



**POLITÉCNICA**



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
DEPARTAMENTO DE EXPLOTACIÓN  
DE RECURSOS MINERALES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS

## CONTROL DE LEYES EN MINERÍA

**JUAN HERRERA HERBERT**  
**JORGE CASTILLA GÓMEZ**

NOVIEMBRE 2010



**INDICE**

<b>1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>3</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>5</b>
<b>3. CAUSAS.....</b>	<b>5</b>
3.1. TOMA DE DATOS SESGADAS.....	5
3.2. EFECTO REGRESIÓN .....	5
3.3. RELACIÓN VARIANZA-ÁREA .....	6
3.4. EFECTO PEPITA .....	7
<b>4. PARÁMETROS CRÍTICOS PARA LA CONCILIACIÓN .....</b>	<b>8</b>
<b>5. SOLUCIÓN.....</b>	<b>9</b>
5.1. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA.....	9
5.2. CONTINUIDAD DE LA MINERALIZACIÓN.....	10
5.3. MÉTODO DE INTERPOLACIÓN .....	10
<b>6. CONCILIACIÓN .....</b>	<b>11</b>



## 1. ANTECEDENTES

El control de las leyes del mineral que se alimenta a la planta o a la trituradora primaria para su proceso, tiene su inicio desde la planificación de la malla de perforación, la cual se diseña en función de las calidades de las reservas expuestas conocidas a través de la exploración geológica con una malla mucho más amplia. Digamos, como ejemplo, que si la investigación se había efectuado con una malla de 50 x 50 se deberá cerrar a 25 x 25 para la planificación y control a medio plazo y finalmente la malla de los barrenos de voladura o si esta no es necesaria habrá que perforar para obtener unas muestras de cada metro de altura del banco a explotar en una malla de 5 x 6 o 7 x 8.

Se definen como **reservas expuestas**, aquellas cuya explotación se puede iniciar en forma inmediata sin tener que arrancar una sola tonelada de material estéril, hasta alcanzar en cada banco, el ángulo de trabajo. El talud de trabajo determina el ancho de los bancos en operación y, en la industria minera, se define como la relación que existe entre el ancho y la altura promedio de los bancos en explotación. Tales pendientes se seleccionan después de cuidadosas consideraciones relacionadas con todas las actividades que se desarrollarán en el banco o nivel en cualquier etapa. Adicionalmente, se deberá tomar en cuenta la resistencia del material, el ángulo de reposo en el cual el material resulta estable, los efectos de las condiciones climatológicas imperantes en la zona sobre el material, la naturaleza y grado de alteración de la roca y las características de las estructuras geológicas dentro del área de las áreas en evaluación. El talud de trabajo, previa evaluación de los factores antes citados, suele fluctuar entre 18° y 30°, dependiendo de la capacidad y de la holgura de los equipos de carga y transporte: a mayor tamaño del equipo, menor ángulo de trabajo, por ejemplo para una altura del banco de 10 metros es normal tener una anchura de banco de unos 40 m, lo que nos da un talud de trabajo de unos 20°.

En el caso de mercados de minerales que se venden y compran como **minerales “crudos”** (sin ningún proceso mineralúrgico previo), éstos establecen unos reglamentos en sus contratos de maquila (costo del proceso de tratamiento por tonelada de mineral crudo), que se expresan generalmente bajo la forma de una bonificación o de una penalización particular por unidad (%) de las impurezas del mineral, a partir de un contenido que se toma como base. También existen penalizaciones o bonificaciones en el contenido del mineral principal (% ó gr/ton), a partir de una ley pactada entre la empresa compradora y la empresa productora (mina). En los casos descritos, el control de leyes juega un papel de primera importancia, dado que ello conlleva los beneficios de las empresas y una deficiente estimación en dicho control, puede llevar al fracaso o a la bancarrota.

