



Optimización de los parámetros de perforación para perforar
la sección de 12.25 pulgadas en Campos Basin.

Proyecto OGX Oleo e Gas.

Presenta:

M. en I. Alejandro Cortés Cortés
Representante Legal ALFRA.

Contenido

- Introducción.
- Objetivos.
- Alcances de la investigación.
- Metodología.
 - ✓ Modelo matemático de velocidad de penetración.
 - ✓ Desgaste de barrenas.
 - ✓ Análisis a través de la regresión múltiple.
 - ✓ Optimización de parámetros.
- Aplicación de la metodología.
- Conclusiones y recomendaciones.

Introducción.

Introducción.

- El costo para perforar un pozo de petróleo depende de la calidad y claridad de la información contenida en el **programa de perforación**.
- El **primer paso** para diseñar un pozo es construir la **curva de límite técnico**. La construcción de la curva requiere analizar la siguiente información:
 - ✓ Premisas de diseño.
 - ✓ Ambiente de perforación.
 - ✓ Arquitectura del pozo.
 - ✓ Velocidad de penetración por fase.

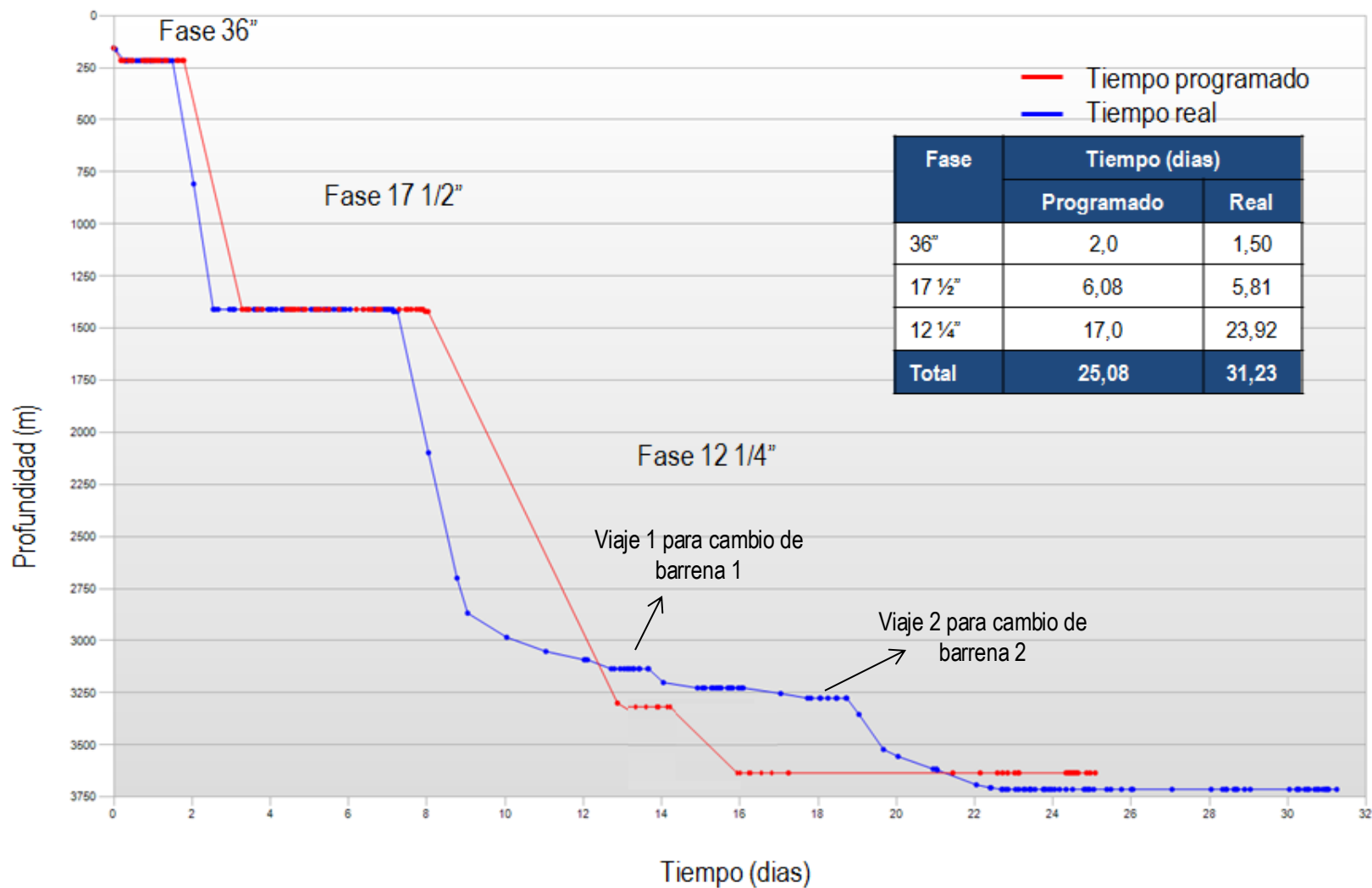
Introducción.

¿Cuándo y por qué incrementa el tiempo de perforación?

- ✓ Pozos de correlación.
- ✓ Columnas litológicas.
- ✓ Selección de parámetros de perforación.
- ✓ Configuraciones de los ensambles de fondo.
- ✓ Combinación incorrecta de parámetros de perforación y herramientas.
- ✓ Velocidad de penetración a partir de sentimientos y suposiciones.

¿Qué sucede si esta información no es bien analizada?

Introducción.



Objetivos

Objetivos

- Aplicar el método para optimizar la velocidad de penetración en formaciones abrasivas con alto esfuerzo compresivo.
- Utilizar el método de regresión múltiple para resolver las variables independientes del modelo matemático de velocidad de penetración.
- Determinar los parámetros peso sobre barrena y velocidad de rotación óptimos para determinar la velocidad de penetración.

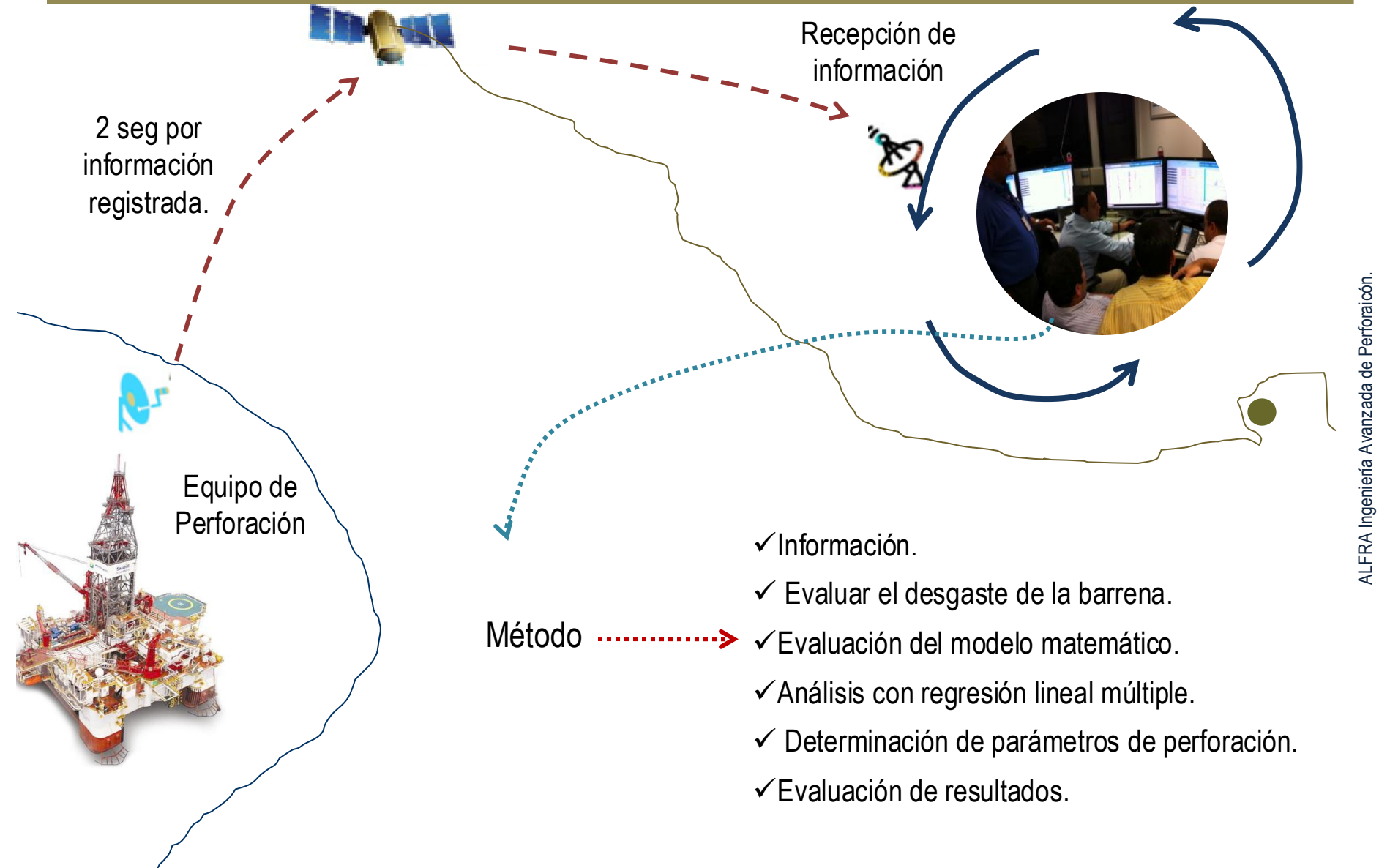
Alcances de la investigación

Alcances de la investigación.

- Aplicar el **método de regresión múltiple** para determinar el efecto de ocho variables independientes en la variable dependiente, velocidad de penetración.
- Determinar la magnitud de los **parámetros de perforación controlables** para determinar las condiciones de perforación óptimas en una región de trabajo. Posteriormente, aplicar el método y mostrar los resultados obtenidos.

