235, DU 0,3 % U-235 → 650 tU (natural)

✓ Consumo anual: 24 tU (LEU)

LEU 4 % U-235, DU 0,3 % U-235 → 217 tU (natural)



60 años → 14.000 tU (natural)

Consumo de Uranio en un Reactor Nuclear de Agua Pesada (1.000 MWe)

- ✓ Carga inicial:
400 – 500 tU (natural)
- ✓ Consumo anual:
140 – 160 tU (natural)
- ✓ Agua pesada:
700 t (carga inicial)



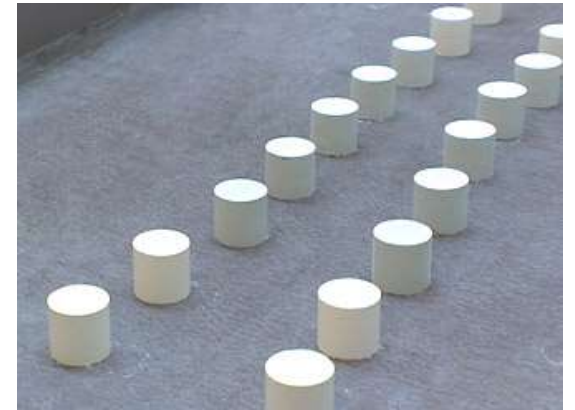
60 años → 9.500 tU (natural)

Consumo de Torio en un Reactor Nuclear Hipotético (1.000 MWe)

- ✓ Carga inicial: 40-50 tTh + 4-5 t LEU
- ✓ Consumo anual: 10 tTh

60 años → 650 tTh

No hay producción de Pu-239 → No Proliferativo



Torio: Depósitos, Recursos, Uso Nuclear

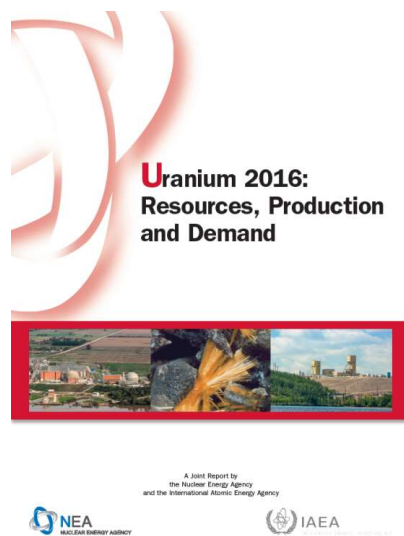
Depósitos de Torio

- ✓ Los depósitos de la **ThDEPO** (**n= 949**) no poseen mayores detalles descriptivos
- ✓ El torio se encuentra asociado a **REE** y otros elementos como **Nb y Ta**
- ✓ Las **arenas monacíticas** pueden considerarse como la mayor fuente de aporte de Th



Recursos de Torio

- ✓ Los recursos de Th están evaluados en **6.400.000 tTh**
- ✓ Ex Unión Soviética (CIS), India, EUA, Brasil, Egipto, Turquía, Noruega y Venezuela



Fuente: NEA/OECD-IAEA, 2016

Recuperación Integral REE, Th, U

- ✓ **REE** ampliamente aceptados como material crítico requerido para las energías renovables y la industria de alta tecnología
- ✓ **Uranio y torio** utilizados como combustible para la generación nucleoelectrónica (energía libre de gases del efecto invernadero)



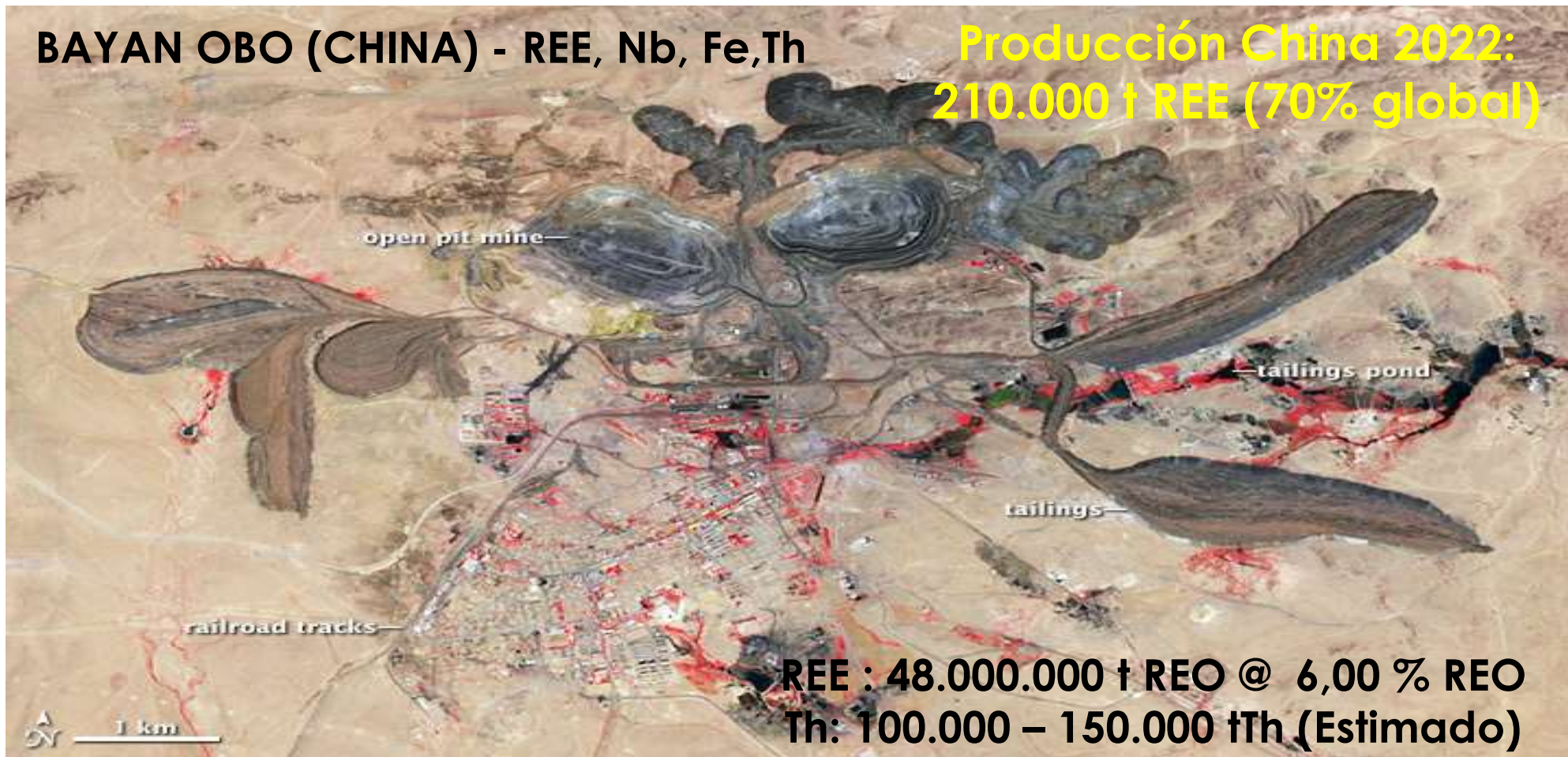
Producción de Torio

- ✓ Extracción como **subproducto REE** a partir de la monacita
- ✓ India, Brasil, Vietnam y Malasia recuperan monacita (10.000 t/año - estimado)
- ✓ **Estimaciones indirectas** indican una producción de **300 – 500 tTh por año?** (sin China)
- ✓ Países productores: **India, Brasil, China**
- ✓ La India utiliza el torio para la fabricación de combustible nuclear, mientras que en Brasil se usa en aplicaciones no nucleares (filamentos de lámparas, electrodos, lentes de alta calidad, camisas de faroles incandescentes?)