Para cada área, país o continente pueden existir unos parámetros diferentes. La siguiente fórmula continental, para el caso de un mineral de hierro, puede dar una idea más clara de la mecánica a seguir en este tipo de estimaciones comerciales:

$$V = P \left( \frac{100 - h}{100} \right) + (L - L_0) \cdot K$$

Donde

- V = Valor por tonelada de mineral crudo.
- P = Cotización de la tonelada de mineral seco (\$/ton)
- H = Porcentaje de humedad total ( $H = 100 - h/100$ )
- h = Humedad del mineral
- L<sub>0</sub> = Ley base del contrato
- L = Ley de metal (resultado del análisis de laboratorio del mineral seco)
- K = Factor de aumento o penalización en la cotización por tonelada, respecto a la ley base del contrato “L<sub>0</sub>”



La formula anterior proporciona el valor del contenido metálico, partiendo de un precio base para una ley y unas especificaciones determinadas, ya sea por aumento o por disminución de precio debido a las diferencias que puedan producirse, a partir de las especificaciones de base.

Por ello el control de calidad o de las leyes para conseguir no solamente la media esperada, sino también que las desviaciones o variaciones sobre ese valor estén dentro de un margen aceptable por las condiciones comerciales y no solo para el mineral principal sino incluso para los valores de los contenidos que puedan penalizar o dar mayor valor al producto vendible.

La base esencial de una buena calidad en el control y en la homogeneidad de las leyes no solo está en un magnifico programa informático de comparación y control de los datos entre lo programado y lo obtenido realmente sino también en la rápida respuesta y segura de un laboratorio de la mayor calidad, ya que generalmente el número de muestras y análisis que hay que llevar a cabo puede ascender a varios miles por día, ya que además de las muestras de los barrenos y los sondeos es preciso comprobarlas y compararlas con las que recibe la planta, aunque cada vez más el control en la planta en tamaños ya molidos (inferiores a 1mm) se suele llevara a cabo mediante sistemas automáticos por rayos X o espectrógrafos de absorción atómica directamente.



## 2. INTRODUCCIÓN

Muchas de las minas sufren una falta de conciliación entre las leyes estimadas durante investigación de un yacimiento y las leyes reales enviadas a molienda durante la explotación de la mina. Esto sucede a pesar de un adecuado muestreo y control de leyes y, en muchas ocasiones, a pesar de un buen control geológico. Este problema es debido, usualmente a la **dilución**. Esto significa que las leyes obtenidas son menores de las predichas.

La necesidad de cuantificar la dilución, tanto interna (material estéril en el yacimiento) como externa (debida al proceso de extracción), es un factor importante en la previsión de la producción. Por supuesto, el factor de dilución depende de los parámetros físicos del yacimiento. Por ejemplo, a mayor complejidad de geometría, más probable será el potencial de dilución durante la explotación del mismo. Del mismo modo, bancos más pequeños permiten mayor control y, por tanto, menor dilución. El método de explotación en general, afectará en la selectividad de la operación.

¿Qué es exactamente la **dilución**? La dilución es el efecto de la disminución de la concentración de mineral (ley de mineral) en un yacimiento. Este término es una explicación adecuada para una serie de relaciones complejas que dan lugar al fenómeno observado.

## 3. CAUSAS

### 3.1. TOMA DE DATOS SESGADAS

La primera y más obvia causa del tema que nos ocupa es el sesgo en el programa de muestreo. Por ejemplo, en ciertos casos el muestreo en barrenos puede, sobrestimar o subestimar la ley real de un yacimiento. Una completa investigación desde el principio de los estudios de viabilidad incluyendo análisis de diferentes fracciones de tamaño, diferentes masas de muestra y con repetitividad, deberían determinar si es probable que los datos obtenidos estén sesgados. Un problema común es existan zonas de mineral secundario o depósitos de pequeña escala. La representación más precisa se obtiene para muestreos lo suficientemente grandes como para incluir estas estructuras. Si los muestreos son muy pequeños el sesgo tendrá una tendencia negativa, obteniendo el efecto contrario a la dilución, que son leyes mayores, durante la explotación del yacimiento. Otro problema que se encuentra frecuentemente es una tendencia en la dirección opuesta: Los barrenos pueden darnos valores de mayor ley que los reales. Esto exagera el efecto de la dilución. El sesgo en el muestreo es, probablemente, el error más difícil de medir y sin duda merece una cuidadosa consideración en las primeras etapas del proyecto.