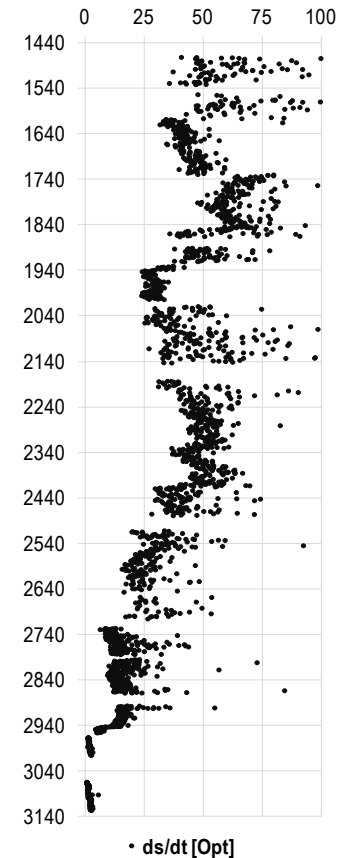
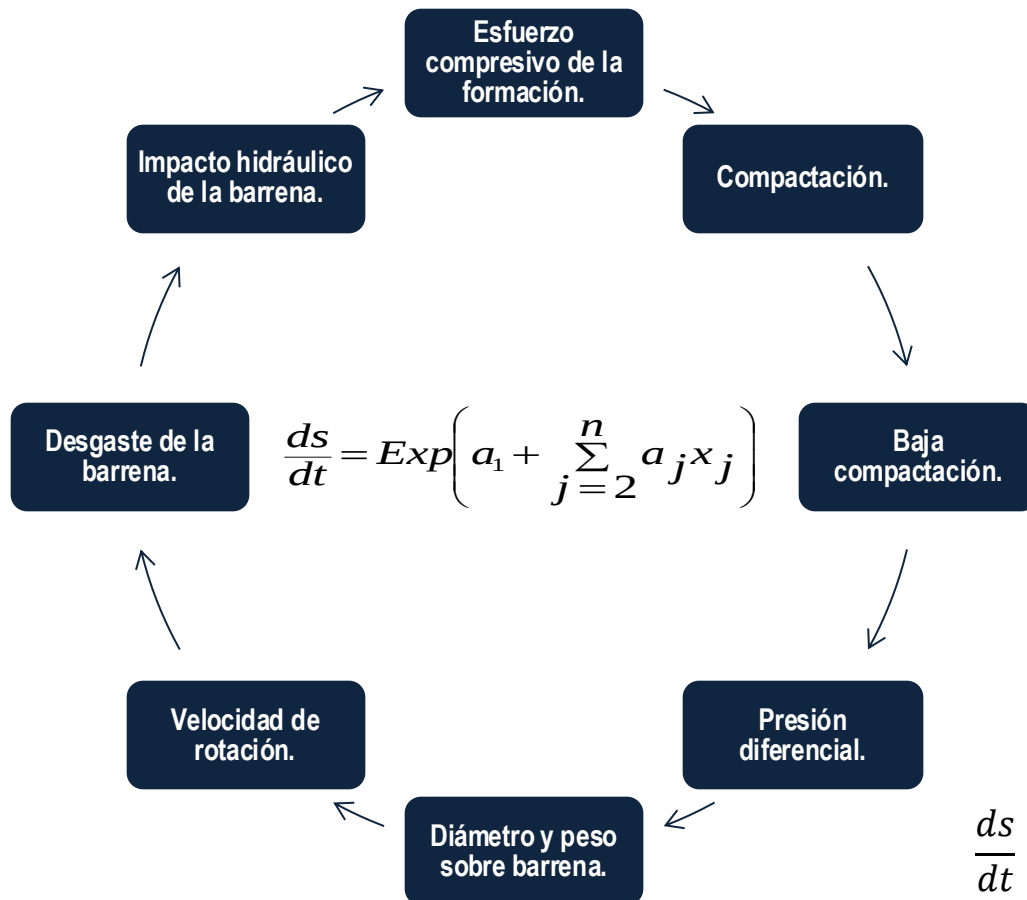
Metodología

Metodología.



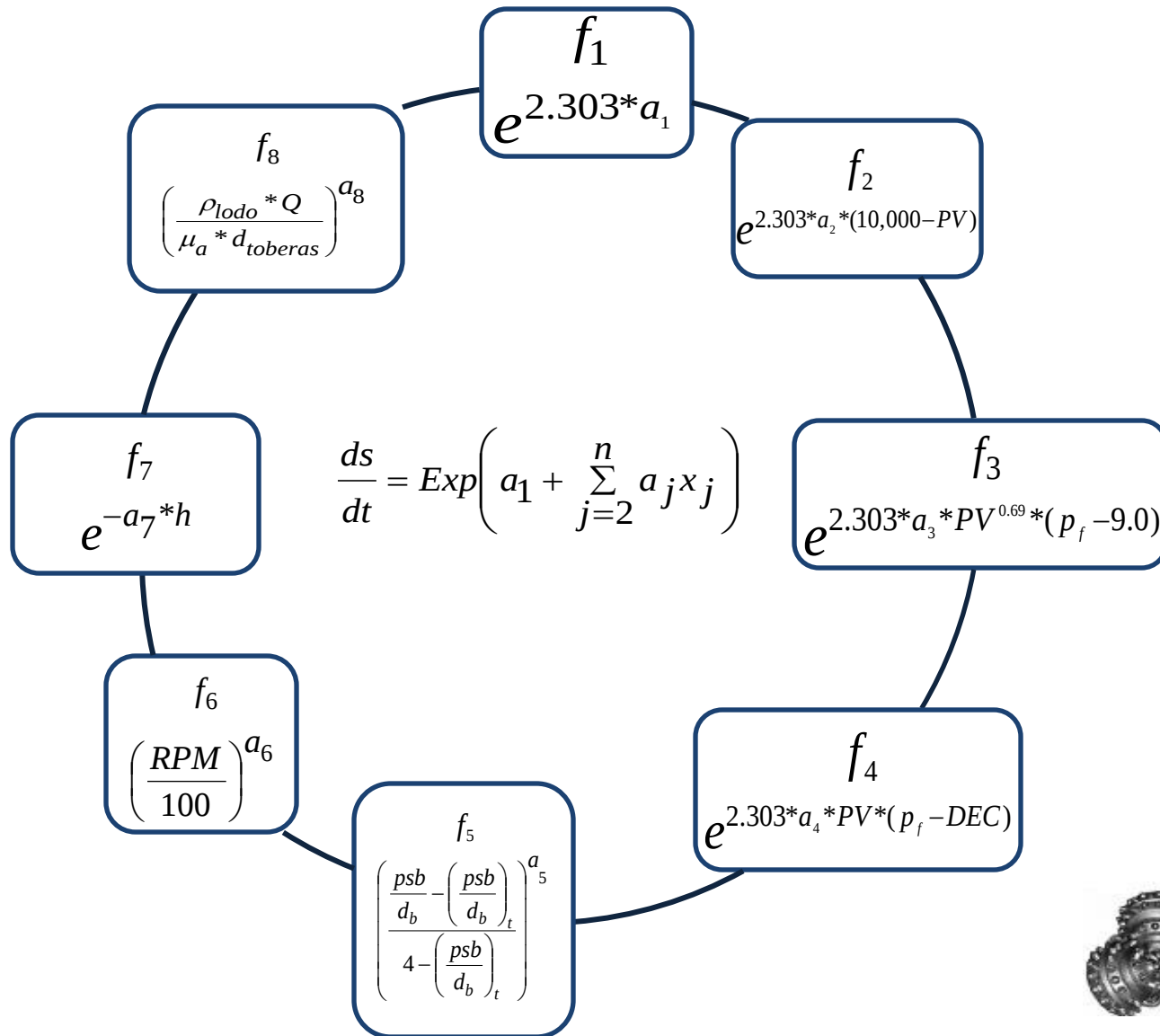
Modelo matemático de velocidad de penetración.

La velocidad de penetración, es exponencialmente igual a una constante mas la suma de una serie de variables independientes.

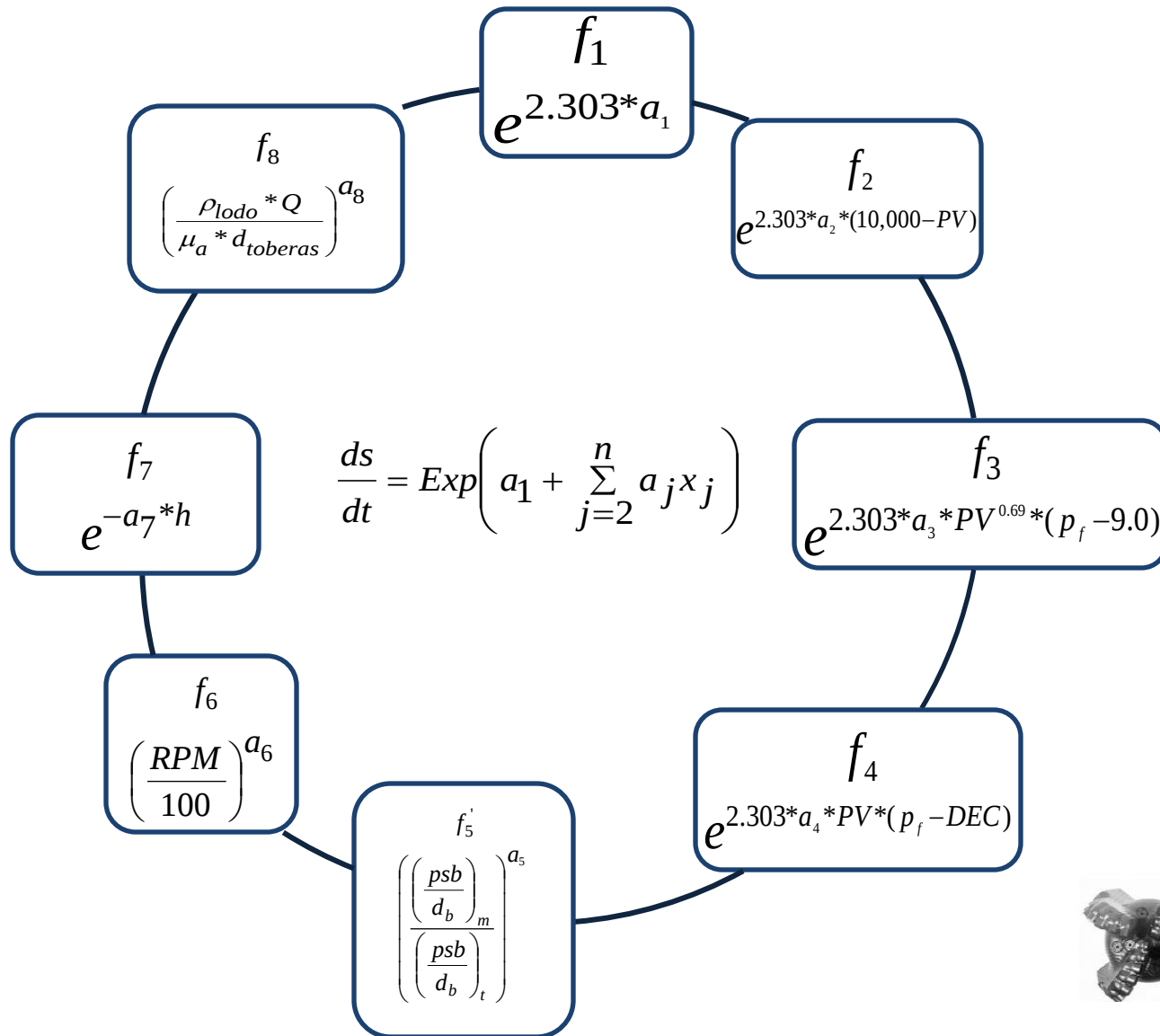


$$\frac{ds}{dt} = f_1 * f_2 * f_3 * f_4 * f_5 * f_6 * f_7 * f_8 * f_9 * f_{10} * \dots * f_n$$

Modelo para barrenas Tricónicas



Modelo para barrenas de Cortadores Fijos



Método para determinar el desgaste de la barrena.

El desgaste de la barrena calcula a través de tres términos, estos términos son:

- ✓ Abrasividad de la formación.
- ✓ Peso sobre barrena utilizado.
- ✓ Velocidad de rotación
- ✓ Geometría de los dientes.

