

1. Determinación de las Curvas TBP, EFV, ASTM y °API.

1.1. Curva del punto de ebullición verdadero (True Boiling Point curve, TBP-Destilación Hembel).

A partir de la muestra N. 59172 (Pág. 309 del Gary 1980) del U.S. Bureau of Mines.

Tabla 1.1

Muestra N. 59172 del campo: Sho-Vel-Tum. Springer, Pennsylvanian del U.S.

Distillation, Bureau of Mines Routine method

Destilación a presión atmosférica : 743 mm Hg

Fracción N.	Temp. Corte (°F)	% Volumen	% Volumen Acumulado	° API (60 °F)
1	122	-	-	-
2	167	-	-	-
3	212	2,6	2,6	72,1
4	257	2,8	5,4	60,5
5	302	2,9	8,3	55,2
6	347	3,5	11,8	50,3
7	392	2,7	14,5	45,6
8	437	3,1	17,6	41,7
9	482	4,4	22	38,6
10	527	-	-	-
Presión: 40 mm Hg				
11	392	6,1	28,1	33,2
12	437	4,5	32,6	29,7
13	482	3,9	36,5	27,5
14	527	4,8	41,3	24,2
15	572	-	-	-
Residuo	-	55,9	97,2	8,3

Como se puede observar la primera porción de la destilación se realizó a presión atmosférica hasta un punto final 275 °C (527 °F), y la segunda parte se realiza a una presión total de 5,33 kPa (40 mm Hg) hasta un punto final de 300 °C (572 °F). La etapa de destilación realizada a la presión de 40 mm Hg es necesaria para prevenir las altas temperaturas que pueden ocasionar el craqueo del crudo, por lo tanto, es necesario que las temperaturas de destilación reportadas en el análisis a 5,33 kPa (40 mm Hg) sean corregidas a 101.3 kPa (760 mm Hg). Los datos reportados a la presión de la 743 mm Hg no necesitan ser corregidos, dado que la presión es muy próxima a la atmosférica.

El procedimiento de corrección es el siguiente:

Se entra en la grafica 3.6 (Gary, J.H. y Handwerk, G.E.) con la temperatura de corte para una fracción determinada a la presión de 40mm Hg en el eje de las accisas, se sube verticalmente

hasta interceptar la línea recta y se lee en el eje de las ordenadas la temperatura corregida a presión atmosférica.

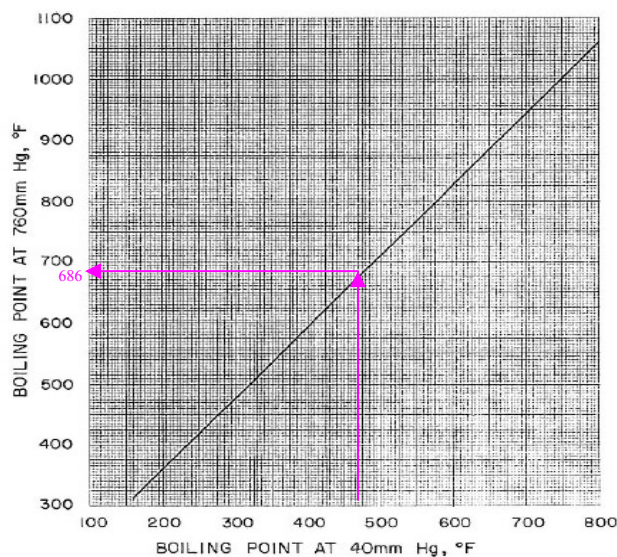


Figure 3.6 Boiling point at 760 mmHg versus boiling point at 40 mmHg.