### 3.2. EFECTO REGRESIÓN

La dilución se explica también parcialmente por el llamado "Efecto Regresión". Esta es la relación observada empíricamente a lo largo de años de explotación, por el que en muestreos de áreas de baja ley se subestiman las leyes reales explotadas y en muestreo de áreas de leyes altas, las leyes se sobreestiman. Esto es debido al hecho de que los bloques mineros tienen una distribución diferente de las leyes medias, comparado con las leyes obtenidas de toma de muestras durante la explotación.

Por lo tanto, cuando se establece la ley de corte a partir de una toma de muestras, se establece una ley de corte diferente para las leyes de los bloques reales. Hay una relación de regresión entre las leyes reales y estimadas que no es una relación 1:1.

Dada una ley de corte aplicada a muestras se corresponde con una ley diferente en el modelo de bloques. La ley real y el tonelaje por encima de la ley de corte dependen de la distribución de las leyes del modelo de bloques y la relación de regresión entre las leyes estimadas (bloques) y las reales (muestras).

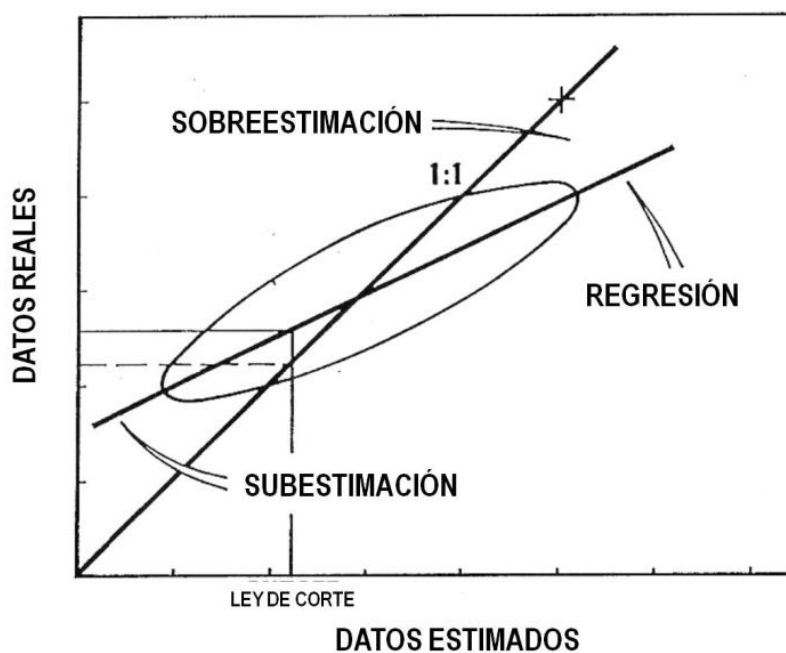


Figura 1: Efecto Regresión

### 3.3. RELACIÓN VARIANZA-ÁREA

Esto lleva a la preocupación por el tamaño y la forma de las muestras comparadas con los bloques explotados. Obviamente hay mayor variabilidad entre leyes de muestras que entre leyes de bloques. Grandes bloques tenderán a ser menos variables que bloques pequeños. Se puede hacer menos selectividad en bloques grandes y, por lo tanto, hay más dilución. Si la ley de corte está por debajo de la ley promedio, el modelo de bloques tendrá más toneladas de material entre la ley promedio y la ley de corte. (Figura 2)