Para barrenas tricónicas,

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\tau_H} \left(\frac{RPM}{RPM^n} \right)^{H_1} \left[\frac{\left(\frac{psb}{d_b} \right)_m - 4}{\left(\frac{psb}{d_b} \right)_m - \left(\frac{psb}{d_b} \right)} \right] \left(\frac{1 + \frac{H_2}{2}}{1 + H_2 h} \right)$$

Para barrenas de cortadores fijos,

$$\frac{dh}{dt} = \frac{H_3}{\tau_H} \left(\frac{RPM}{RPM^n} \right)^{H_1} \left[\frac{\left(\frac{psb}{d_b} \right)_n}{\left(\frac{psb}{d_b} \right)_m} \right] \left(\frac{1}{d_c \sqrt{h(2-h)}} \right)$$

Clase , IADC	H_1	H_2	$\left(\frac{psb}{d_b} \right)_{max}$
1-1 a 1-2	1.90	7.0	7.0
1-3 a 1-4	1.84	6.0	8.0
2-1 a 2-2	1.80	5.0	8.5
2-3	1.76	4.0	9.0
3-1	1.70	3.0	10.0
3-2	1.65	2.0	10.9
3-3	1.60	2.0	10.0
4-1	1.50	2.0	10.0

Método para determinar el desgaste de la barrena.

Parámetro de desgaste de los dientes de la barrena.

Para barrenas tricónicas,

$$J_2 = \left[\frac{\left(\frac{psb}{d_b}\right)_{max} - \left(\frac{psb}{d_b}\right)}{\left(\frac{psb}{d_b}\right)_{max} - 4} \right] \left(\frac{RPM^n}{RPM} \right)^{H_1} \left(\frac{1}{1 + \frac{H_2}{2}} \right)$$

Para barrenas de cortadores fijos,

$$J_2' = \left[\frac{\left(\frac{psb}{d_b}\right)_m}{\left(\frac{psb}{d_b}\right)_n} \right] * \left[\frac{RPM^n}{RPM} \right]^{H_1} * \left[\frac{1}{1 + \frac{H_2}{2}} \right]$$



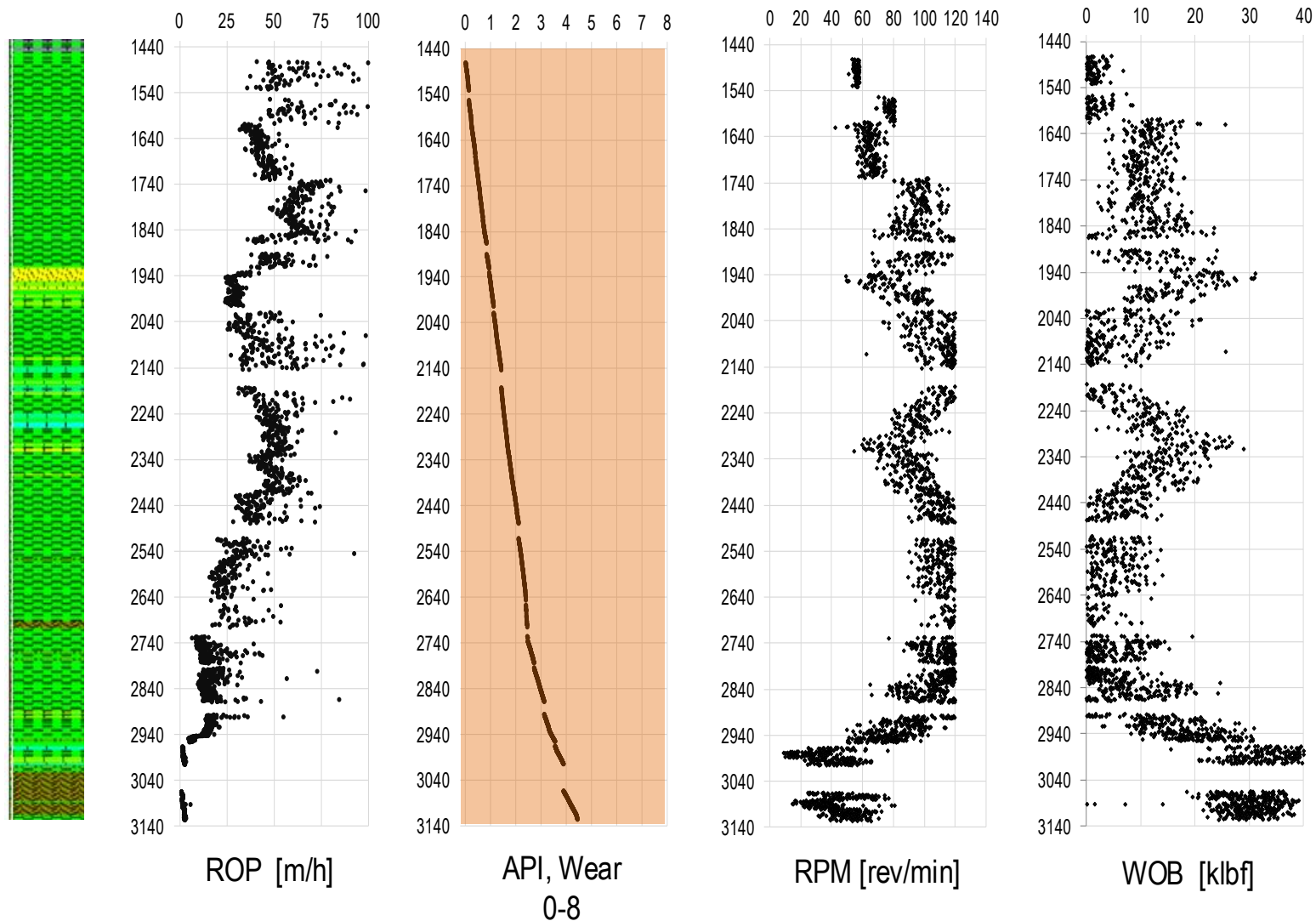
Tiempo de Rotación.

$$t_r = J_2 \tau_H \left(h_f + H_2 \frac{h_f^2}{2} \right).$$

Abrasividad de la formación.

$$\tau_H = \frac{t_r}{J_2 \left(h_f + H_2 \frac{h_f^2}{2} \right)}$$

Método para determinar el desgaste de la barrena.



Método para determinar el desgaste de la barrena.

Distancia de perforación con desgaste, es la distancia que alcanza a perforar una barrena hasta alcanzar el desgaste total.

Se define una **función de desgaste**, expresada por la siguiente ecuación:

$$J_1 = f_1 * f_2 * f_3 * f_4 * f_5 * f_6 * f_8$$

Desarrollando el modelo, se obtiene que,

$$ds/dt = J_1 * f_7 \quad \Rightarrow \quad ds = (J_1 e^{-a_7 h}) dt, \quad \Rightarrow \quad ds = (J_1 e^{-a_7 h}) J_2 \tau_H (1 + H_2 h) dh$$

El modelo que permite determinar la longitud de perforación está dado por la ecuación siguiente:

$$s = J_1 J_2 \tau_h \left(-\frac{e^{-a_7 h}}{a_7} + \frac{H_2 (e^{-a_7 h} + a_7 e^{-a_7 h})}{a_7^2} \right)$$

Método de la Regresión Lineal Múltiple.

Método de Análisis de Regresión Múltiple.

Para resolver el modelo matemático, el grupo de variables se modifica matemáticamente aplicando $\ln$ en ambos lados de la ecuación.

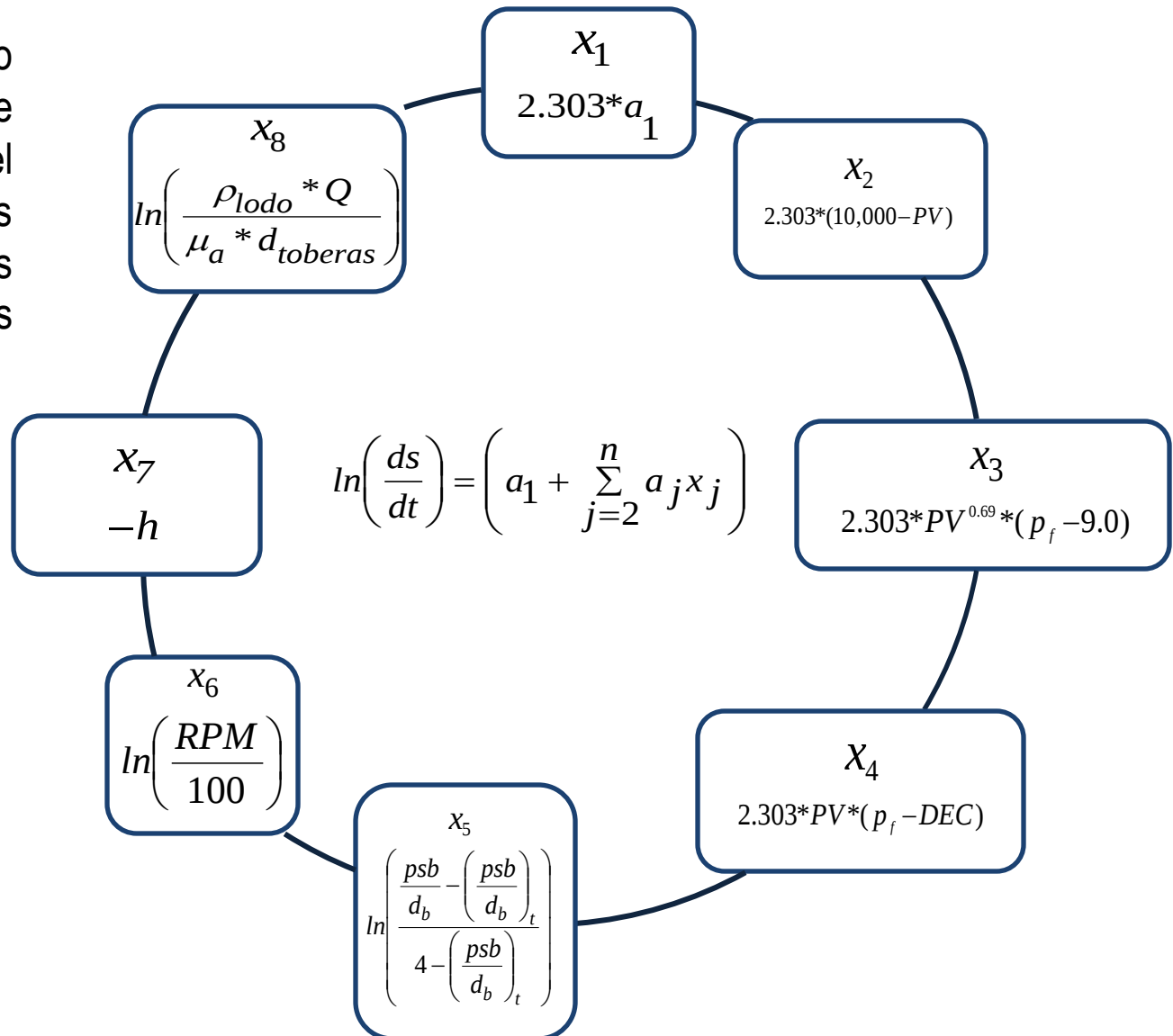
$$\ln \left(\frac{ds}{dt} \right) = (a_1 + \sum_{j=2}^n a_j x_j)$$