REE – Torio (China)

BAYAN OBO (CHINA) - REE, Nb, Fe,Th

Producción China 2022:
210.000 t REE (70% global)



Fuente: NEA/OECD-IAEA, 2016; Zhi Li, Yang, 2014; Miloš René, 2017

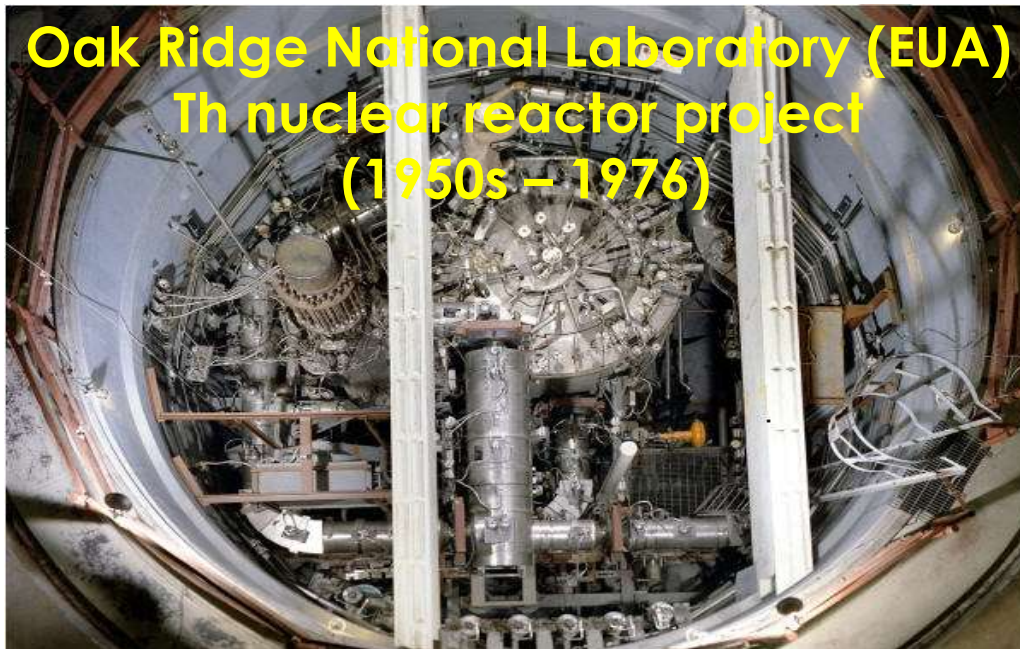
REE – Torio (EUA)



Fuente: Molycorp Inc., 2012; Van Gosen, 2015

Reactores con Combustible de Torio

- ✓ A partir de los **1950s**, EUA, Alemania, el Reino Unido, Holanda, Canadá y la India, utilizaron al Th tanto en reactores de investigación y de potencia



Perspectivas de los Reactores de Torio

Nuclear Engineering and Design
Volume 398, November 2022, 111969



Integrated analysis to investigate the viability of using Thorium-based fuel instead of traditional fuel in CANDU reactor

A. Abdelghafar Galahom^a, Amr Ibrahim^b

<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.111969>Get rights and content

- ✓ India: selección del sitio para un **AHWR** (Advanced Heavy Water Reactor) con **combustible de Th** (2011)
- ✓ Acuerdo Candu Energy (Canadá) - China National Nuclear Corporation (CNNC) para desarrollo de **combustible de Th y U reciclado** (2012)
- ✓ Investigaciones recientes sobre **combustible de Th en Candu** (2022)

Perspectivas de los Reactores de Torio



Energy & Environment | **New Nuclear** | Regulation & Safety | Nuclear Policies | Corporate | Uranium & Fuel | V

China's demonstration HTR-PM reaches full power

09 December 2022



The demonstration High Temperature Gas-Cooled Reactor-Pebble-bed Module (HTR-PM) at the Shidaowan site in Shandong province of China has reached its initial full power with "stable operation under the mode of 'two reactors with one machine'".



The site is on the coast in north east China (Image: CNNC)

- ✓ Reactores Modulares de Alta Temperatura (flexibilidad en el combustible U y Th)

High-temperature Pebble Bed Modular Nuclear Reactor (HTR-PM)
China

Operación: diciembre 2022

2 reactores, 1 turbina, 210 MWe

Fuente: NEA/OECD, 2018; Haneklaus, 2018; WNA, 2022

Perspectivas de los Reactores de Torio



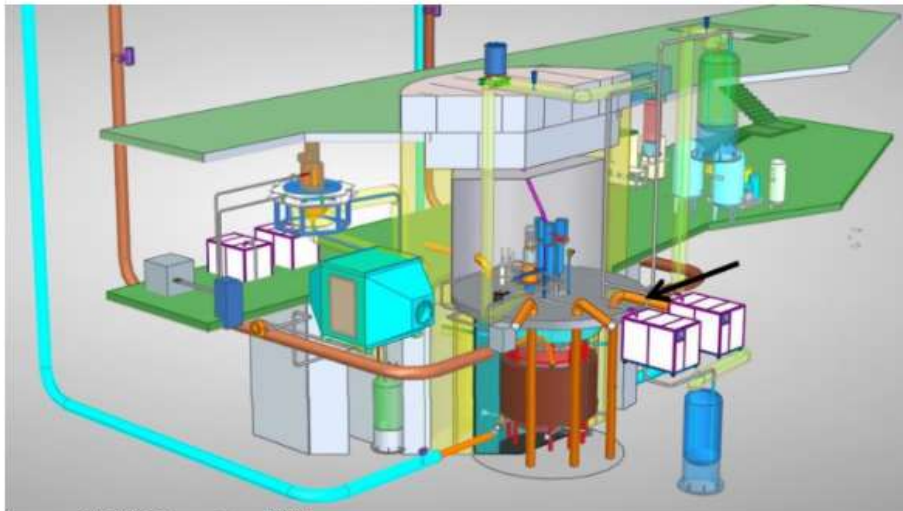
Energy & Environment | **New Nuclear** | Regulation & Safety | Nuclear Policies | Corporate | Uranium & Fuel | Wa

Operating permit issued for Chinese molten salt reactor

15 June 2023

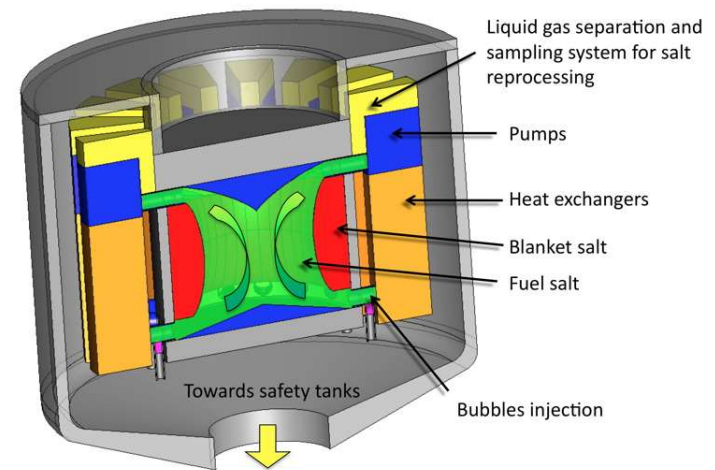


The Shanghai Institute of Applied Physics (SIAP) of the Chinese Academy of Sciences has been granted an operating licence for the experimental TMSR-LF1 thorium-powered molten-salt reactor, construction of which started in Wuwei city, Gansu province, in September 2018.



A cutaway of the TMSR-LF1 reactor (Image: SIAP)

- ✓ Reactores de Sales Fundidas (F, Li, Be, U, Th)
- ✓ Licencia de operación **Th-MSR** (Thorium - Molten Salt Reactor) en junio 2023 (China)



Fluoride-based fuel salt is in green, fertile blanket salt is red

Perspectivas de los Reactores de Torio

- ✓ El uso del combustible de Th de manera rentable es un **desafío**
- ✓ Inversión considerable en **I + D**
- ✓ **India, China, Canadá, Noruega...**



Projects Why thorium? Publications and Press Releases About us

TOWARDS MORE
SUSTAINABLE
NUCLEAR ENERGY



Home / Business / Industries
China among the countries looking to thorium as new nuclear fuel
By Karl Wilson | China Daily | Updated: 2018-10-25 09:31



Dayawan Nuclear Power Station in Shenzhen, Guangdong province. [Photo/VCG]

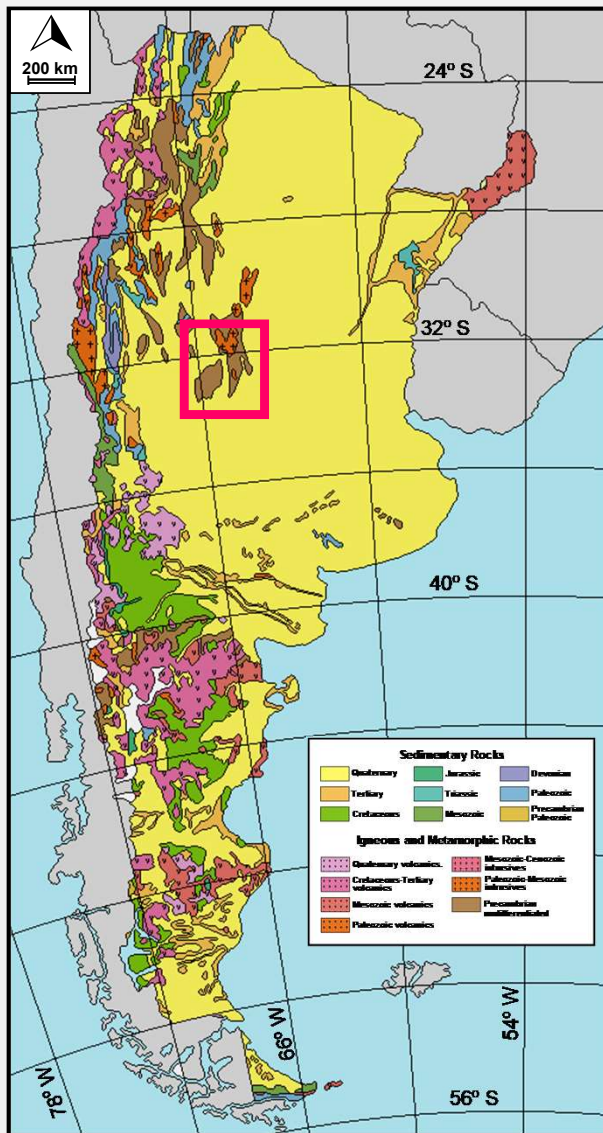


Reactor de Investigación Th-MOX de Halden (Noruega)