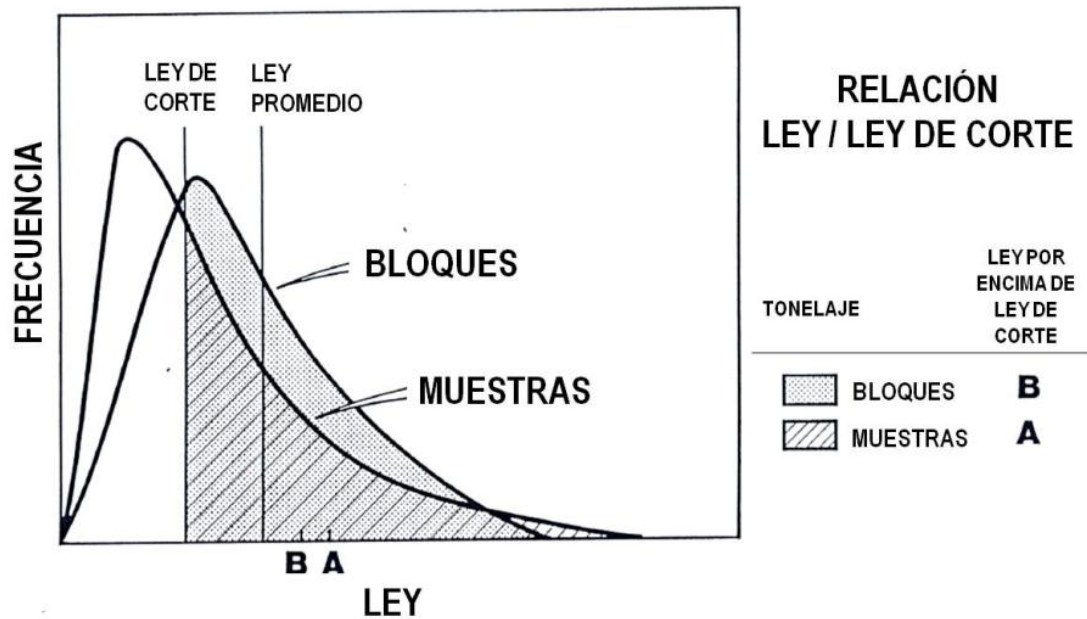


Figura 2: Ilustración de cómo para la misma ley de corte el modelo de bloques tiene mayor tonelaje a menor ley que la toma de muestras.

### 3.4. EFECTO PEPITA

Las decisiones mineras están basadas en bloques estimados a partir de leyes en muestras. ¿Cómo de acertados podemos estar sobre la representatividad de leyes de muestras individuales, asumiendo que no hay un sesgo coherente?

El efecto pepita es el hecho por el que las leyes estimadas sean muy diferentes de las reales debido a que la toma de muestras nos ha dado como resultado unas leyes anómalas que no son representativas del yacimiento real. Esto puede dar lugar a una estimación de leyes mayor, al haber encontrado leyes muy altas, pero de modo puntual.

El error de muestreo o “ruido de fondo” puede ser un problema. Incluso muestras tomadas del mismo lugar pueden ser diferentes. La variabilidad inherente o efecto pepita es más serio cuando hay estructuras a pequeña escala.



#### **4. PARÁMETROS CRÍTICOS PARA LA CONCILIACIÓN**

Los parámetros a tener en cuenta cuando se intenta conciliar la producción con las previsiones se pueden dividir en los siguientes:

- Tamaño de bloque y parámetros físicos
- Ley de corte
- Ley de planta (HEAD GRADE)
- Tonelaje

El tamaño de bloque controla la cantidad de selectividad posible. Bloques grandes tienen mayor dilución interna. La explotación de rocas duras es susceptible de dilución minera (dilución debida al proceso minero) que en rocas blandas.

La ley de corte debería ser aplicada más a bloques que a muestras, donde los bloques representan la unidad minera selectiva.

La ley de planta incluye tanto la dilución interna como la minera, pero no la recuperación del molino. El tonelaje se determina por medio de una báscula.

## 5. SOLUCIÓN

Se debe poner un gran énfasis en el cálculo de la ley de bloques para encontrar el grado de selectividad alcanzado. Una predicción correcta por encima de la ley de corte depende de la incorporación de todos los datos conocidos para llegar a una ley recuperable y un tonelaje estimado. Los puntos que se deben considerar en el cálculo de la recuperación de unidades mineras selectivas son los siguientes:

- Método de muestreo
- Frecuencia de la distribución de leyes
- Continuidad de la mineralización
- Método de explotación
- Método de interpolación

### 5.1. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA

La distribución de frecuencia de leyes es un punto importante a considerar. Por ejemplo, se deberían verificar la distribución normal y log-normal de las poblaciones mixtas. Se debería hacer un esfuerzo en separar los dominios geológicos en casos de distribución de leyes bimodales. Si los datos no están normalmente distribuidos se debería cuantificar esa desviación. La figura 3 representa los dibujos de log-probabilidad para una distribución simple lognormal y para dos distribuciones mixtas log-normales. La figura 4 nos muestra el histograma de porcentaje de  $\text{SiO}_2$  derivado de una mezcla de formación férrica bandeada y goethita.