Obteniendo así la forma matemática que permite utilizar el método de regresión múltiple.

$$\ln \left(\frac{ds}{dt} \right) = y_i = a_1 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \cdots + a_n x_n$$

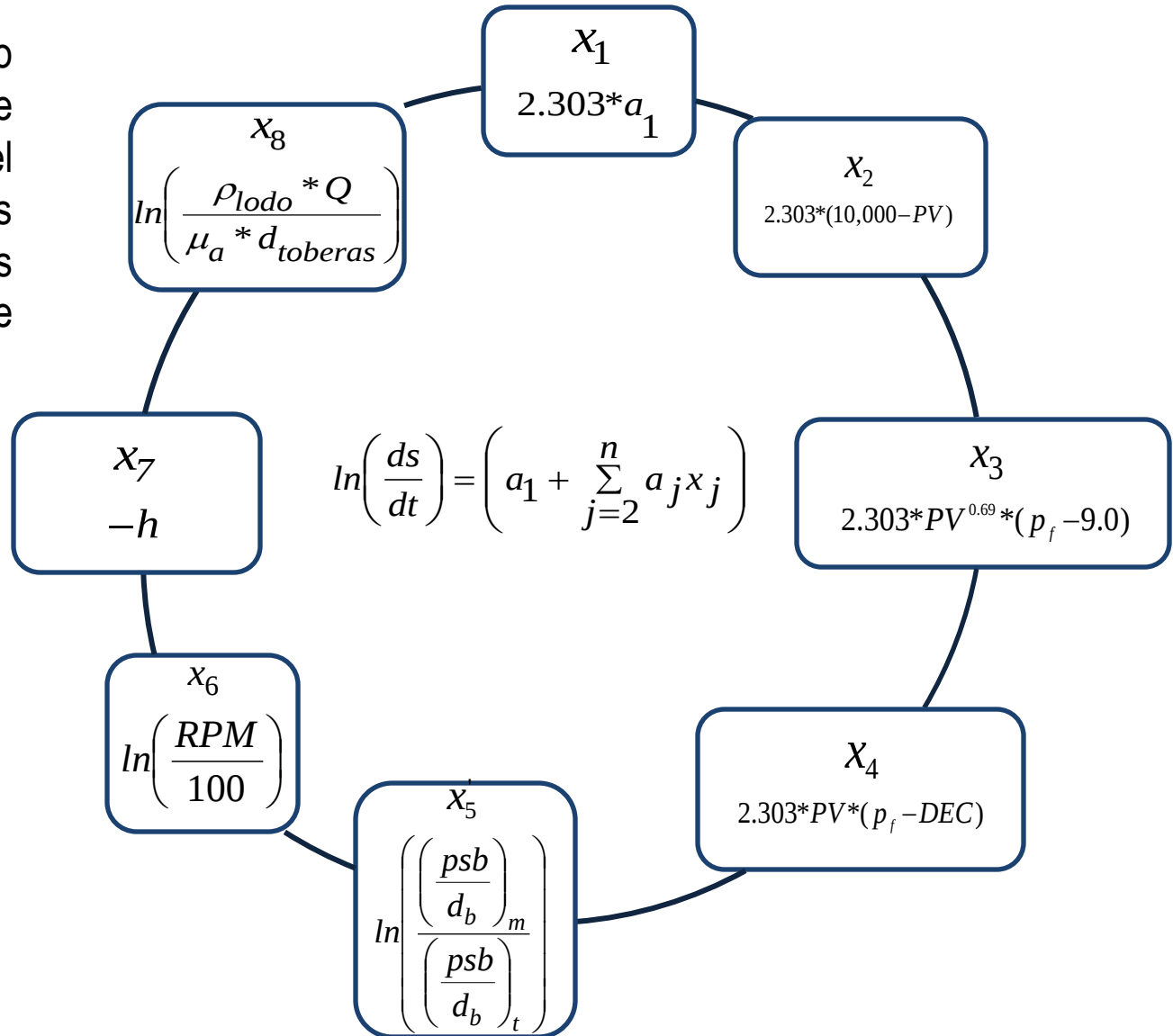
Modelo Matemático para barrenas Tricónicas

Aplicando logaritmo natural a cada una de las variables del modelo, obtenemos las siguientes ecuaciones para barrenas tricónicas.



Modelo para barrenas de cortadores fijos.

Aplicando logaritmo natural a cada una de las variables del modelo, obtenemos las siguientes ecuaciones para barrenas de cortadores fijos.



Método de Análisis de Regresión Múltiple.

Información de pozos de correlación [29].							
Profundidad [pies]	ds/dt [pies/hr]	PSB [klbm]	RPM [rev/min]	h Desgaste	Nr	DEC [lb/gal]	Presión de Poro [lb/gal]
9515	23	2.58	113	0.77	0.964	9.5	9
9830	22	1.15	126	0.38	0.964	9.5	9
10130	14	0.81	129	0.74	0.827	9.6	9
10250	10	0.95	87	0.15	0.976	9.7	9
10390	16	1.02	78	0.24	0.984	9.7	9
10500	19	1.69	81	0.61	0.984	9.7	9.1
10575	13	1.56	81	0.73	0.984	9.7	9.2
10840	16.6	1.63	67	0.38	0.932	9.8	9.3
10960	15.9	1.83	65	0.57	0.878	9.8	9.4
11060	15.7	2.03	69	0.71	0.878	9.8	9.5
11475	14	1.69	77	0.2	0.887	10.3	9.5
11775	13.5	2.31	58	0.12	0.852	11.8	10.1
11940	6.2	2.26	67	0.2	0.976	15.3	12.4
12070	9.6	2.07	84	0.08	0.993	15.7	13
12315	15.5	3.11	69	0.4	1.185	16.3	14.4
12900	31.4	2.82	85	0.42	1.15	16.7	15.9
12975	42.7	3.48	77	0.17	1.221	16.7	16.1
13055	38.6	3.29	75	0.29	1.161	16.8	16.2
13250	43.4	2.82	76	0.43	1.161	16.8	16.2
13795	12.5	1.6	81	0.56	0.272	16.8	16.2
14010	21.1	1.04	75	0.46	0.201	16.8	16.2
14455	19	1.76	64	0.16	0.748	16.9	16.2
14695	18.7	2	76	0.27	0.819	17.1	16.2
14905	20.2	2.35	75	0.33	0.419	17.2	16.4
15350	27.1	2.12	85	0.31	1.29	17	16.5
15740	14.8	2.35	78	0.81	0.802	17.3	16.5
16155	12.6	2.47	80	0.12	0.67	17.9	16.5
16325	14.9	3.76	81	0.5	0.532	17.5	16.6
17060	13.8	3.76	65	0.91	0.748	17.6	16.6
20265	9	3.41	60	0.01	0.512	17.7	16.6

Evaluación de las variables dependientes e independientes.							
Y	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
3.14	485.00	0.00	-4757.50	-2.25	0.12	-0.77	0.98
3.09	170.00	0.00	-4915.00	-3.06	0.23	-0.38	0.98
2.64	-130.00	0.00	-6078.00	-3.41	0.25	-0.74	0.91
2.30	-250.00	0.00	-7175.00	-3.25	-0.14	-0.15	0.99
2.77	-390.00	0.00	-7273.00	-3.18	-0.25	-0.24	0.99
2.94	-500.00	59.51	-6300.00	-2.67	-0.21	-0.61	0.99
2.56	-575.00	119.61	-5287.50	-2.75	-0.21	-0.73	0.99
2.81	-840.00	182.51	-5420.00	-2.71	-0.40	-0.38	0.97
2.77	-960.00	245.20	-4384.00	-2.59	-0.43	-0.57	0.94
2.75	-1060.00	308.43	-3318.00	-2.49	-0.37	-0.71	0.94
2.64	-1475.00	316.37	-9180.00	-2.67	-0.26	-0.20	0.94
2.60	-1775.00	708.53	-20017.50	-2.36	-0.54	-0.12	0.92
1.82	-1940.00	2211.12	-34626.00	-2.38	-0.40	-0.20	0.99
2.26	-2070.00	2620.82	-32589.00	-2.47	-0.17	-0.08	1.00
2.74	-2315.00	3587.51	-23398.50	-2.06	-0.37	-0.40	1.09
3.45	-2900.00	4733.21	-10320.00	-2.16	-0.16	-0.42	1.07
3.75	-2975.00	4889.93	-7785.00	-1.95	-0.26	-0.17	1.10
3.65	-3055.00	4979.88	-7833.00	-2.01	-0.29	-0.29	1.08
3.77	-3250.00	5031.08	-7950.00	-2.16	-0.27	-0.43	1.08
2.53	-3795.00	5172.98	-8277.00	-2.73	-0.21	-0.56	0.52
3.05	-4010.00	5228.47	-8406.00	-3.16	-0.29	-0.46	0.45
2.94	-4455.00	5342.51	-10118.50	-2.63	-0.45	-0.16	0.86
2.93	-4695.00	5403.55	-13225.50	-2.51	-0.27	-0.27	0.90
3.01	-4905.00	5608.29	-11924.00	-2.34	-0.29	-0.33	0.65
3.30	-5350.00	5800.64	-7675.00	-2.45	-0.16	-0.31	1.14
2.69	-5740.00	5901.94	-12592.00	-2.34	-0.25	-0.81	0.90
2.53	-6155.00	6008.87	-22617.00	-2.29	-0.22	-0.12	0.82
2.70	-6325.00	6133.13	-14692.50	-1.87	-0.21	-0.50	0.73
2.62	-7060.00	6322.36	-17060.00	-1.87	-0.43	-0.91	0.86
2.20	-10265.00	7119.82	-22291.50	-1.97	-0.51	-0.01	0.72

Método de Análisis de Regresión Múltiple.

Los coeficientes $a_n x_n$, del modelo se obtienen a través del análisis de regresión lineal múltiple.

$$y = Xa$$

En notación matricial,

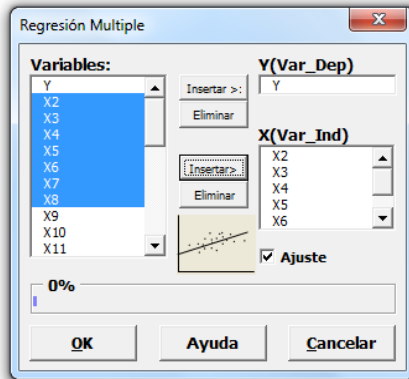
$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_{1i} & \sum_{i=1}^n x_{2i} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{ki} \\ \sum_{i=1}^n x_{1i} & \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 & \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{2i} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{ki} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ki} & \sum_{i=1}^n x_{ki}x_{1i} & \sum_{i=1}^n x_{ki}x_{2i} & \dots & \sum_{i=1}^n x_{ki}^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_{2i}y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ki}y_i \end{bmatrix}$$

En donde, n , representa el número datos de entrada y k el de funciones.