Debido a que % de volumen acumulado en la fracción N°16 es menor al 100%, se le debe sumar el % de pérdida a cada %vol.acum, el % de pérdida que esta dado por:

$$\%perd = 100 - \%vol.acum_{16}$$

$$\%perd = 100 - 97,2$$

$$\%perd = 2,8$$

Entonces el $\%volacum_1 = \%volacum_1 + \%perd$, los resultados se presentan en la siguiente tabla,

Tabla 1.2
Destilación a presión atmosférica : 743 mm Hg

Fracción N.	Temp. Corte (°F)	% Vol.	%Volacum + %perdida	° API (60 °F)
1	122	-	2,8	-
2	167	-	2,8	-
3	212	2,6	5,4	72,1
4	257	2,,8	8,2	60,5
5	302	2,9	11,1	55,2
6	347	3,5	14,6	50,3
7	392	2,7	17,3	45,6
8	437	3,1	20,4	41,7
9	482	4,4	24,8	38,6
10	527	-	-	-
11	585	6,1	30,9	33,2
12	634	4,5	35,4	29,7
13	686	3,9	39,3	27,5
14	739	4,8	44,1	24,2
15	792	-	-	-

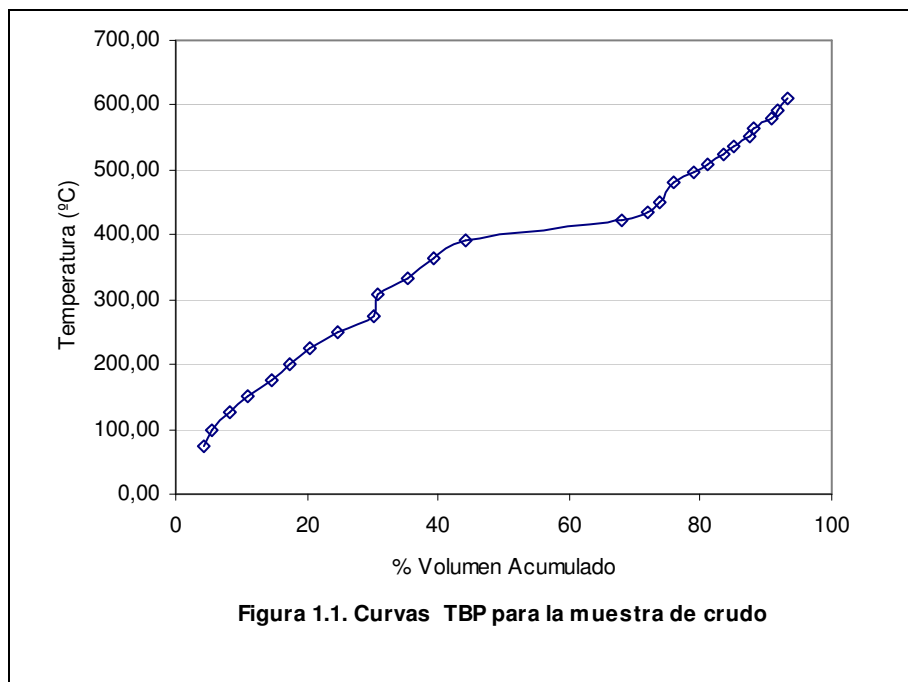
Residuo	-	55,9	100	8,3
---------	---	------	-----	-----

Seguidamente se grafica en papel probabilístico las temperaturas vs %Vol.acum, se traza la mejor recta y se extrapola hasta los 593,33°C (1100°F), de la grafica se toman datos desde 426,67°C (800 °F) hasta los 593,33°C (1100°F), en intervalos de 25° y se leen los %Volacum correspondientes a cada valor.

Tabla 1.3

Temperatura y %volacum, °API y %Volumen promedio

Fracción N.	Temp. Corte (°F)	Temp. Corte (°C)	%Volacum + %perdida
1	122	50,00	2,8
2	167	75,00	4,3
3	212	100,00	5,4
4	257	125,00	8,2
5	302	150,00	11,1
6	347	175,00	14,6
7	392	200,00	17,3
8	437	225,00	20,4
9	482	250,00	24,8
10	527	275,00	30,1
11	585	307,22	30,9
12	634	334,44	35,4
13	686	363,33	39,3
14	739	392,78	44,1
15	792	422,22	67,9
16	817	436,11	71,8
17	842	450,00	73,9
18	867	481,67	76
19	892	495,56	79
20	917	509,44	81
21	942	523,33	83,5
22	967	537,22	85
23	992	551,11	87,5
24	1017	565,00	88
25	1042	578,89	91
26	1067	592,78	91,9
27	1100	611,11	93,4



1.2. Curva de destilación ASTM o tipo Engler

Para construir la curva ASTM, es necesario relacionar los datos de la curva TBP con la curva ASTM, por lo que se tomaran los siguientes datos de destilación TBP atmosférica determinados en la sección 1.1 como se muestra.