Fuente: Kelly, 2011; Thor Energy, 2013-2018; China Dayly, 2018; WNA, 2017-2023

Torio: Perspectivas en la Argentina

Río Tercero Arenas Monacíticas (REE, Th)

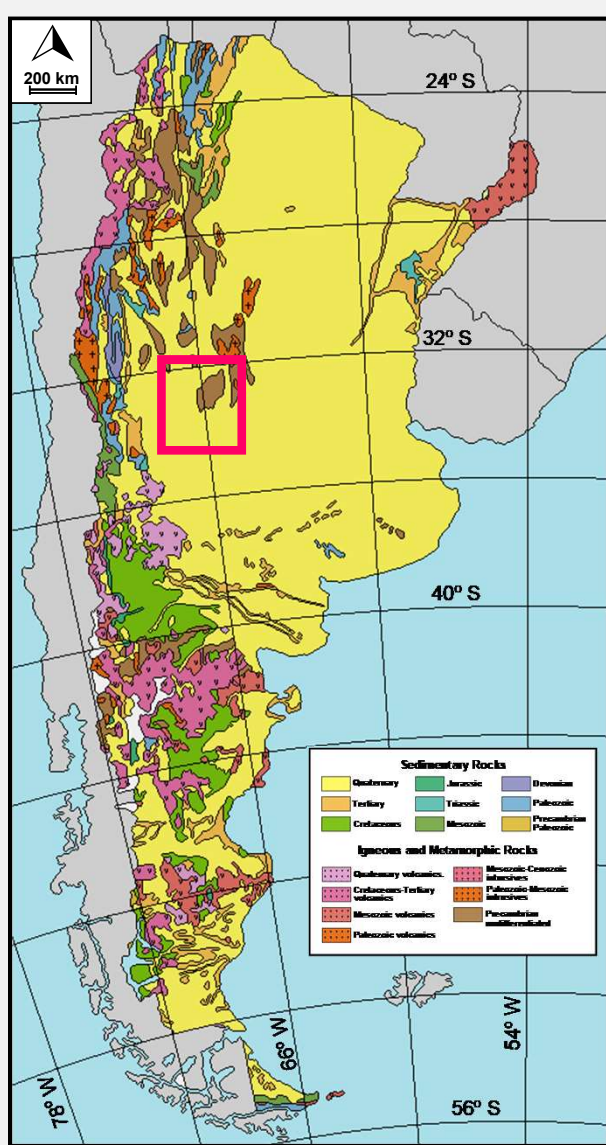


Fuente: Lucero, 1950s; Santomero, 1978

Río Tercero - Arenas Monacíticas (REE, Th)

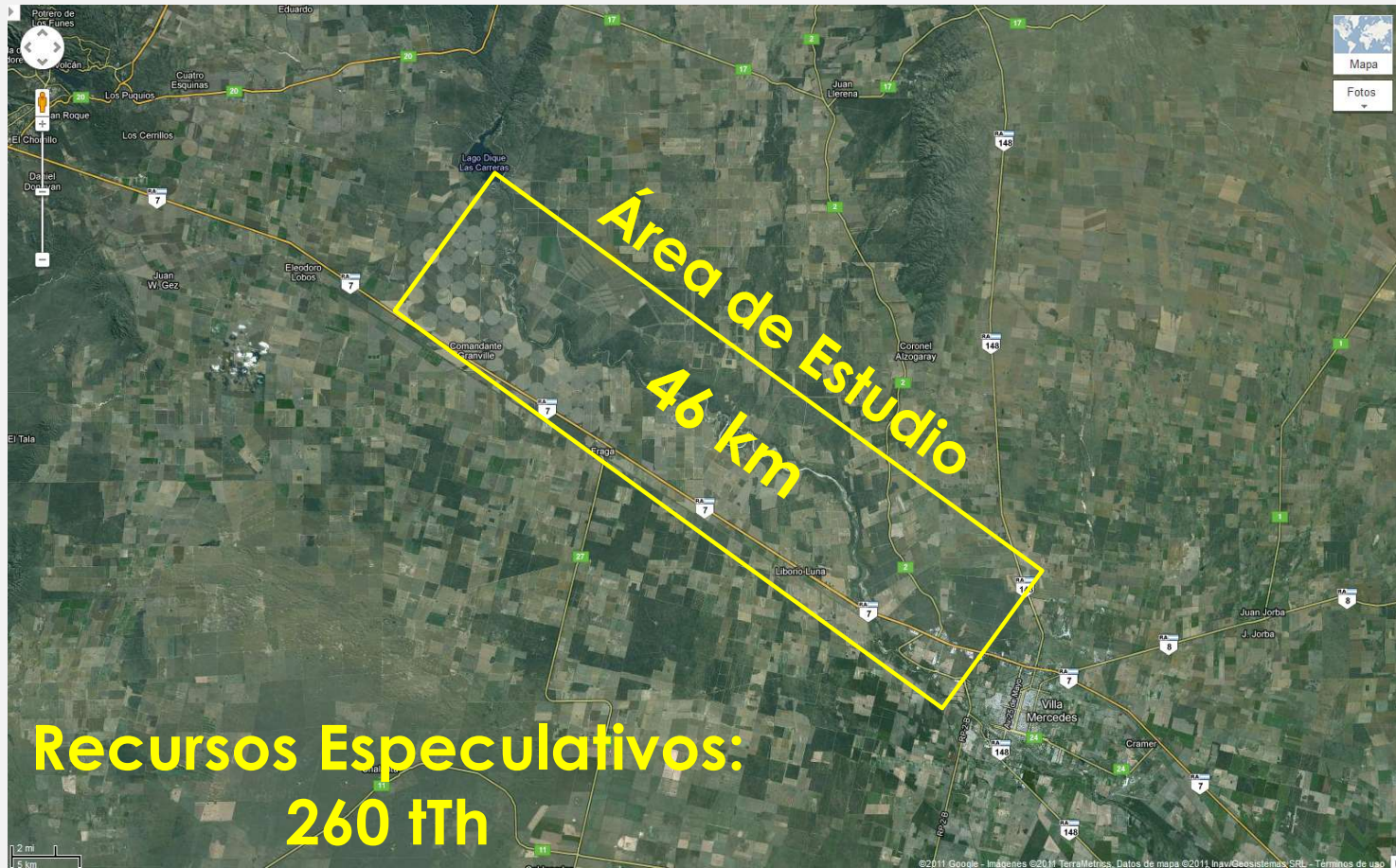


Río Quinto Arenas Monacíticas (REE, Th)

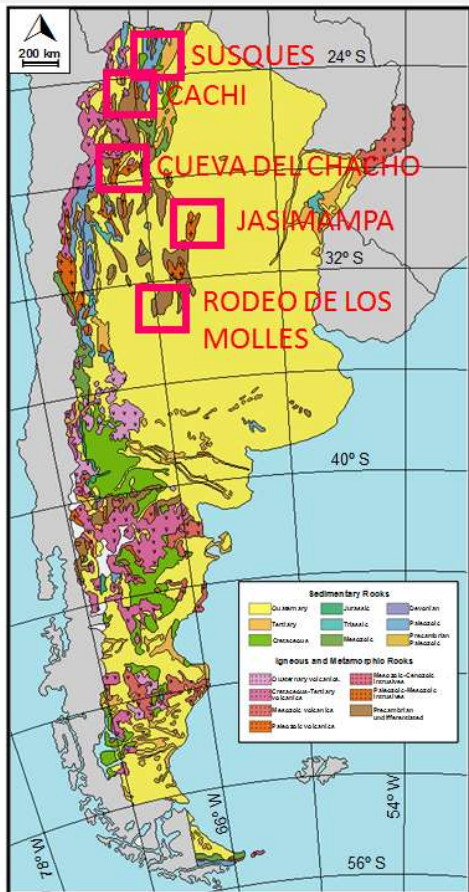


Fuente: Lucero, 1950; Santomero, 1978

Río Quinto - Arenas Monacíticas (Th)



Exploración REE (Th, U)



- ✓ Diferentes proyectos de exploración de REE con alentadoras perspectivas de explotación
- ✓ Recursos de U y Th evaluados e informados
- ✓ Recursos inferidos: **≈ 153.000 tREO+Y (con 34.000 tTh y 1.000 tU)**



Embalse – Irradiación de Th?