Método de Análisis de Regresión Múltiple.

Regresión Múltiple

Nota: Todas las variables deberán tener un nombre NO NUMÉRICO y deberá escribirse en el tope de cada columna.



Y	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
3.135494216	485	0	-4757.5	-2.250883719	0.122217633	-0.77	0.981835017
3.091042453	170	0	-4915	-3.058911175	0.231111721	-0.38	0.981835017
2.63905733	-130	0	-6078	-3.409394149	0.254642218	-0.74	0.909395404
2.302585093	-250	0	-7175	-3.249966412	-0.139262067	-0.15	0.987927123
2.772588722	-390	0	-7273	-3.17887049	-0.248461359	-0.24	0.991967741
2.944438979	-500	59.514	-6300	-2.673944589	-0.210721031	-0.61	0.991967741
2.564949357	-575	119.614	-5287.5	-2.753987296	-0.210721031	-0.73	0.991967741
2.809402695	-840	182.512	-5420	-2.710093103	-0.400477567	-0.38	0.965401471
2.766319109	-960	245.205	-4384	-2.594357151	-0.430782916	-0.57	0.937016542
2.753660712	-1060	308.433	-3318	-2.490637324	-0.371063681	-0.71	0.937016542
2.63905733	-1475	316.373	-9180	-2.673944589	-0.261364764	-0.2	0.941806774
2.602689685	-1775	708.526	-20017.5	-2.361425593	-0.544727175	-0.12	0.923038461
1.824549292	-1940	2211.118	-34626	-2.383308304	-0.400477567	-0.2	0.987927123
2.261763098	-2070	2620.825	-32589	-2.47112451	-0.174353387	-0.08	0.996493853
2.740840024	-2315	3587.513	-23398.5	-2.064050391	-0.371063681	-0.4	1.088577053
3.446807893	-2900	4733.212	-10320	-2.161936233	-0.162518929	-0.42	1.072380529
3.75419892	-2975	4889.928	-7785	-1.951640824	-0.261364764	-0.17	1.104888688
3.653252276	-3055	4979.876	-7833	-2.007785553	-0.287682072	-0.29	1.0774971
3.770459441	-3250	5031.083	-7950	-2.161936233	-0.274436846	-0.43	1.0774971
2.525728644	-3795	5172.976	-8277	-2.728669488	-0.210721031	-0.56	0.521536192
3.04927304	-4010	5228.472	-8406	-3.159452404	-0.287682072	-0.46	0.448330235
2.944438979	-4455	5342.506	-10118.5	-2.633359309	-0.446287103	-0.16	0.864869932
2.928523524	-4695	5403.554	-13225.5	-2.505525937	-0.274436846	-0.27	0.90486188
3.005682604	-4905	5608.294	-11924	-2.344257789	-0.287682072	-0.33	0.647302093
3.299533728	-5350	5800.642	-7675	-2.447257029	-0.162518929	-0.31	1.135781669
2.694627181	-5740	5901.936	-12592	-2.344257789	-0.248461359	-0.81	0.895544527
2.533696814	-6155	6008.874	-22617	-2.294454967	-0.223143551	-0.12	0.818535277
2.701361213	-6325	6133.132	-14692.5	-1.87425416	-0.210721031	-0.5	0.729383301
2.624668592	-7060	6322.359	-17060	-1.87425416	-0.430782916	-0.91	0.864869932
2.197224577	-10265	7119.816	-22291.5	-1.971960826	-0.510825624	-0.01	0.715541753

Comparación de resultados obtenidos con los publicados (SPE 4238).

Modelo	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
Bourgoyne	3.78	0.00017	0.00020	0.000043	0.430	0.210	0.41	0.16
Alejandro	3.99	0.000167	0.000194	0.000042	0.405	0.1813	0.398	0.4864

Método de Análisis de Regresión Múltiple.

Validación del análisis de estimación de parámetros a través del programa desarrollado.					
Análisis de Regresión Y					
Ecuación:	$Y = 3.99 + 0 X_2 + 0 X_3 + 0 X_4 + 0.41 X_5 + 0.18 X_6 + 0.4 X_7 + 0.49 X_8$				
Variación	Suma de Min_sq	Grados de Libertad	Principal Coef Pearso F	P-valor	
Regresion	4.98428134	7	0.7120402	19.6969	0.0000
Error	0.79529614	22	0.0361498		
Total	5.77957748	29			
s R-sq R-Sq(adj) 0.1901 Determinant DW 0.02314117 3.09					
Parametros					
X	Coef Est	Error Std	t valor	P-valor	VIFs
Constante	3.9930696	0.6855	5.8246	0.0000	
X2	0.0001673	0.0000	4.3836	0.0002	7.6312
X3	0.0001945	0.0000	5.5845	0.0000	6.8173
X4	0.0000425	0.0000	7.8377	0.0000	1.5747
X5	0.4053297	0.1434	2.8264	0.0098	2.8770
X6	0.1813426	0.2399	0.7559	0.4577	1.5981
X7	0.3980155	0.1773	2.2445	0.0352	1.5065
X8	0.4864567	0.2991	1.6263	0.1181	1.9160
30 observaciones fueron utilizadas en este análisis.					
Tiempo: 0.21 seg.					

Método para Optimización

Método para Optimización

El método para optimizar las variables controlables es el de Máximos y Mínimos.

$$\frac{ds}{dt} = f\left(\frac{psb}{d_b}\right), RPM, h$$

En donde

$$psb_{min} \leq psb_{opt} \leq psb_{max}$$

$$RPM_{min} \leq RPM_{opt} \leq RPM_{max}$$

Método para Optimización

- En optimización de funciones, cuando una función es derivada e igualada a cero ha sido maximizada.

$$\frac{\partial(C_p)}{\partial(psb/d_b)} = 0$$

- Para comprobar el método, se resuelve la segunda derivada de la ecuación a fin de encontrar los mínimos y máximos relativos a la función

$$\frac{\partial^2(C_p)}{\partial(psb/d_b)^2} > 0, \text{ entonces se obtiene el mínimo relativo, sí}$$

$$\frac{\partial^2(C_p)}{\partial(psb/d_b)^2} < 0, \text{ entonces se obtiene el máximo relativo.}$$

Método para Optimización

- En optimización de funciones, cuando una función es derivada e igualada a cero ha sido maximizada.

$$\frac{\partial(C_p)}{\partial(RPM)} = 0$$

- Para comprobar el método, se resuelve la segunda derivada de la ecuación a fin de encontrar los mínimos y máximos relativos a la función

$$\frac{\partial^2(C_p)}{\partial(RPM)^2} > 0, \text{ entonces se obtiene el mínimo relativo, sí}$$

$$\frac{\partial^2(C_p)}{\partial(RPM)^2} < 0, \text{ entonces se obtiene el máximo relativo.}$$

Método para Optimización

Utilizando la ecuación de costo de perforación por distancia perforada,

$$C_p = \frac{C_b + C_e(t_v + t_c + t_r)}{\Delta s}$$

Sustituimos la ecuación de distancia de perforación y tiempo de rotación tenemos la siguiente expresión:

$$C_p = \frac{C_r}{(J_1 e^{(-a_7 h)} J_2 \tau_H (1 + H_2 h) dh)} \left(\frac{C_b}{C_r} + t_t + t_c + J_2 \tau_H \int_0^{h_f} (1 + H_2 h) dh \right)$$

Arreglando términos, tenemos

$$C_p = \frac{C_r}{e^{(-a_7 h)} (1 + H_2 h) dh} \left(\frac{\frac{C_b}{C_r} + t_t + t_c}{J_1 J_2 \tau_H} + \frac{\int_0^{h_f} (1 + H_2 h) dh}{J_1} \right)$$

Método para Optimización

La ecuación para optimizar el peso sobre barrena requerido para barrenas tricónicas, está representado por la expresión siguiente:

$$\left[\frac{psb}{d_b} \right]_{opt} = \frac{a_5 H_1 \left(\frac{psb}{d_b} \right)_{max} + a_6 \left(\frac{psb}{d_b} \right)_t}{a_5 H_1 + a_6}$$

Para optimizar la velocidad de rotación, está representado por la expresión siguiente:

$$[RPM]_{opt} = RPM^n \left[\frac{\tau_H}{t_b} \frac{\left(\frac{psb}{d_b} \right)_{max} - \left(\frac{psb}{d_b} \right)_{opt}}{H_{3*} \left(\frac{psb}{d_b} \right)_{max} - 4} \right]^{\frac{1}{H_1}}$$

Método para Optimización

La ecuación para optimizar el peso sobre barrena requerido para barrenas de cortadores fijos, está representado por la expresión siguiente:

$$\left(\frac{psb}{d_b}\right)_{opt} = \frac{H_1 \left[-a_5 \left(\frac{psb}{d_b}\right)_m + \left(\frac{psb}{d_b}\right)_n \right]}{H_1 - a_6}$$

Para optimizar la velocidad de rotación, está representado por la expresión siguiente:

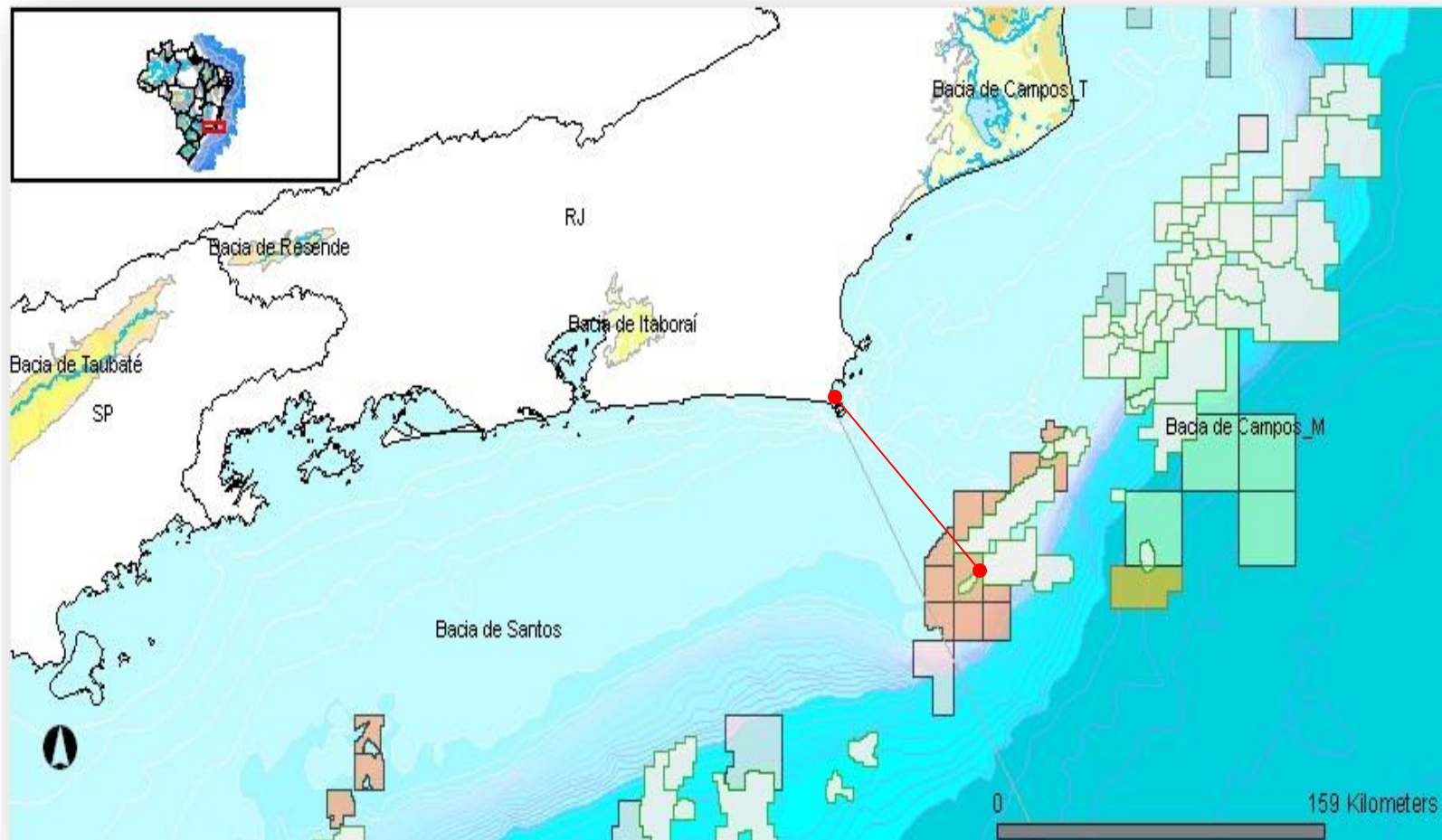
$$[RPM]_{opt} = \frac{RPM^n}{\left[\frac{t_r * H_3}{\tau_H} \frac{\left(\frac{psb}{d_b}\right)_{opt}}{\left(\frac{psb}{d_b}\right)_n} \right]^{\frac{1}{H_1}}}$$