Tabla 1.4

Rango de destilación TBP a 760 mm Hg
para una muestra de crudo.

% Destilado	TBP (°C)	TBP (°F)
0	10,91	51,64
10	139,93	251,88
30	296,75	566,15
50	374,61	706,30
70	440,71	825,28
90	562,25	1044,05
100	664,81	1228,66

El procedimiento para determinar la Curva ASTM el siguiente:

Se entra a la figura 3.19 (b) con una temperatura asumida $ASTM_{50\%}$ (cercana a la temperatura $TBP_{50\%}$) en el eje de las abscisas, se corta la curva y se lee en el eje de las ordenadas el $\Delta(^{\circ}F)$ que se le debe sumar a la temperatura $ASTM_{50\%}$ asumida. Como la temperatura $TBP_{50\%} = ASTM_{50\%} + \Delta$, entonces la suma del $ASTM_{50\%}$ mas Δ debe ser igual a $706,30^{\circ}F$.

Para un $ASTM_{50\%}(ASUM) = 700^{\circ}F \Rightarrow \Delta = 49^{\circ}F$ (figura 3.19b)

$$ASTM_{50\% (ASUM)} + \Delta = 749^{\circ} F > TBP_{50\%}$$

Para un $ASTM_{50\% (ASUM)} = 664^{\circ} F \Rightarrow \Delta = 42^{\circ} F$

$$ASTM_{50\% (ASUM)} + \Delta = 706^{\circ} F \approx TBP_{50\%}$$

Por lo tanto el $ASTM_{50\%} = 664^{\circ} F$

Se determinan los diferenciales TBP de (0-10, 10-30, 30-50, 50-70, 70-90 y 90-100)%, se entra a la figura 3.19a en el eje de las ordenadas y se intercepta la curva correspondiente a cada diferencial, seguidamente se baja hasta el eje de las abscisas y se lee en diferencial ASTM correspondiente a cada curva, por ejemplo,

Para $\Delta TBP_{(30-50)\%} = 140,15^{\circ} F \Rightarrow \Delta ASTM_{(30-50)\%} = 128^{\circ} F$ (figura 3.19a)

A partir de este valor podemos obtener el $ASTM_{30\%}$ mediante la siguiente expresión:

$$\Delta ASTM_{(30-50)\%} = ASTM_{50\%} - ASTM_{30\%}$$

$$ASTM_{30\%} = ASTM_{50\%} - \Delta ASTM_{(30-50)\%}$$

$$ASTM_{30\%} = 664^{\circ} F - 128^{\circ} F = 536^{\circ} F$$

El procedimiento continua hasta obtener todas las temperaturas ASTM, los resultados obtenidos se puede observar en la tabla 1.5

Tabla 1.5

Relación entre la destilación TBP y ASTM a 760 mm Hg para una muestra de crudo (°F).				
% Destilado	Intervalos %	ΔTBP	ΔASTM	ASTM
0	-	-	-	215
-	0 - 10	200,24	141	-
10	-	-	-	356,00
-	10 - 30	314,28	180	-
30	-	-	-	536,00
-	30 - 50	140,15	128	-
50	-	-	-	664,00
-	50 - 70	118,98	109	-
70	-	-	-	773
-	70 - 90	218,77	180	-
90	-	-	-	953
100	90 - 100	184,61	102	1055
TBP(50%)= 706,30				
ASTM(50%)= 664	ASTM(50%)+ΔT. Figs(3.19a-3.19b)			
ΔT(°F)= 42	706			

1.3. Curva de vaporización instantánea en equilibrio (EFV). Destilación EFV (Equilibrium flash vaporization).

Para construir la curva EFV, es necesario relacionar los datos de la curva ASTM con la curva EFV, por lo que se tomaran los siguientes datos de destilación ASTM atmosférica determinados en la sección 1.2 como se muestra.