- ✓ Como parte del Sistema de Regulación de Potencia del Reactor, Embalse tiene 21 “Barras de Ajuste” cargadas con lápices de polvo de Cobalto-Natural para la producción de Co-60
- ✓ En éste y otros eventuales reactores Candu-6, una parte o todas las cargas absorbentes podrían ser reemplazadas por **Torio-Natural para producir U-233**



Atucha I y II – Irradiación de Th?

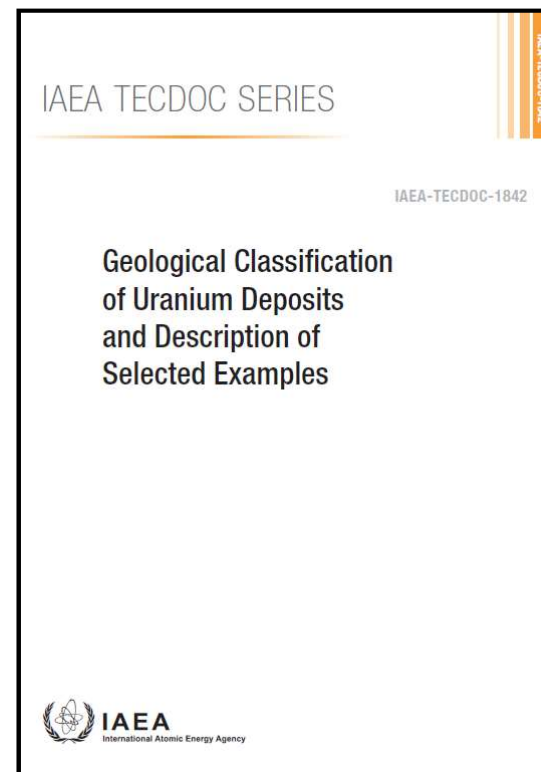
- ✓ Estudio sobre la factibilidad y el diseño básico para la producción de Co-60 en las centrales Atucha I y II, utilizando un número limitado de Elementos Combustibles Especiales
- ✓ Una parte o toda la **carga absorbente de cobalto podría ser reemplazada por Torio-Natural para la producción de U-233**
- ✓ Esto requeriría las evaluaciones más detalladas con el fin de obtener condiciones de irradiación de torio seguras, junto con los cambios de operacionales en las centrales nucleares



Uranio: Depósitos, Recursos, Demanda

Depósitos de Uranio en el Mundo – UDEPO

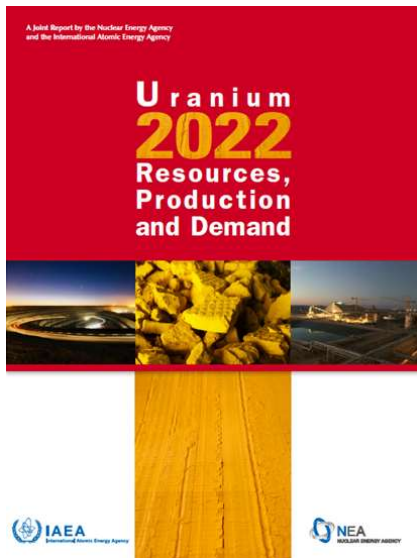
Deposit Types	n	%
Intrusive	159	3,0
Granite-related	815	15,6
Polymetallic iron oxide breccia complex	26	0,5
Volcanic-related	347	6,6
Metasomatite	203	3,9
Metamorphite	314	6,0
Proterozoic unconformity	135	2,6
Collapse breccia pipe	19	0,4
Sandstone	2445	46,7
Paleo-quartz-pebble conglomerate	155	3,0
Surficial	176	3,3
Lignite-coal	110	2,1
Carbonate	93	1,8
Phosphate	129	2,5
Black shale	104	2,0
Total	5230	100



<http://infcis.iaea.org>

Recursos Convencionales de Uranio

El U puede ser recuperado como producto principal o bien como coproducto o subproducto de importancia

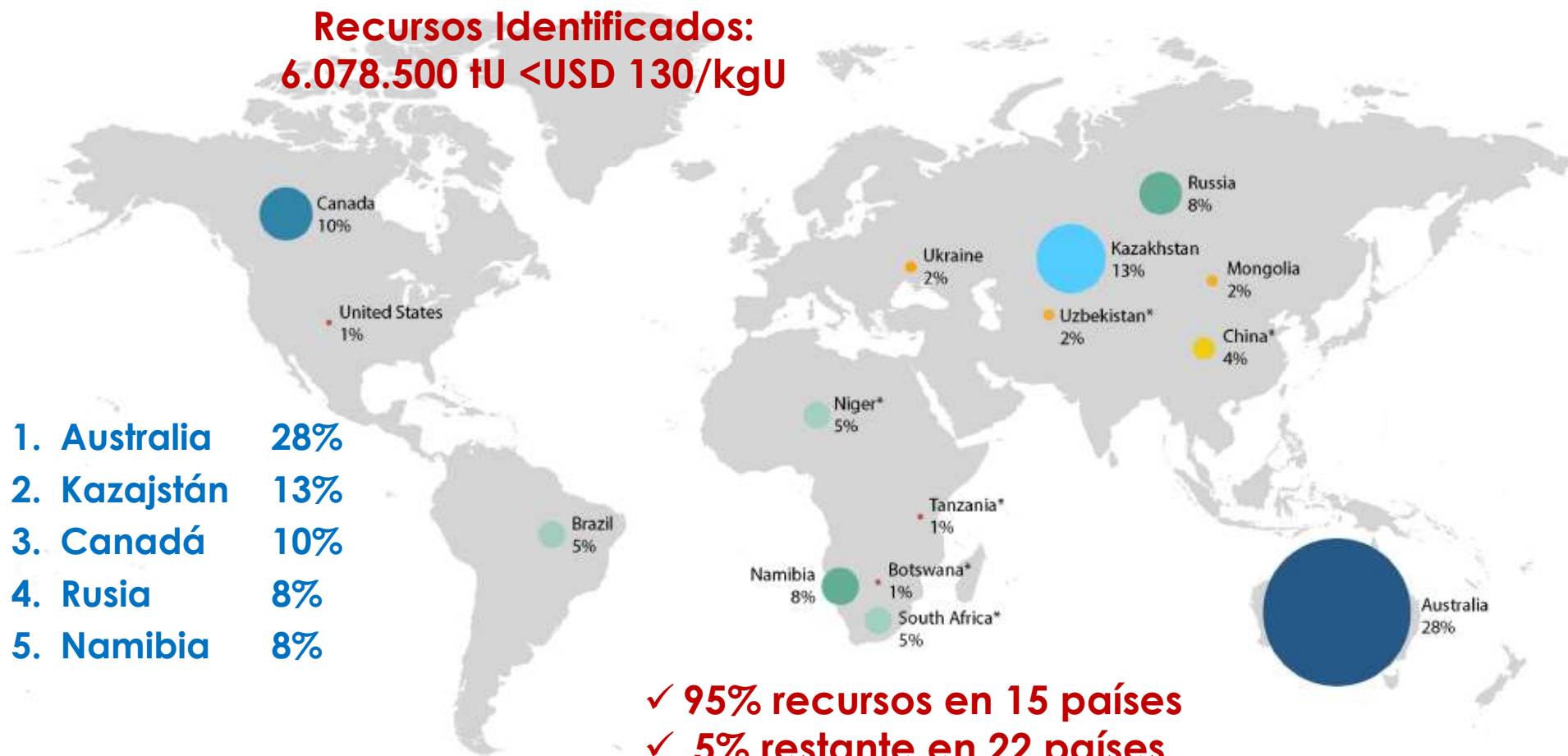


Recursos Identificados (RAR+IR) <USD 130/kgU:
(recursos razonablemente asegurados e inferidos)
6.078.500 tU (recuperables)

- ✓ 90 años de suministro al ritmo de consumo actual?
- ✓ 1 de cada 3 depósitos económicos de uranio termina siendo puesto en producción luego de ser factibilizado
- ✓ Menos del 50% potencialmente explotable por distintas cuestiones! (geopolíticas, sociales, ambientales, tecnológicas, económicas)
- ✓ Tiempo para poner un recurso en producción para atender la demanda?