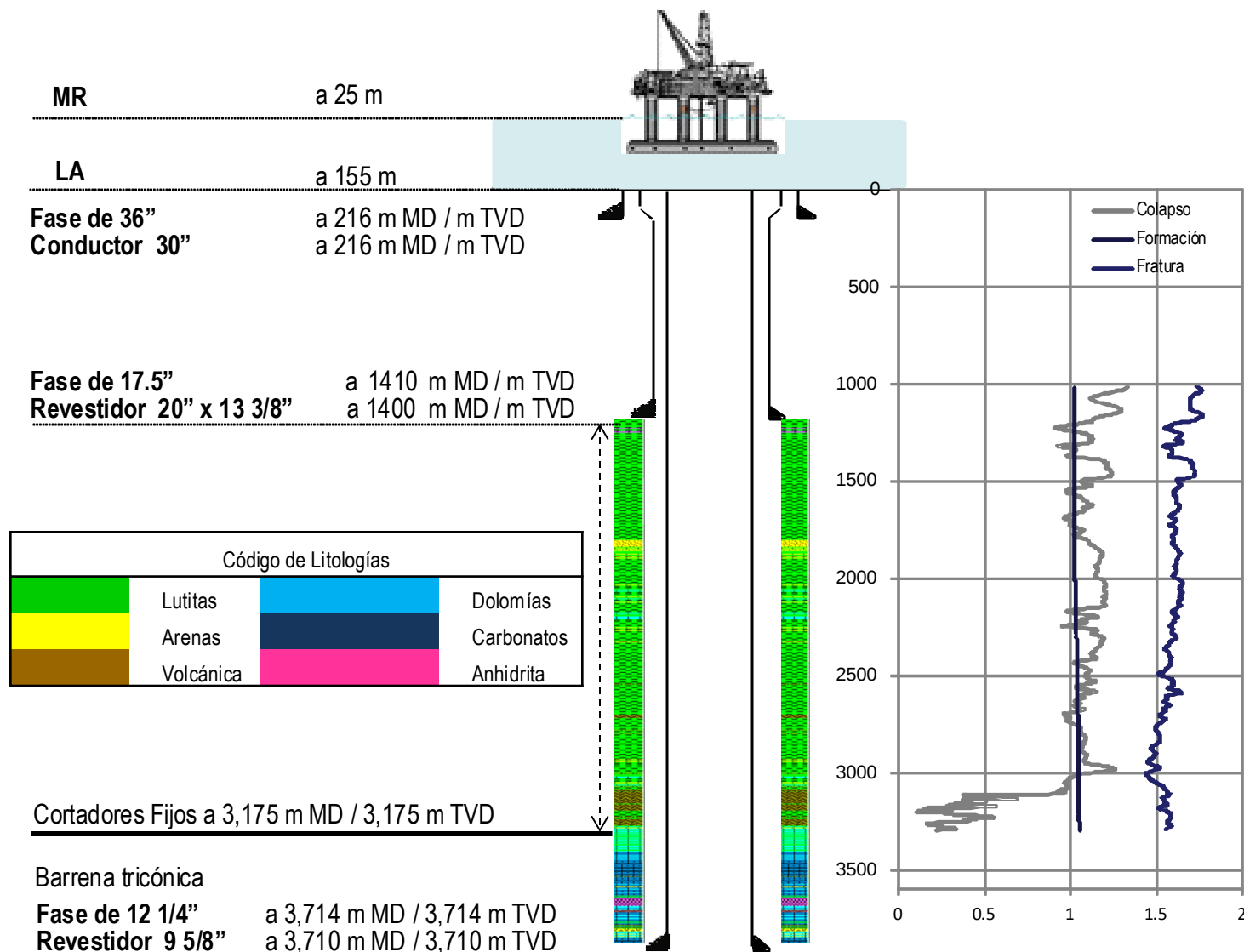
Aplicación del Método.

Mapa de localización.

El pozo en estudio, se perforó en tres fases y está ubicado a 87 km de la ciudad de Campos, Brasil.



Estado mecánico del pozo.

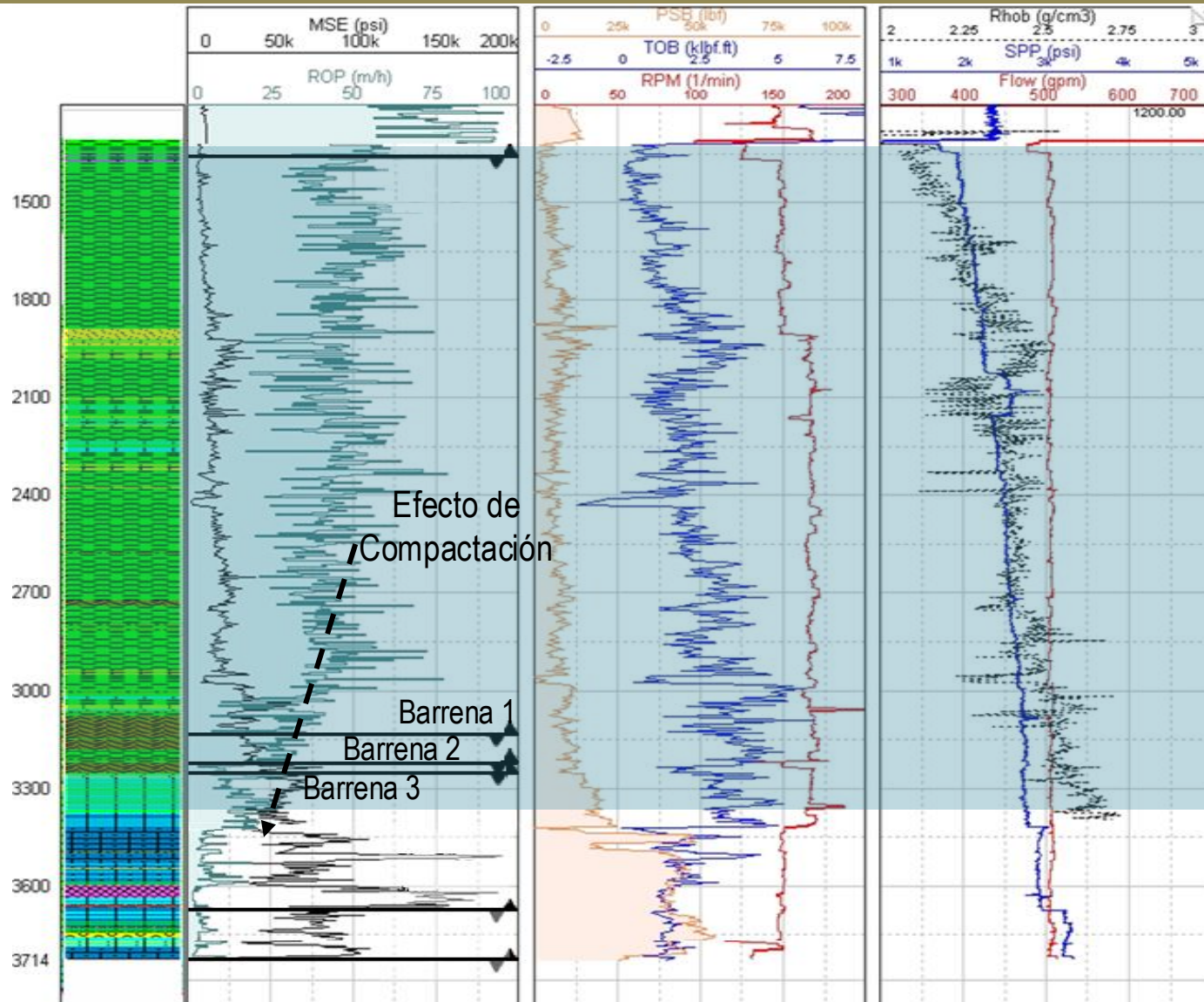


Consideraciones para perforar la fase de 12 ¼".

Fase de 12 ¼" (1110 – 3715 m).

- Armar y bajar el ensamble de perforación con herramientas **LWD**.
- Llevar a cabo una prueba de presión al revestidor, **4000 psi**.
- Llevar a cabo una prueba de integridad con **1.5 gr/cc**.
- Iniciar a perforar con fluido de perforación base agua de **1.08 gr/cc**.
- Sección planeada con dos barrenas, una **cortadores fijos** y una **tricónica**.
- Si existe evidencia de aceite y gas, programa de registros eléctricos.
- Evaluar pozo con pruebas de presión producción.