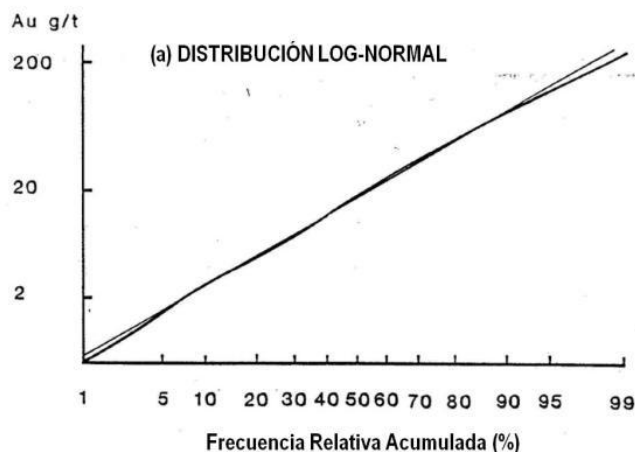


Figura 3(a): Distribución simple log-normal

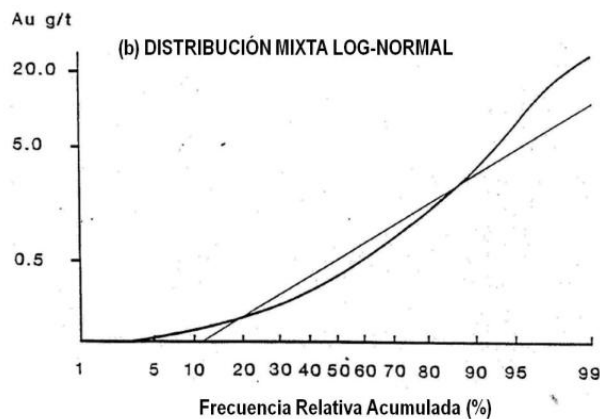


Figura 3(b): Distribución mixta log-normal

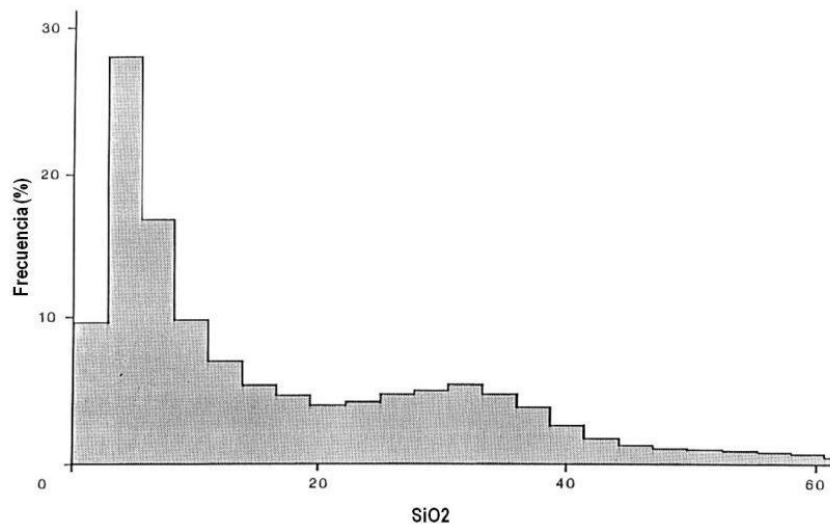


Figura 4: Histograma de distribución log-normal

## 5.2. CONTINUIDAD DE LA MINERALIZACIÓN

La continuidad de la mineralización puede ser cuantificada usando un análisis de semivariograma. Este análisis define la variabilidad general pero también el alcance de la influencia de direcciones dadas y el efecto pepita.

La continuidad geológica tiene una influencia directa en la magnitud del efecto Varianza-Área para un determinado tamaño de bloque y el método de explotación. La estructura del yacimiento, dureza de la roca y el tamaño de los equipos de operación, junto con la escala general de la misma influyen en la unidad minera selectiva.

## 5.3. MÉTODO DE INTERPOLACIÓN

El método de interpolación necesita tener en cuenta la complejidad entrelazada de todas las relaciones. La estimación puede ser mejorada por una reducción de la varianza de la estimación, por lo tanto reduciendo el Efecto Regresión. La ley de corte económica puede ser fijada en unidades de minería selectiva, no en leyes de muestras. Técnicas de aproximación adecuadas como la inversa de la distancia ponderada, o preferiblemente el "kriging", pueden

ayudar a la creación de un modelo de bloques donde la estimación de relaciones ley/tonelaje sean más cercanas a las producciones reales.