Tabla 1.6

Rango de destilación ASTM a 760 mm Hg para una muestra de crudo.		
% Destilado	ASTM (°C)	ASTM (°F)
0	101,67	215,00
10	180,00	356,00
30	280,00	536,00
50	351,11	664,00
70	411,67	773,00
90	511,67	953,00
100	568,33	1055,00

El procedimiento para determinar la Curva EFV el siguiente:

Se leen de la figura 3.18 la diferencia de temperatura EFV para las distintas pendientes (0-10, 10-30, 30-50, 50-70, 70-90 y 90-100)%, correspondiente a la diferencia de temperatura ASTM. Seguidamente se entra en la grafica 3.17 con el $ASTM_{50\%}$ se corta la curva correspondiente a la pendiente (10-30)% ASTM, y se lee en el eje de las ordenadas el Δ que se le debe sumar al $ASTM_{50\%}$ para obtener el $EFV_{50\%}$ como sigue:

$$Para \Rightarrow ASTM_{50\%} = 664^{\circ} F \text{ y } ASTM_{(30-50)\%} = 180^{\circ} F \Rightarrow \Delta = -27$$

$$EFV_{50\%} = ASTM_{50\%} + \Delta$$

$$EFV_{50\%} = 664^{\circ} F + (-27^{\circ} F) = 637^{\circ} F$$

$$\Delta EFV_{(30-50)\%} = EFV_{50\%} - EFV_{30\%}$$

$$EFV_{30\%} = EFV_{50\%} - \Delta EFV_{(30-50)\%}$$

$$EFV_{30\%} = 637^{\circ} F - 95^{\circ} F = 542^{\circ} F$$

El procedimiento continua hasta obtener todas las temperaturas EFV, los resultados obtenidos se puede observar el la tabla 1.7

Tabla 1.7

Relación entre la destilación ASTM y EFV a 760 mm Hg para una muestra de crudo (°F).				
% Destilado	Intervalos %	Δ ASTM	Δ EFV	EFV
0	-	-	-	310
-	0 - 10	141,00	93	-

10	-	-	-	403,00
-	10 - 30	180,00	139	-
30	-	-	-	542,00
-	30 - 50	128,00	95	-
50	-	-	-	637,00
-	50 - 70	109,00	66	-
70	-	-	-	703
-	70 - 90	180,00	122	-
90	-	-	-	825
100	90 - 100	102,00	52	877

1.4. Factor UOP o “factor de caracterización Watson” (Kw)

El factor de caracterización de Watson esta dado por:

$$K_w = \frac{(T_B)^{1/3}}{Ge} \quad T_B \text{ en } ^\circ R$$

Donde: T_B : Punto de ebullición medio

Ge: Peso especifico a 60 °F

La temperatura de ebullición promedio media es función de la pendiente (S) y de la temperatura volumétrica promedio (VABP), a partir de la Figura 23.18 de GPSA la pendiente se determina por.

$$S = \frac{T_{90\%} - T_{10\%}}{80} = \frac{(953 - 356)^\circ F}{80} = 7,46$$

$$VABP = \frac{T_{10\%} + T_{30\%} + T_{50\%} + T_{70\%} + T_{90\%}}{5} = \frac{356 + 536 + 664 + 773 + 953}{5} = 656,4^\circ F$$

Se entra a la figura 23-18 con la **pendiente** 7,46 y se interpola la curva de 656,4°F de MeABP.

$$MeABP = VABP + \Delta T \Rightarrow \Delta T = -73^\circ F$$

$$MeABP = T_B = 656,4^\circ F - 73^\circ F = 583,4^\circ F = 1043,4^\circ R$$

Sustituyendo, nos queda:

$$K_w = \frac{(1043,4)^{1/3} \text{ } ^\circ R}{0,928} = 10,93 \approx 11$$

Debido a que K_w esta entre un rango de (10.5-13.2) la muestra N.59172 tiene **base Nafténica**