Pozo de correlación



Pozo de correlación

Desgaste de barrenas reportados en pozos de correlación con similitud geológica									
	Fase	Barrena	Desgaste	Longitud m	Toberas	psb klb	RPM	RPM_n	τ_H [hrs]
Pozo 1 _c	12 ¼	PDC 517	3	1572	3x11, 3x12	5-40	150	130	58
Pozo 2 _c	12 ¼	PDC 517	3	1624	3x10, 3x14	5-35	150	130	64
Pozo 3 _c	12 ¼	PDC 537	4	1545	3x11, 3x12	5-45	160	100	50

Resumen de los ensambles de perforación y rendimiento de barrenas .		
Ensamble de fondo		Desempeño
1	Barrena PDC MDS 616 LBPX Power V c/slick (w/ CC), Arc 8 (APWD), Telescoope 825 (W/MVC)	Longitud Perforada: 1735 m ROP: 13,3 m/h Desgaste: 3-8-MA-O-D-1-DD-FM
2	Barrena PDC MDi 616 LSBPX Power V c/slick (w/ CC), Arc 8 (APWD), Telescoope 825 (W/MVC)	Longitud Perforada: 92 m ROP: 3,1 m/h Desgaste: 2-8-MA-0-D-2-IP-TP
3	Barrena BTC GF130BODVCPS IADC 537 Power V c/slick (w/ CC), Arc 8 (APWD), Telescoope 825 (W/MVC)	Longitud Perforada: 49 m ROP: 1,2 m/h Desgaste: 1-1-TD-T-E-0-NC-TP
4	Barrena PDC MDSi 616 LBPX Power V c/slick (w/ CC), Arc 8 (APWD), Telescoope 825 (W/MVC)	Longitud Perforada: 438 m ROP: 4,7 m/h Desgaste: 5-8-ID-O-D-1-TQ-TP

Parámetros de perforación del pozo de correlación.

Tabla 5.4. Información de parámetros de perforación del pozo de correlación.

TVD	RPM	TOR	ECD	Q	ROP	PBBA	PSB
m	c/min	1000 ft.lbf	lbm/gal	gal/min	m/h	psi	klbf
Profundidad	Velocidad de Rotación	Torque de la Barrena	Densidad Equivalente de Circulación	Flujo	Velocidad de Penetración	Presión de las Bombas	Peso Sobre Barrena
1470.81	80.00	3.99	9.68	656.48	42.89	2518.33	5.99
1471.27	80.00	3.44	9.68	656.18	51.03	2517.12	4.83
1471.88	80.00	3.49	9.68	656.18	53.04	2517.31	3.33
1472.49	80.00	4.28	9.68	656.18	51.30	2518.23	3.54
1472.95	80.00	3.08	9.68	656.48	52.39	2517.44	3.21
1473.40	80.00	3.05	9.68	656.48	49.89	2517.26	2.46
1474.01	80.00	3.51	9.68	656.18	47.28	2519.24	4.83
1474.47	80.00	3.26	9.68	656.18	45.39	2520.02	2.97
1474.93	80.00	2.91	9.69	656.18	44.09	2517.95	3.21
1478.13	80.00	3.01	9.70	658.87	53.94	2556.74	2.35
1478.58	80.00	3.80	9.71	658.57	54.86	2558.78	5.27
1479.04	80.00	3.38	9.70	654.38	52.48	2530.37	5.23
1479.65	80.00	2.39	9.71	654.98	46.25	2531.91	5.33
3123.29	130.00	17.17	9.31	653.43	5.07	2959.55	24.47
3123.59	130.00	13.28	9.31	653.43	4.17	3003.60	27.54
3123.90	130.00	1.69	9.29	653.43	3.60	3018.20	28.62
3124.20	130.00	15.25	9.30	665.69	3.22	3201.22	21.30
3124.50	130.00	3.82	9.30	665.99	3.15	3199.60	26.65
3124.81	130.00	21.43	9.31	669.79	3.30	3213.79	27.42
3125.11	130.00	19.31	9.30	670.39	4.02	3224.61	26.65
3125.42	130.00	10.44	9.31	670.69	4.00	3173.62	23.37
3125.72	130.00	8.98	9.31	670.39	4.03	3127.41	24.36
3126.03	130.00	1.69	9.31	667.70	3.30	3119.59	20.64

Evaluación de variables.

Tabla 5.5. Funciones evaluadas con los parámetros de perforación de la tabla 5.3.

m	Y	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
Profundidad	ln(ds/dt)	TVD	Pf	DEC	PSB	RPM	h	Fit
1470.81	4.95	5174.26	-174.03	-5714.64	-2.10	-0.49	0.00	-0.06
1471.27	5.12	5172.76	-174.07	-5700.48	-2.32	-0.49	0.00	-0.06
1471.88	5.16	5170.76	-174.12	-5704.78	-2.69	-0.49	0.00	-0.06
1472.49	5.13	5168.76	-174.17	-5690.23	-2.63	-0.49	-0.01	-0.06
1472.95	5.15	5167.26	-174.21	-5713.74	-2.72	-0.49	-0.01	-0.06
1473.40	5.10	5165.76	-174.24	-5719.38	-2.99	-0.49	-0.01	-0.06
1474.01	5.04	5163.76	-174.29	-5704.82	-2.32	-0.49	-0.01	-0.06
1474.47	5.00	5162.26	-174.33	-5728.85	-2.80	-0.49	-0.01	-0.06
1474.93	4.97	5160.76	-174.37	-5772.24	-2.73	-0.49	-0.02	-0.06
1478.13	5.18	5150.26	-174.63	-5801.74	-3.04	-0.49	-0.02	-0.06
1478.58	5.19	5148.76	-174.67	-5864.17	-2.23	-0.49	-0.02	-0.06
1479.04	5.15	5147.26	-174.70	-5831.05	-2.24	-0.49	-0.02	-0.07
1479.65	5.02	5145.26	-174.75	-5875.69	-2.22	-0.49	-0.02	-0.07
3123.29	2.81	-247.50	-292.61	-8257.44	-0.69	0.00	-3.84	-0.07
3123.59	2.62	-248.50	-292.63	-8306.41	-0.58	0.00	-3.84	-0.07
3123.90	2.47	-249.50	-292.65	-8109.40	-0.54	0.00	-3.84	-0.07
3124.20	2.36	-250.50	-292.67	-8149.15	-0.83	0.00	-3.84	-0.05
3124.50	2.34	-251.50	-292.69	-8163.27	-0.61	0.00	-3.84	-0.05
3124.81	2.38	-252.50	-292.71	-8265.57	-0.58	0.00	-3.84	-0.04
3125.11	2.58	-253.50	-292.73	-8217.16	-0.61	0.00	-3.84	-0.04
3125.42	2.57	-254.50	-292.75	-8262.05	-0.74	0.00	-3.84	-0.04
3125.72	2.58	-255.50	-292.77	-8284.39	-0.70	0.00	-3.84	-0.04
3126.03	2.38	-256.50	-292.79	-8357.00	-0.86	0.00	-3.84	-0.05

Aplicación del análisis de regresión múltiple.

Análisis de Regresión Y					
Ecuación: $Y = 91.54 - 0.01 X_2 + 0.3 X_3 + 0 X_4 - 0.09 X_5 + 1.87 X_6 + 1.81 X_7 + 3.7 X_8$					
Variación	Suma de Min_sq	Grados de Libertad	Principal Coef	Pearso F	P-valor
Regresión	3942.54187	7	563.22027	4661.6938	0.0000
Error	347.354058	2875	0.1208188		
Total	4289.89593	2882			
s 0.3476 Determinant 2.1761E-07 R-sq 91.90% DW 0.23 R-Sq(adj) 91.90%					
Parametros					
X	Coef Est	Error Std	t valor	P-valor	VIFs
Constante	91.5393	4.6484	19.6924	0.0000	
X2	-0.0072	0.0004	-19.4530	0.0000	9179.4587
X3	0.3014	0.0157	19.1800	0.0000	7628.0767
X4	-0.0005	0.0000	-44.2044	0.0000	4.1547
X5	-0.0888	0.0091	-9.7771	0.0000	1.7162
X6	1.8670	0.0915	20.3963	0.0000	2.8755
X7	1.8112	0.0657	27.5782	0.0000	168.7233
X8	3.7007	0.1404	26.3513	0.0000	2.6867
2883 Observaciones fueron utilizadas para realizar este análisis					
Tiempo: 2.92 seg.					

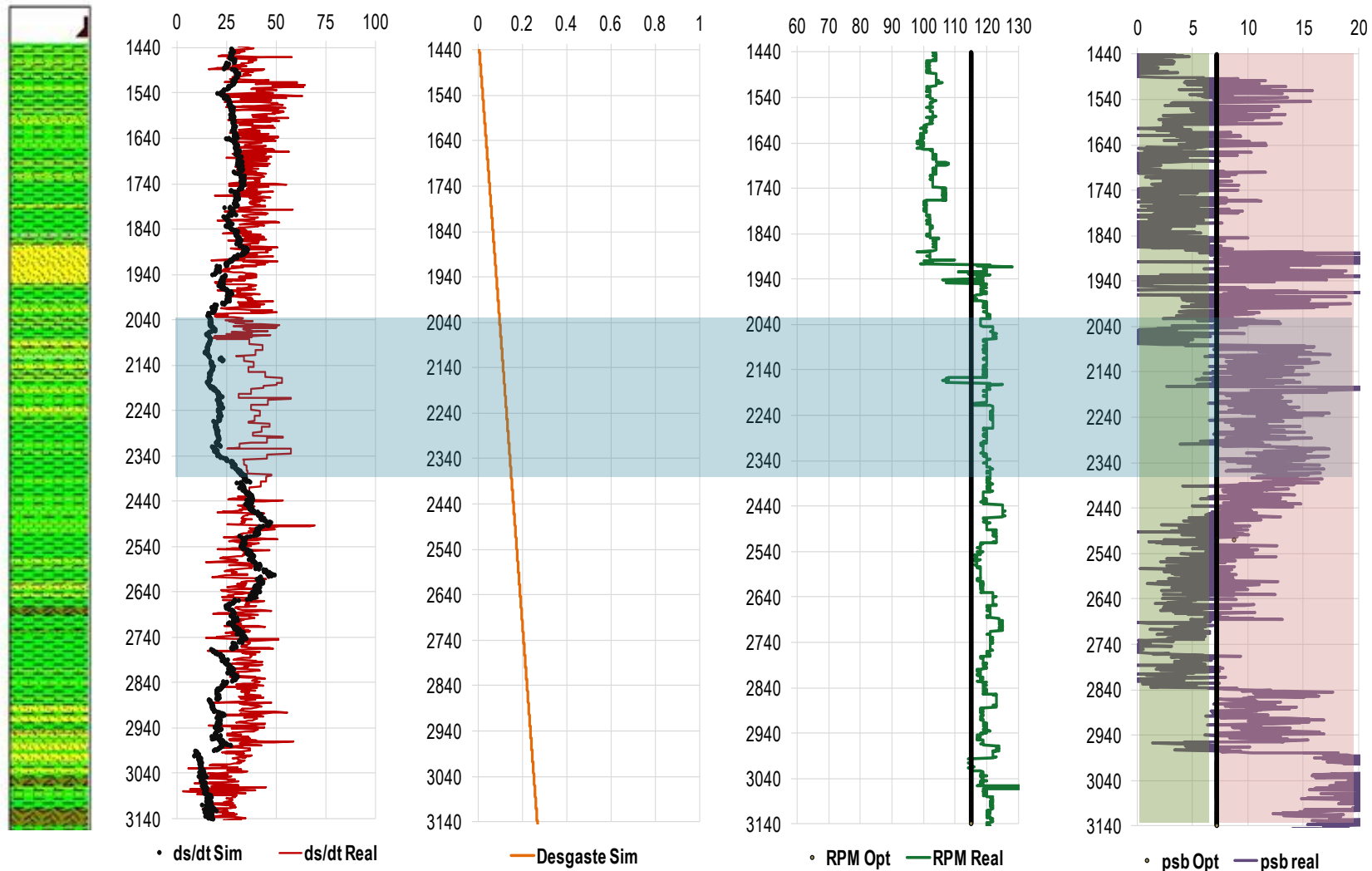
Coeficientes	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8
Análisis 1	92.8593214	-0.00724471	0.301946688	-0.00054102	0.088843461	1.405970319	1.61116599	3.700728342

Optimización de parámetros de perforación.