Recursos Convencionales de Uranio

**Recursos Identificados:
6.078.500 tU <USD 130/kgU**



1. Australia 28%
2. Kazajstán 13%
3. Canadá 10%
4. Rusia 8%
5. Namibia 8%

✓ 95% recursos en 15 países
✓ 5% restante en 22 países

Principales Países Productores de U (2022)

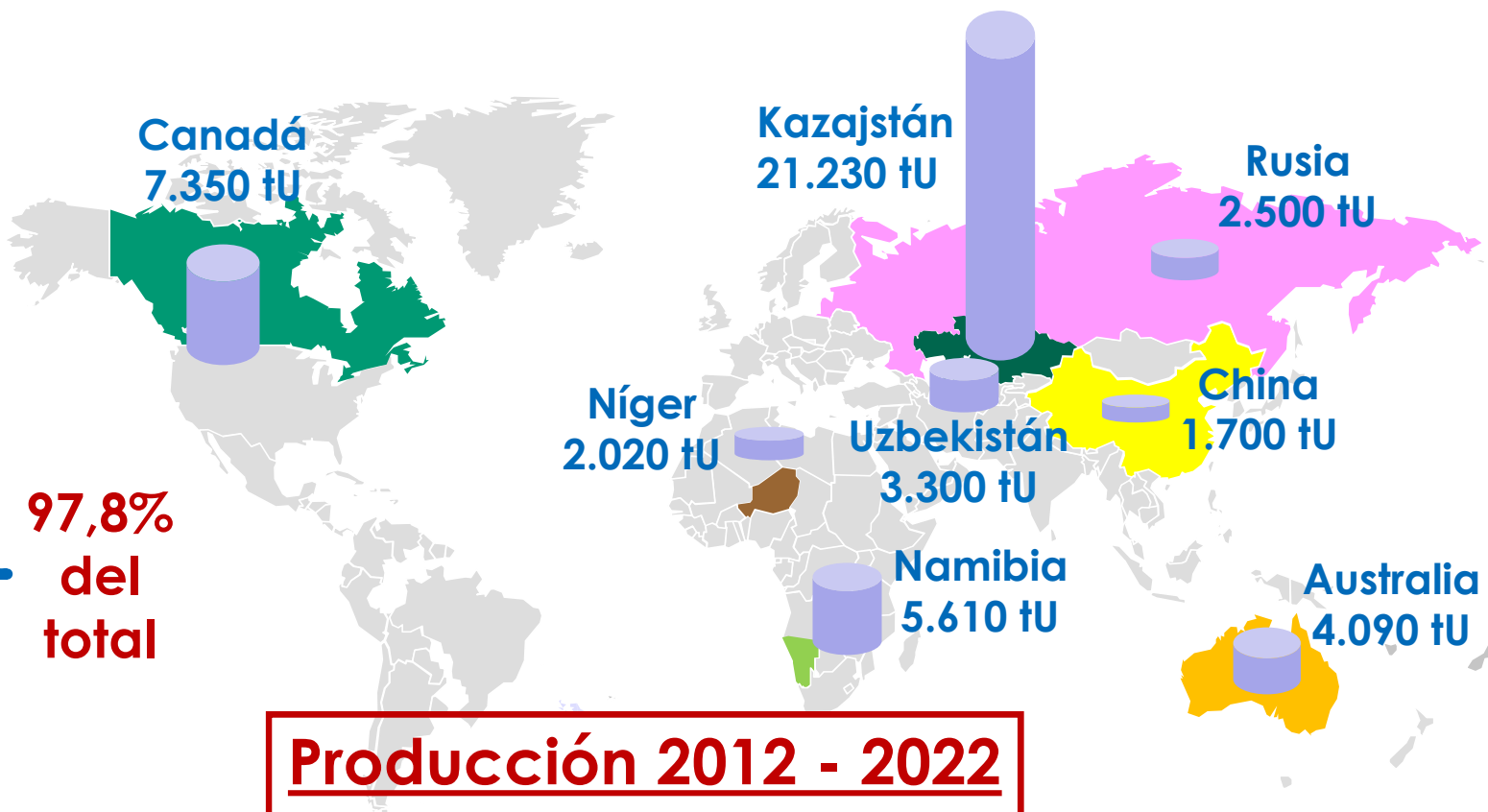
48.890 tU

✓ **74% Demanda**

✓ **436 Reactores**

1. Kazajstán	43,4%
2. Canadá	15,0%
3. Namibia	11,5%
4. Australia	8,4%
5. Uzbekistán	6,8%
6. Rusia	5,1%
7. Níger	4,1%
8. China	3,5%

**97,8%
del
total**



Producción 2012 - 2022

47.700 tU – 63.200 tU

74% - 98% Demanda

Fuentes Secundarias de Suministro de U

Fuentes Secundarias U – Enriquecimiento (DU)



- ✓ 1.600.000 t (DU)
- ✓ Re-enriquecimiento
- ✓ Combustible MOX
- ✓ Combustible Reactores Rápidos:
 - Quemado eficiente U-238
 - FNR & FBRs
 - Recursos U x 60!
- ✓ Otros usos (1,7 veces)

Colas del Enriquecimiento (DU)

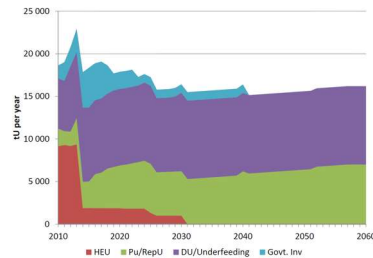


Fuentes Secundarias U – Inventarios Militares

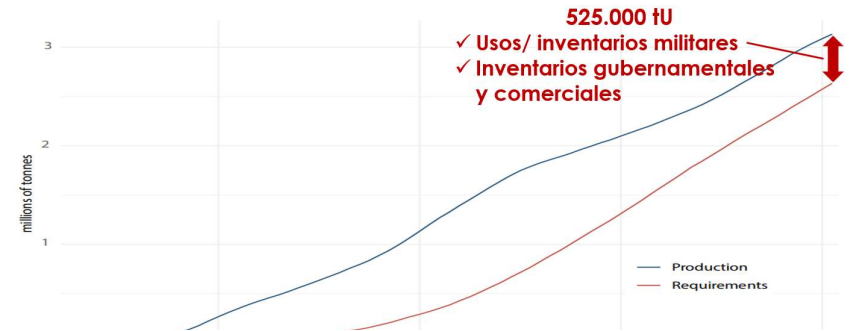
Megatons to Megawatts



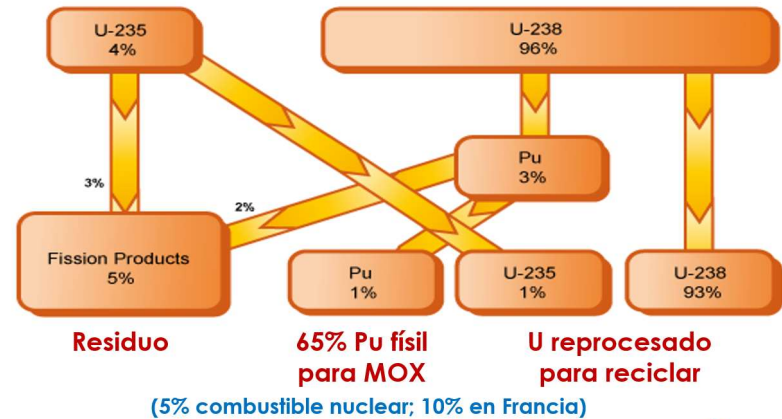
- ✓ Acuerdo Rusia-EUA (1993-2013)
- ✓ 500 t HEU (uso militar)
- ✓ 14.400 t LEU (uso en reactores)
- ✓ 120.000 tU natural!