1.5. Curva de °API vs % volumen destilado.

La gravedad API se graficará versus el porcentaje de volumen promedio de la fracción, ya que la gravedad es el promedio de las gravedades de las primeras a las últimas gotas de la fracción. El porcentaje de volumen promedio se determina a través de la siguiente ecuación:

$$\%volprom_i = \frac{\%volacum_i + \%volacum_{i-1}}{2}$$

Tabla 1.8

Fracción N.	° API (60 °F)	%Volumen promedio
1	-	-
2	-	-
3	72,1	2,7
4	60,5	6,8
5	55,2	9,65
6	50,3	12,85
7	45,6	15,95
8	41,7	18,85
9	38,6	22,6
10	35,9	27,45
11	33,2	30,5
12	29,7	33,15
13	27,5	37,35
14	24,2	41,7
15	-	56
16	-	69,85
17	-	72,85
18	-	74,95
19	-	77,5
20	-	80
21	-	82,25
22	-	84,25
23	-	86,25
24	-	87,75
25	-	89,5
26	-	91,45
27	8,3	92,65

La curva de gravedad del porcentaje medio se presentará en la misma gráfica junto a la curva TBP como sigue,

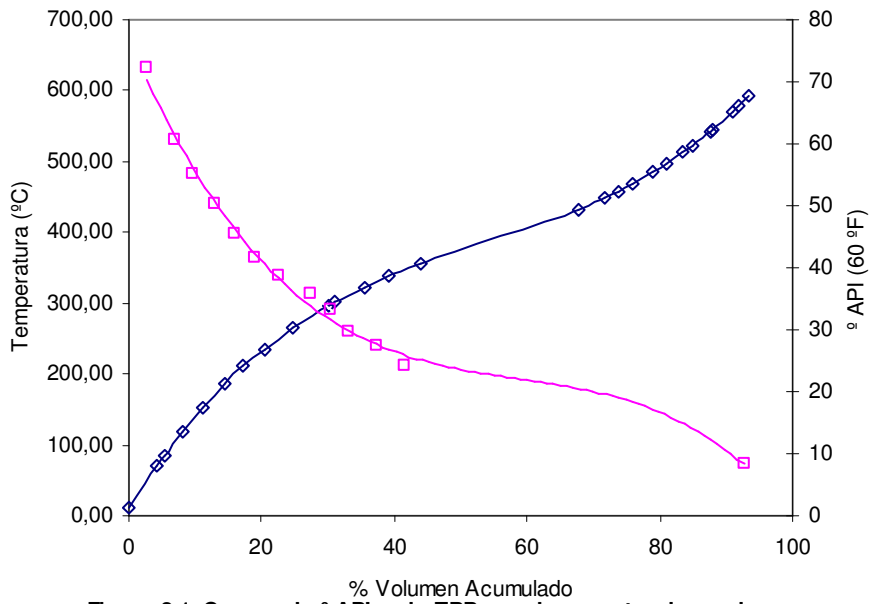


Figura 2.1. Curvas de °API y de TBP para la muestra de crudo

◆ TBP
 ◻ Curva °API
 — Polinómica (Curva °API)

2. Características de las fracciones petrolíferas

Determine la Temperatura de ebullición media, peso molecular, temperatura pseudocrítica, presión pseudocrítica y factor acéntrico de las fracciones petrolíferas si el factor de caracterización es 11.