Datos utilizados del pozo de correlación número 3, ubicado a 4.5 km del nuevo proyecto. Barrena de cortadores fijos de 12.25 pulg, IADC M222			
$\tau_H=50 \text{ hrs}$	$H_1=1.5$	$H_2=1$	$H_3=0.02$
$\left(\frac{psb}{d_b}\right)_m = 10, \text{ lb/pulg.}$	$\left(\frac{psb}{d_b}\right)_n = 100, \text{ lb/pulg.}$	$\left(\frac{psb}{d_b}\right)_c = 3260, \text{ lb/pulg.}$	$RPM^n = 100, \text{ rpm}$
$\rho_f = 1.08 - 1.12, \text{ gr/cm}^3$	$\mu_p = 25, \text{ cp}$	Toberas 3x12, 3x13	$p_f = 1.04, \text{ gr/cm}^3$

Parámetros óptimos de perforación para la sección de 12 ¼" del nuevo pozo		
Peso sobre barrena, Óptimo	7740 – 8000 / 3518 – 3636	Lb / Ton.
Velocidad de rotación, Óptima	115	Rev. / Min.

Optimización de parámetros de perforación.



Resultados.

Análisis de costos a través de la comparación entre pozos considerando un viaje. (Costo/Día) MXN \$ 10,000,000. en 2012. Operaciones Marinas					
Tipo de Datos	<i>ds/dt</i> [m/h]	Longitud [m]	Tiempo de Viaje [hrs]	Tiempo Total [hrs]	Costo Total [10 MM MXN]
Análisis.	29	1735	0	59.0	25.9
Real.	35	1735	0	50.0	20.8
Pozo Correlación	34	1876	36	92.0	37.9

El porcentaje de rendimiento en términos de economía fue de **19.7%** menor que el rendimiento por análisis, con respecto al pozo de correlación de **46%**, de acuerdo a los resultados y valores presentados

Conclusiones y Recomendaciones.

Conclusiones

- a) El método permite determinar los valor óptimos de los parámetros de perforación, peso sobre barrena y velocidad de rotación, para operar con máximo rendimiento barrenas tricónicas y de cortadores fijos.
- b) El manejo de la información adquirida a través de los sensores de perforación y el método de regresión múltiple, muestra un potencial extraordinario para llevar a cabo trabajos de investigación asistido por la simulación de eventos.
- c) Los modelo de desgaste empleado en esta investigación, permiten calcular el desgaste instantáneo en tiempo real para toma de decisiones.

Conclusiones.

- d) Optimizar la velocidad de penetración no es determinar las magnitudes que representen los valores de velocidad más altos. El estudio muestra que la velocidad de penetración optimizada es aquella que permitirá el mayor rendimiento de operación de una barrena con respecto al tiempo.
- e) Los análisis realizados demuestran una reducción en el tiempo de perforación de la fase analizada igual a 19.7% con respecto a la información obtenida.
- f) El desgaste calculado de 0.7 en relación a 8, se comparó con el observado al finalizar la perforación. El valor reportado fue de 0 desgaste en la barrena.

Recomendaciones.

- a) Para optimizar la velocidad de perforación en formaciones no homogéneas abrasividad y con alto esfuerzo compresivo, se recomienda realizarla por fases para perforar con una única barrena.
- b) Programar un modelo para solución de regresión múltiple multivariable que permita obtener coeficientes en tiempo real.
- c) Construir un software para la determinación de parámetros en tiempo real bajo una herramienta que permite tomar decisiones al perforador.
- d) El estudio requiere incluir motores de fondo, vibraciones en el ensamble de perforación, función f_6 , y finalmente mostrar al estudiante de maestría y doctorado la existencia de herramientas que la industria de perforación requiere para solucionar problemas.

Gracias por su atención.

Método para Optimización

Utilizando la ecuación de costo de perforación por distancia perforada,

$$C_p = \frac{C_b + C_e(t_v + t_c + t_r)}{\Delta s}$$

Sustituimos la ecuación de distancia de perforación y tiempo de rotación tenemos la siguiente expresión:

$$C_p = \frac{C_r}{(J_1 e^{(-a_7 h)} J_2 \tau_H (1 + H_2 h) dh)} \left(\frac{C_b}{C_r} + t_t + t_c + J_2 \tau_H \int_0^{h_f} (1 + H_2 h) dh \right)$$

Arreglando términos, tenemos

$$C_p = \frac{C_r}{e^{(-a_7 h)} (1 + H_2 h) dh} \left(\frac{\frac{C_b}{C_r} + t_t + t_c}{J_1 J_2 \tau_H} + \frac{\int_0^{h_f} (1 + H_2 h) dh}{J_1} \right)$$

Método para Optimización

- Proponiendo un cambio de variable, tenemos la siguiente expresión

$$C_p = \frac{C_r}{e^{(-a_7 h)(1+H_2 h)} dh} \left(\frac{\frac{C_b}{C_r} + t_t + t_c}{XY} + \frac{\int_0^h f(1+H_2 h) dh}{Z} \right),$$

En donde,

$$X = \left[f_1 * f_2 * f_3 * f_4 * e^{a_5 * \ln \left[\frac{A}{4 - \left(\frac{psb}{d_b} \right)_t} \right]} * f_6 * f_8 * f_n \right], \quad A = \frac{psb}{d_b} - \left(\frac{psb}{d_b} \right)_t,$$

$$Y = B \left(\frac{RPM^n}{RPM} \right)^{H1} \left(\frac{1}{1 + \frac{H_2}{2}} \right) \tau_H,$$

$$B = \frac{\left(\frac{psb}{d_b} \right)_m - \left(\frac{psb}{d_b} \right)_t}{\left(\frac{psb}{d_b} \right)_m^{-4}} y$$

$$Z = \left[f_1 * f_2 * f_3 * f_4 * e^{a_5 * \ln \left[\frac{\frac{psb}{d_b} - \left(\frac{psb}{d_b} \right)_t}{4 - \left(\frac{psb}{d_b} \right)_t} \right]} * f_6 * f_8 * f_n \right].$$

Método para Optimización

- Desarrollando la primera derivada parcial, $\frac{\partial(C_p)}{\partial(psb/d_b)}$, tenemos la siguiente expresión:

$$\frac{\partial(C_p)}{\partial\left(\frac{psb}{d_b}\right)} = \frac{C_e}{e^{(-a_7h)}Udh} \left[\frac{RPM}{\zeta} \frac{1}{\psi} \frac{1}{[B]} \frac{a_5}{(A)} + \frac{RPM}{\zeta} \frac{1}{\psi} \frac{1}{\left(\left(\frac{psb}{d_b}\right)_m - \left(\frac{psb}{d_b}\right)_t\right)^2} \left(4 - \left(\frac{psb}{d_b}\right)_t\right) - \frac{\int_0^{hf} Udh}{\theta} \frac{1}{\psi} \frac{a_5}{(A)} \right]$$

$$U = (1 + H_2h)$$

$$N = \left[\frac{C_b}{C_e} + t_v + t_c \right]$$

$$\zeta = (f_1 * f_2 * f_3 * f_4 * f_6 * f_8 * f_n) \left(\left(\frac{RPM^n}{RPM} \right)^{H1} \right) \left(\left(\frac{1}{1 + \frac{H_2}{2}} \right)^{\tau_H} \right)$$

$$\psi = e^{a_5 * \ln \left(\frac{\frac{psb}{d_b} - \left(\frac{psb}{d_b}\right)_t}{4 - \left(\frac{psb}{d_b}\right)_t} \right)}$$

$$\theta = (f_1 * f_2 * f_3 * f_4 * f_6 * f_8 * f_n)$$

Método para Optimización

$$\frac{\partial(C_p)}{\partial(psb/d_b)} = \left[\begin{array}{l} (-) \frac{RPM}{\left(\left(\frac{RPM^n}{RPM}\right)^{H_1}\right) \left(\left(\frac{1}{1 + \frac{H_2}{2}}\right) \tau_H\right)} \frac{1}{[J_2]} \frac{a_5}{\left(\left(\frac{psb}{d_b}\right)_m - \left(\frac{psb}{d_b}\right)_t\right)} \\ (+) \frac{N}{\left(\left(\frac{RPM^n}{RPM}\right)^{H_1}\right) \left(\left(\frac{1}{1 + \frac{H_2}{2}}\right) \tau_H\right)} \frac{1}{\left(\left(\frac{psb}{d_b}\right)_m - \left(\frac{psb}{d_b}\right)_t\right)^2} \left(4 - \left(\frac{psb}{d_b}\right)_t\right) \\ (-) \int_0^{h_f} U dh \frac{a_5}{\left(\left(\frac{psb}{d_b}\right)_m - \left(\frac{psb}{d_b}\right)_t\right)} \end{array} \right] = 0$$

$$\frac{\partial(C_p)}{\partial(psb/d_b)} = \left\{ \frac{\left[\frac{C_b}{C_r} + t_t + t_c\right]}{\left(\left(\frac{RPM^n}{RPM}\right)^{H_1}\right) \left(\left(\frac{1}{1 + \frac{H_2}{2}}\right) \tau_H\right)} \left[a_5 - \frac{\left(\left(\frac{psb}{d_b}\right) - \left(\frac{psb}{d_b}\right)_t\right) \left(4 - \left(\frac{psb}{d_b}\right)_t\right)}{\left(\left(\frac{psb}{d_b}\right)_m - \left(\frac{psb}{d_b}\right)_t\right)^2} \right] + a_5 J_2 \tau_H \int_0^{h_f} (1 + H_2 h) dh = 0 \right\}$$

Método para Optimización

$$\left[\frac{C_b}{C_r} + t_t + t_c \right] \left[a_5 - \frac{\left(\left(\frac{psb}{d_b} \right) - \left(\frac{psb}{d_b} \right)_t \right)}{\left(\frac{psb}{d_b} \right)_m - \left(\frac{psb}{d_b} \right)} \right] + a_5 J_2 \tau_H \int_0^{h_f} (1 + H_2 h) dh = 0.$$

$$\left[\frac{psb}{d_b} \right]_{Opt} = \frac{a_5 H_1 \left(\frac{psb}{d_b} \right)_{max} + a_6 \left(\frac{psb}{d_b} \right)_t}{a_5 H_1 + a_6}.$$

Para barrenas de cortadores fijos, se define la constante de abrasividad;

$$J_2 = \left[\frac{\left(\frac{psb}{d_b} \right)_m}{\left(\frac{psb}{d_b} \right)_n} \right] * \left[\frac{RPM^n}{RPM} \right]^{H_1} * \left[\frac{1}{1 + \frac{H_2}{2}} \right]$$