Fuentes Secundarias U - Inventarios



Fuentes Secundarias U – Combustible Gastado



✓Recurso Reciclable

Fuente: EIA, 2012; NEA/OECD-IAEA, 2020

Fuente: WNA, 2020

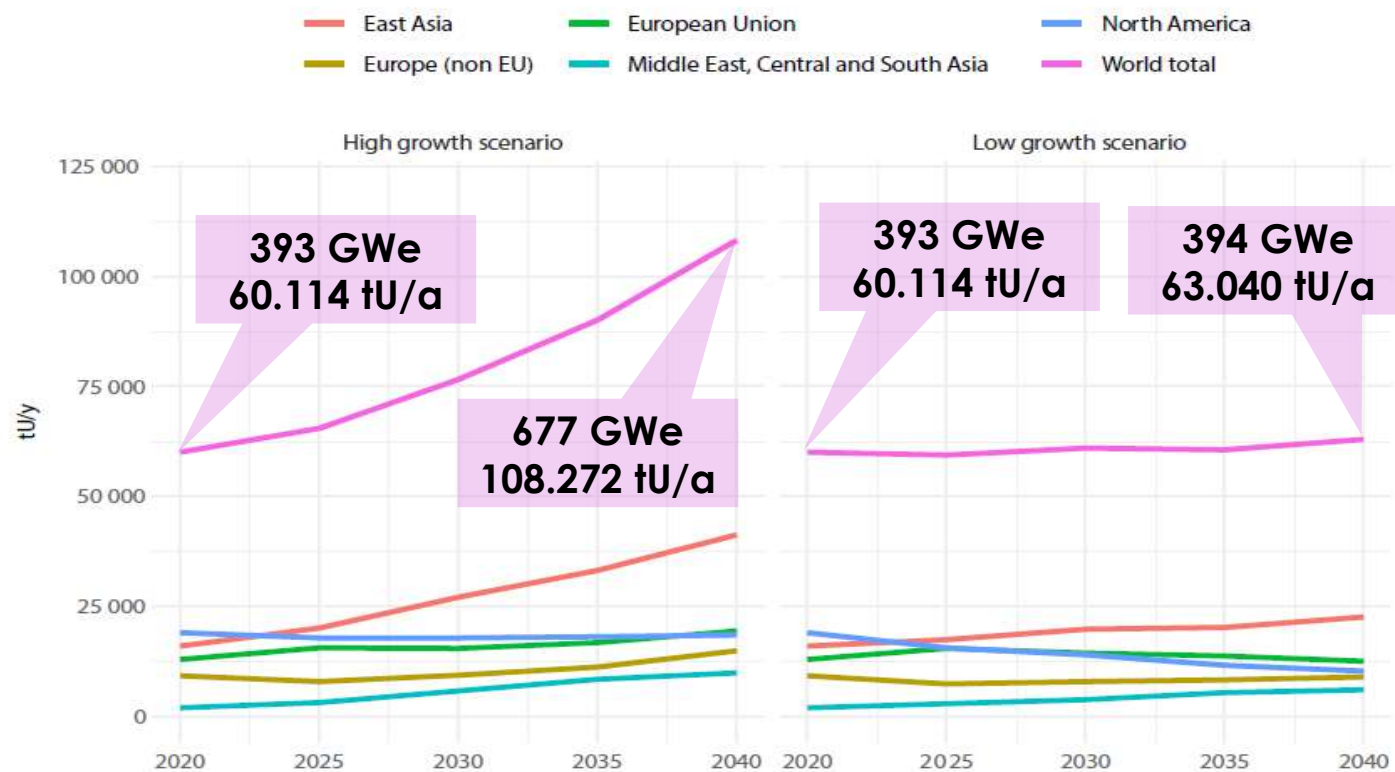
Evolución Precios U (25 años)

- ✓ Temor a la disrupción en el suministro
- ✓ Aseguramiento del suministro
- ✓ Aceleración de la transición energética
- ✓ Mayor uso de energía nuclear
- ✓ Mayor demanda de uranio
- ✓ Inversiones en exploración a futuro
- ✓ Marco de incertidumbre
- ✓ Marcada especulación



Fuente: Trading Economics, 2023; López, 2022

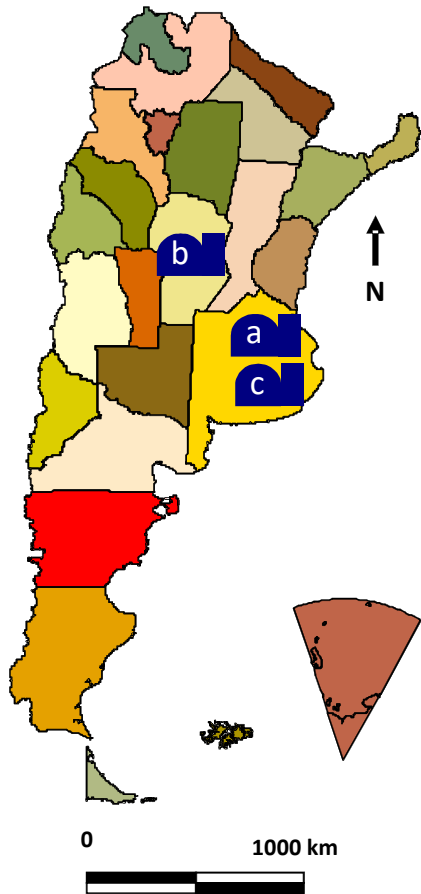
Generación y Demanda de U hacia 2040



- ✓ Los centros productivos en operación y comprometidos, sólo cubrirían el escenario de baja
- ✓ Necesidad de puesta en operación de nuevos centros
- ✓ Aporte de fuentes de recuperación secundaria e inventarios preexistentes

Uranio: Situación en la Argentina

Generación Nuclear y Demanda de Uranio



a
ATUCHA I
362 Mwe
U Levemente Enriquecido



b
EMBALSE
683 Mwe
U Natural



c
ATUCHA II
745 Mwe
U Natural



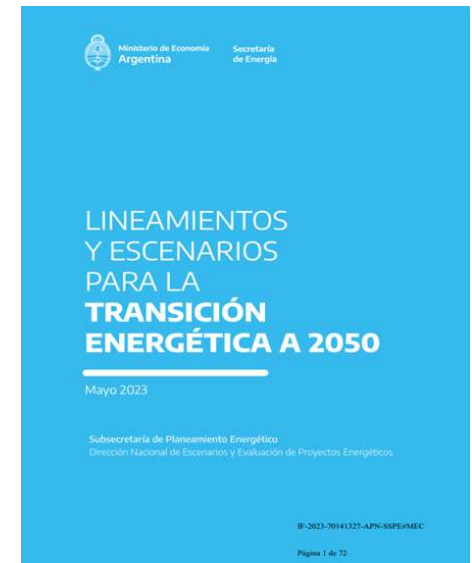
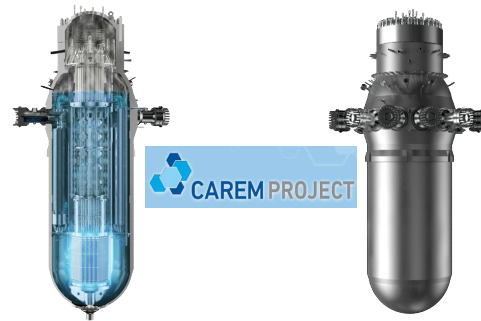
- ✓ Capacidad instalada bruta de **1.800 MWe**
- ✓ **4%** de la capacidad instalada total
- ✓ **7-8%** (**7,1%** en 2021; **5,4%** 2022) de participación en la matriz de **generación eléctrica**
- ✓ Requerimientos de uranio natural de aproximadamente **220 tU por año**

Generación y Demanda Futuras de Uranio



✓ Capacidad instalada 2035-2040: 3.800 MWe – 5.600 MWe (escenarios de baja y alta)

✓ Demanda de materia prima en 2035-2040: 600 tU/año – 870 tU/año (escenarios de baja y alta)

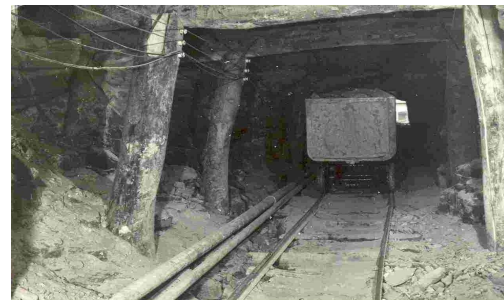
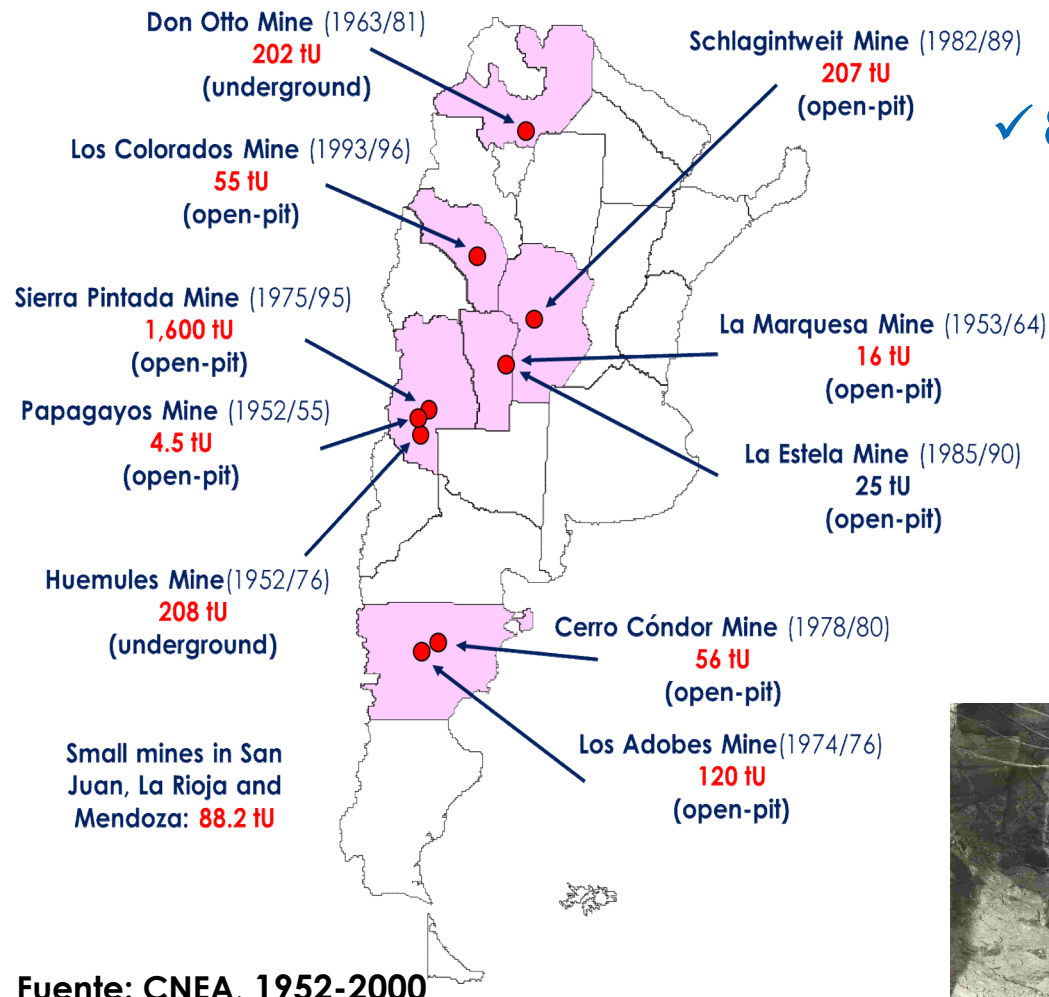