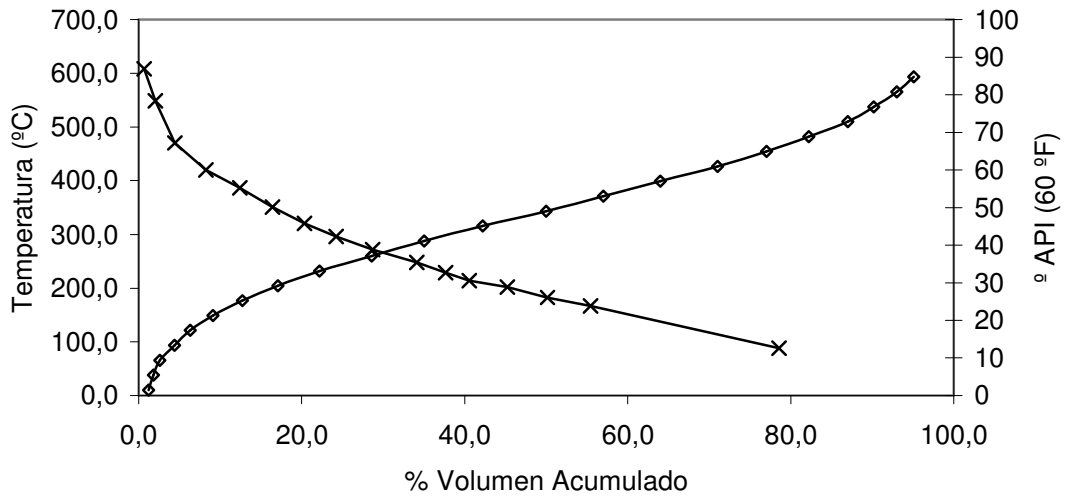


Figura 1. Curvas de °API y de TBP para la muestra de crudo

◆ Curva TBP
 × Curva °API

Tabla 2.1
Productos de la unidad de destilación

Fracción	Rango TBP (°C)
Butanos y más livianos (C4-)	- 32,2
Gasolina liviana (LSR)	32,2 - 87,8
Nafta (HSR)	87,8 - 193,3
Kerosén (KERO)	193,3 - 271,1
Gasóleo liviano (LGO)	271,1 - 321,1
Gasóleo atmosférico (HGO)	321,1 - 426,7
Gasóleo de vacío (VGO)	426,7 - 565,6
Crudo reducido de vacío (VRC)	565,6 +

Se proyectan estos rangos en la curva TBP para determinar el porcentaje en volumen y el flujo volumétrico de cada uno de los productos.

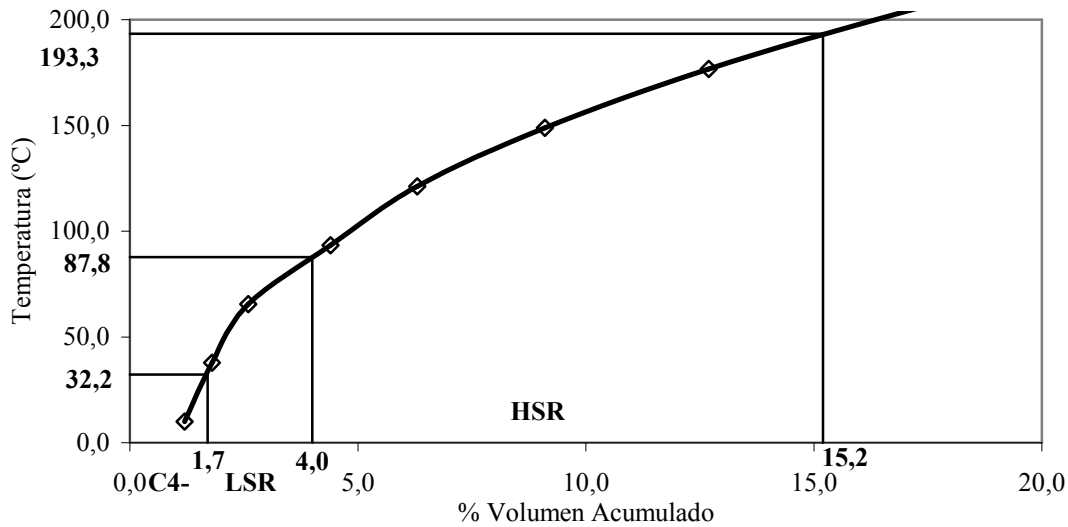


Figura 2. Curva TBP para la muestra de crudo con los rendimientos hasta la nafta (gasolina pesada)