## 6. CONCILIACIÓN

La mayor parte de las anomalías de conciliación son generalmente explicadas por el efecto Varianza-Área y el Efecto Regresión.

La clasificación como mineral o estéril es sensible a si la ley de corte está basada en leyes de muestras o en leyes de bloques. La Figura 5 muestra cómo bloques de estéril reales pueden ser clasificados como mineral, basándose en leyes de muestras y cómo bloques de mineral reales pueden ser descartados como estéril. Esto es debido al Efecto Regresión. Para minimizar las áreas de error, se debe mejorar la estimación del modelo de bloques que conduce a una precisión en la varianza de la estimación, como la mostrada en la figura 6 y por lo tanto un menor potencial de errores de clasificación.

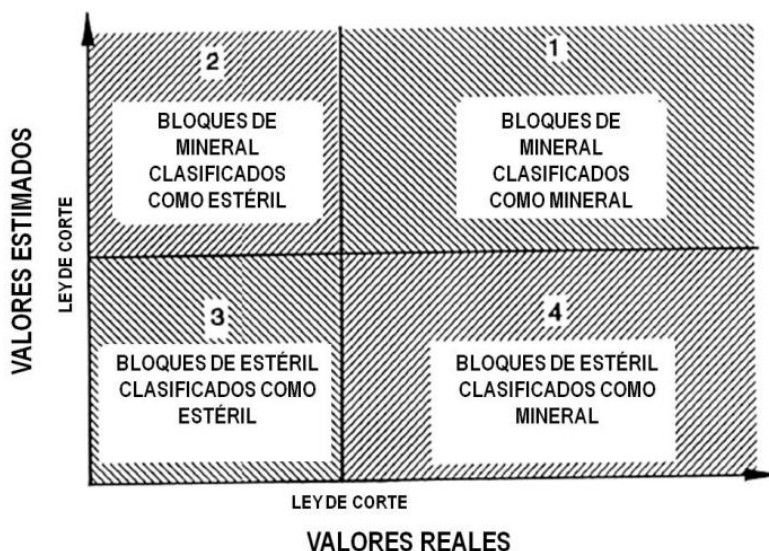


Figura 5: Clasificación Mineral/Estéril

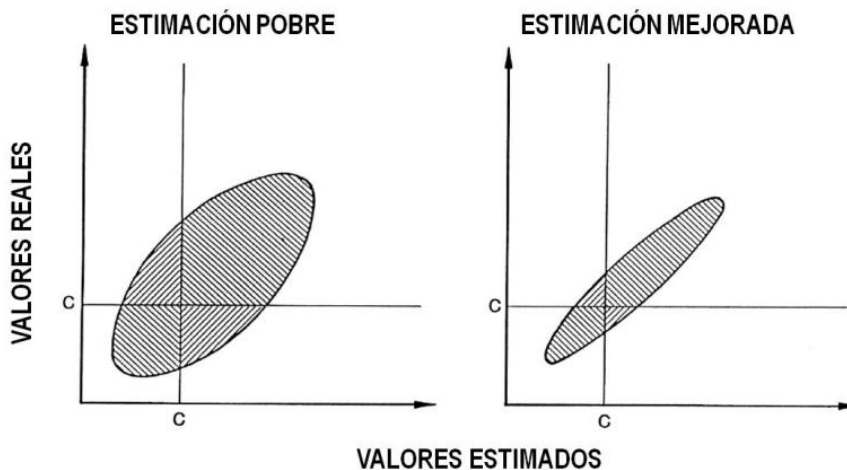


Figura 6: Efecto de una estimación mejorada



En conclusión, se debe hacer hincapié en que el control de leyes debe ser cuidadosamente vigilado y las reservas pueden ser optimizadas aplicando concienzudamente los factores descritos. Una correcta interpretación de la relación ley real / ley de corte y el rol de la variabilidad de los bloques pueden llegar incluso a ayudar en el cálculo de reservas explotables y a conciliar las diferentes estimaciones con los registros reales de producción.