Producción de Uranio (1952-1997)

✓ 2.600 tU @ 0,1%U

✓ 82% cielo abierto; 18% subterránea

✓ volcánico, arenisca, granito



Fuente: CNEA, 1952-2000

Ciclo del Combustible Nuclear (1997-Presente)

Conversión
 UO_2
Dioxitek
S.A.



Fabricación
de
Combustible
FAE S.A.
CONUAR S.A.

Importación
UOC
Canadá,
Kazajstán,
Uzbekistán,
Rep. Checa



Producción
 D_2O
ENSI S.E.



Generación
Nuclear
NA-S.A.

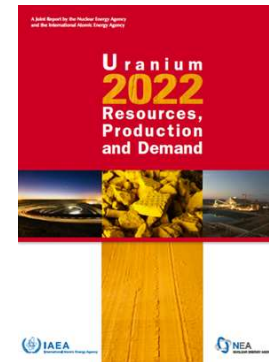
Principales Proyectos U - Argentina



✓ Prefactibilidad (stand by)



✓ NI 43-101: Resultados
Exploración, RAR, RI, PEA



Rec. Ident.
34.250 tU

≤USD130/kgU

U para 150 años?



✓ NI 43-101: Resultados
Exploración, RI, PEA

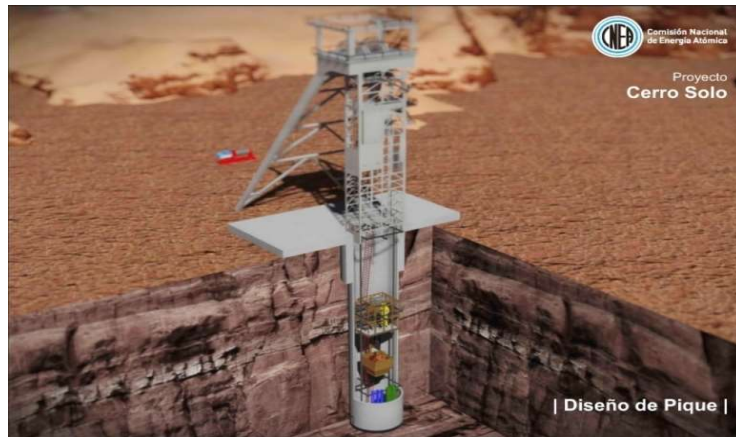
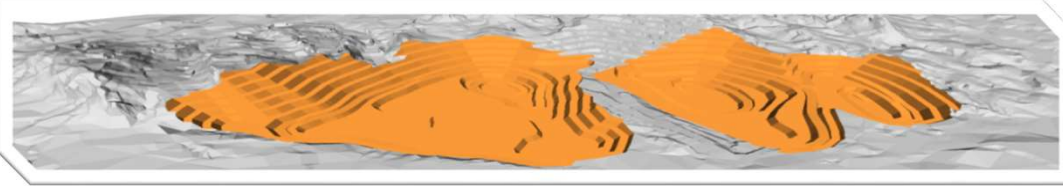
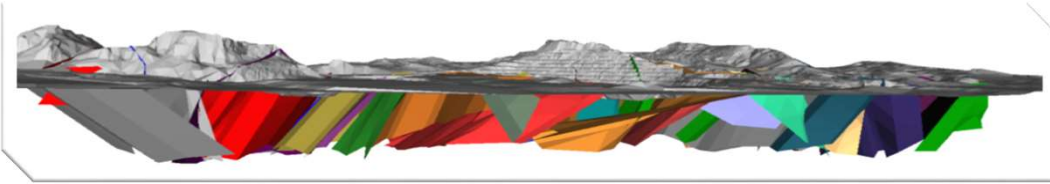


✓ Marco legal adverso
✓ DIA Remediación



✓ NI 43-101: Resultados
Exploración, RI

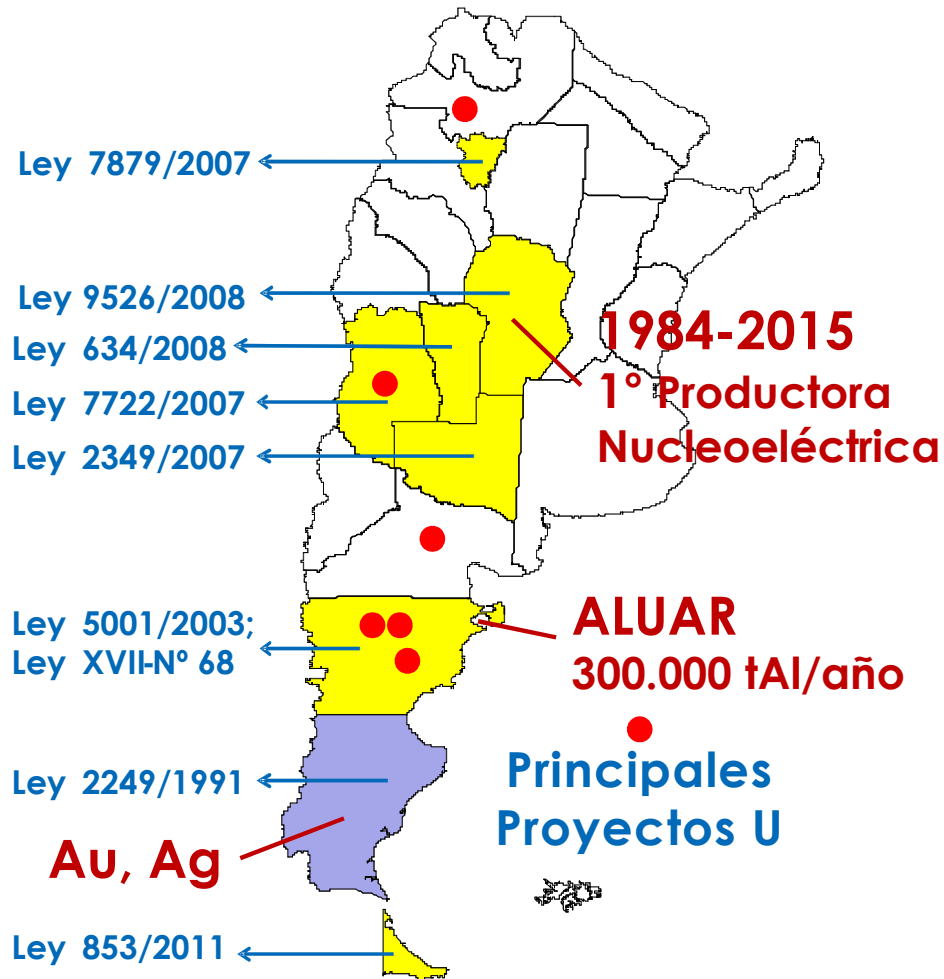
Factibilidad Técnica



- ✓ Completar **factibilidad técnica**
- ✓ Recuperación integral de U y materiales críticos asociados
- ✓ **U** → combustible nuclear
- ✓ **V, Mo** → energías renovables y siderurgia



Marco Legal



- ✓ 8 sobre 23 provincias restringen/prohíben la minería metálica
- ✓ Reformulación de leyes provinciales en relación a producción de energías limpias → **Política de Estado**

Recursos Identificados de Uranio

Mendoza:

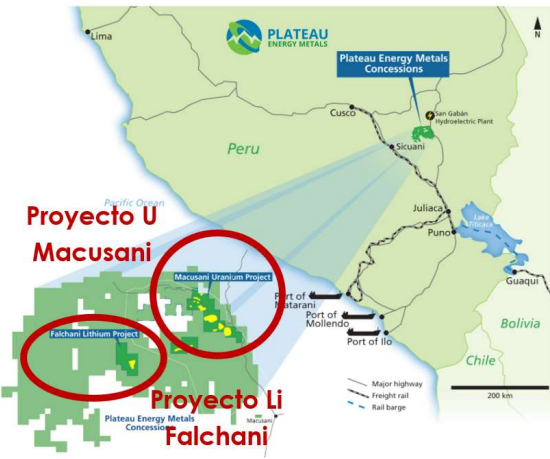
- ✓ 53% CNEA
- ✓ 29% Total

Chubut:

- ✓ 44% CNEA
- ✓ 48% Total

Potencial Suministro Argentino en la Región

- ✓ **Brasil:** productor U; expansión de Caetité; operación P+U en Santa Quitéria
- ✓ **Perú:** desarrollo del Proyecto U Macusani – Proyecto Li Falchani
- ✓ **Paraguay:** desarrollo de proyectos U/ISL en la Cuenca del Paraná

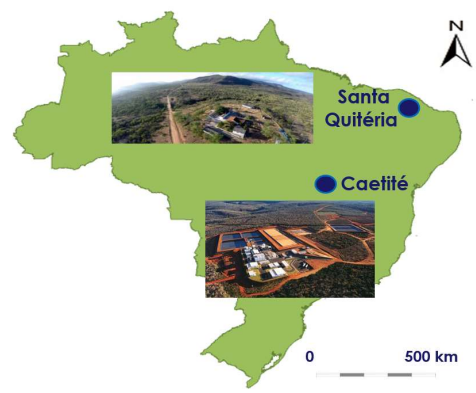


Análisis Económico Preliminar (PEA)

- ✓ Reservas: **23.500 tU**
- ✓ Inversión inicial: **USD 300 M**
- ✓ Producción: **2.350 tU/año**
- ✓ Tenor medio: **0.025% U**
- ✓ Vida de mina: **10 años**
- ✓ Costo producción: **USD 45/kgU**

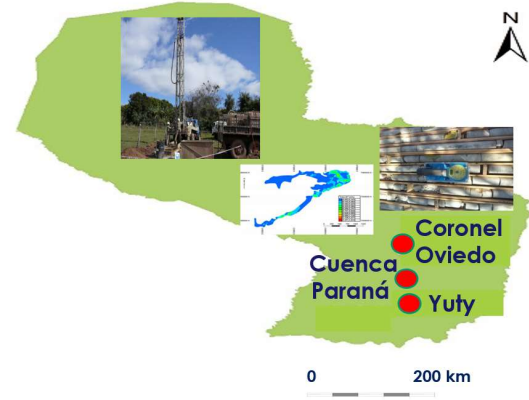
Perú

Suministro en la Región - Brasil



- ✓ Reinicio producción UOC en **2020 en Caetité**
- ✓ Expansión Caetité → **800 tU/año**
- ✓ Operación Santa Quitéria → **1.960 tU/año**
- ✓ **1.050.000 tP₂O₅/año**
- ✓ **2.760 tU/año** → excedente significativo de uranio a partir de 2026-2028
- ✓ Apertura de la **legislación** para la minería del U

Fuente: NEA/OECD-IAEA, 2020; INB, 2022



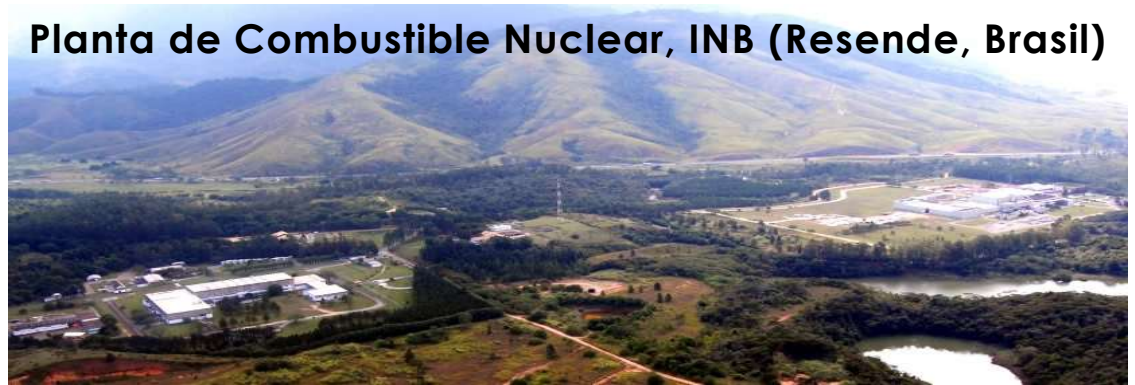
Paraguay

- ✓ Yuty → **4.290 tU** (Recursos Identificados)
- ✓ Cuenca Paraná → **770 tU** (Recursos Inferidos)
- ✓ Cnel. Oviedo → **8.900-21.500 tU** (Recursos Pronosticados)
- ✓ Pruebas hidrogeológicas → Factibilidad minería **U por ISL**

Suministro en la Región: Brasil

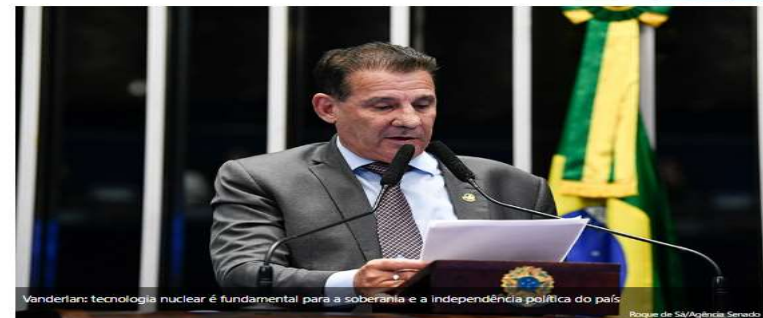
- ✓ 2016-2022 Indústrias Nucleares do Brasil (INB) proveyó a Conuar S.A. con aproximadamente **7-8 t de LEU**
- ✓ Fabricación del combustible de la primera carga del **CAREM** (1,8/3,1% U-235) y del combustible de **Atucha I** (0,85% U-235)
- ✓ Ley 14 514/2022 permite la **participación privada en la exploración y producción de uranio**
- ✓ Se mantiene el **monopolio de INB**
- ✓ Se esperan **inversiones del sector privado**
- ✓ **5% recursos identificados de U a nivel mundial!**

Planta de Combustible Nuclear, INB (Resende, Brasil)



Senado aprova participação privada na exploração de minérios nucleares

Da Agência Senado | 07/12/2022, 23h57



Vanderlan: tecnologia nuclear é fundamental para a soberania e a independência política do país

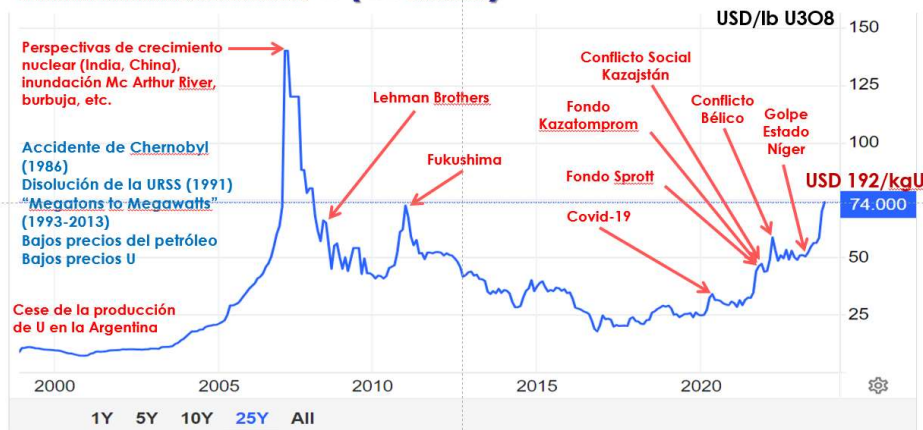
Roque de Sá/Agência Senado

Importación de Uranio

- ✓ Se afrontará un sustancial **incremento en los costos de la importación**
- ✓ Dioxidek suscribió un contrato con Kazatomprom para la **provision de 175 tU/año (2023-2025)**
- ✓ Precio promedio spot de 8 semanas anteriores a la fecha del envío



Evolución Precios U (25 años)



Fuente: Trading Economics, 2023; López, 2022

57

✓ Precio actual:

≈ USD 209/kg U
(≈ USD 80,25/lb U₃O₈)

Fuente: Trading Economics, 2023; López, 2022; Dioxidek, 2023

Uranio y Generación Nucleoeléctrica

- ✓ Costo U (Commodity) Vs. Valor Estratégico U (Servicio)
- ✓ Producción Nacional U → Seguridad Energética





Comisión Nacional
de Energía Atómica

XLVI Reunión Anual de la Asociación Argentina de Tecnología Nuclear

Minerales Nucleares: Uranio y Torio

CCK, CABA, 1 de diciembre de 2023



MUCHAS GRACIAS!

Luis López
lopez@cnea.gov.ar