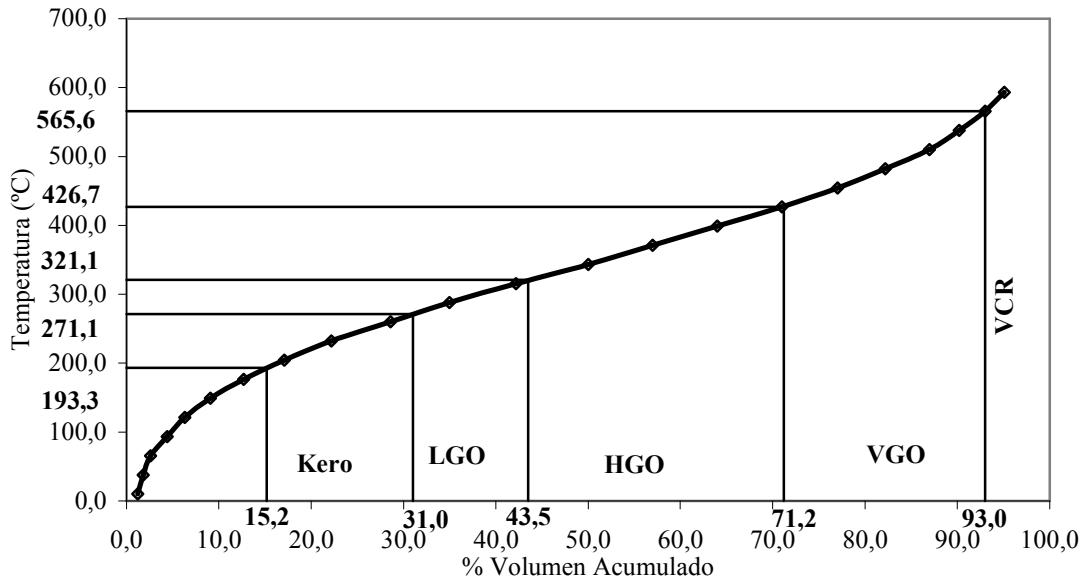


Figura 3. Curva TBP para la muestra de crudo con los rendimientos desde el Kerosén hasta el crudo reducido

Tabla 2.2
Flujos volumétricos de la unidad de destilación

Fracción	% Volumen
Productos	
Butanos y más livianos (C4-)	1,7
Gasolina liviana (LSR)	2,3
Nafta (HSR)	11,2
Kerosén (KERO)	15,8
Gasóleo liviano (LGO)	12,5
Gasóleo atmosférico (HGO)	27,7
Gasóleo de vacío (VGO)	21,8
Crudo reducido de vacío (VCR)	7,0

Se calculan las gravedades API correspondientes a los rangos de los productos

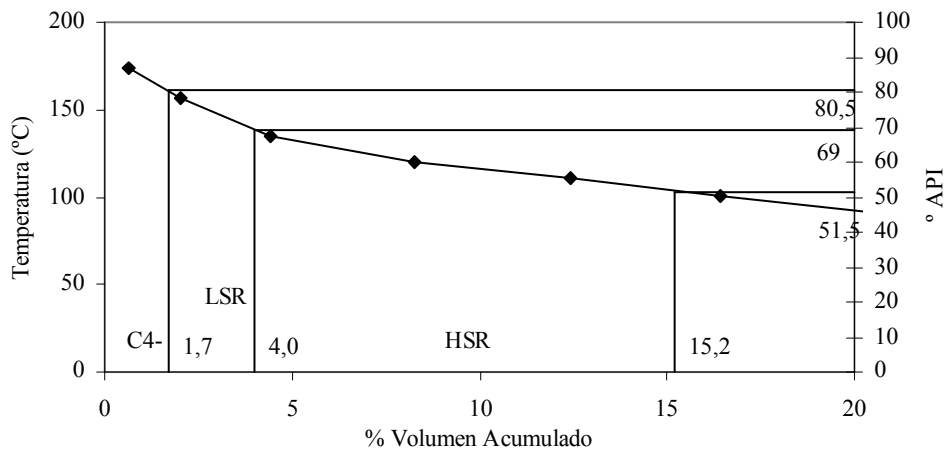


Figura 4. Curva API para la muestra de crudo con los rendimientos hasta la nafta (gasolina pesada)

2.1. Calculo de la gravedad específica.

$$A = \frac{141,5}{S} - 131,5$$

Con:

A = Grados API

S = Densidad relativa estándar

Esta característica se obtiene mediante medida en el laboratorio.

2.2 Determinación de la densidad relativa estándar de las fracciones petrolíferas (Gravedad específica)

$$K_w = \frac{(1,8T_b)^{1/3}}{S}$$

2.3 Determinación del peso Molecular (M)

API recomienda una fórmula establecida por Riazi:

$$M = 42,965[\exp(2,097 \cdot 10^{-4}T_b - 7,78712S + 2,08476 \cdot 10^{-3}T_bS)] \\ (T_b^{1,26007}S^{4,98308}) \quad [4.13]$$

Para las fracciones pesadas, en los que la temperatura de ebullición es superior a 600 K, es preferible utilizar el método de Lee y Kesler (1975).

$$M = -12272,6 + 9486,4S + T_b(8,3741 - 5,9917S) \\ + \frac{10^7}{T_b} (1 - 0,77084S - 0,02058S^2) \left(0,7465 - \frac{222,466}{T_b}\right) \\ + \frac{10^{12}}{T_b^3} (1 - 0,80882S + 0,02226S^2) \left(0,32284 - \frac{17,3354}{T_b}\right) \quad [4.14]$$

Con:

M = Peso molecular [kg/kmol]

T_b = Temperatura de ebullición [K]

S = Densidad relativa estándar

2.4. Coordenadas pseudocrítica y factor acéntrico de las fracciones petrolíferas.

a. Temperatura pseudocrítica

$$T_c = 189,8 + 450,6S + T_b (0,4244 + 0,1174S) + \frac{(14,410 - 100,6888S)}{T_b}$$

Con:

T_c = Temperatura pseudocrítica [K]

S = Densidad relativa estándar

T_b = Temperatura de ebullición normal [K]

b. Presión pseudocrítica

$$\begin{aligned} \ln P_c = & 5,68925 - \frac{0,0566}{S} - 10^{-3} T_b \left(0,436392 + \frac{4,12164}{S} + \frac{0,213426}{S^2} \right) \\ & + 10^{-7} T_b^2 \left(4,75794 + \frac{11,819}{S} + \frac{1,53015}{S^2} \right) - 10^{-10} T_b^3 \left(2,45055 + \frac{9,901}{S^2} \right) \end{aligned} \quad [4.17]$$

Con:

P_c = Presión pseudocrítica [bar]

\ln = Logaritmo neperiano

La precisión media es del orden de 5%.

c. Factor acéntrico

Cuando la temperatura de ebullición reducida es superior a 0,8 no se recomienda utilizar la fórmula clásica [4.3]. El factor acéntrico debe estimarse por la relación siguiente:

$$\omega = 7,904 + 0,135K_w - 0,007465K_w^2 + 8,359T_{br} + \frac{(1,408 - 0,01063K_w)}{T_{br}} \quad [4.18]$$

$$T_{br} = \frac{T_b}{T_c}$$

Con:

ω = Factor acéntrico

T_{br} = Temperatura de ebullición reducida

K_w = Factor de caracterización de Watson

Construcción de la Curva TBP en Excel: en Excel se copia la siguiente tabla:

%Volacum + %perdida	Temp. Corte (°C)
2,8	50
4,3	75
5,4	100
8,2	125
11,1	150
14,6	175
17,3	200
20,4	225
24,8	250
30,1	275
30,9	307,22
35,4	334,44
39,3	363,33
44,1	392,78
67,9	422,22
71,8	436,11
73,9	450
76	481,67
79	495,56
81	509,44
83,5	523,33
85	537,22
87,5	551,11
88	565
91	578,89
91,9	592,78
93,4	611,11

Como puede observarse, para la realización de este paso es necesario convertir las temperaturas a °C. Luego se selecciona la tabla de izquierda a derecha y en la barra de tareas se hace clic en el ícono **Asistente para Gráficos**.

Microsoft Excel - calculos curva tbp

Archivo Edición Ver Insertar Formato Herramientas Datos Ventana ?

100%

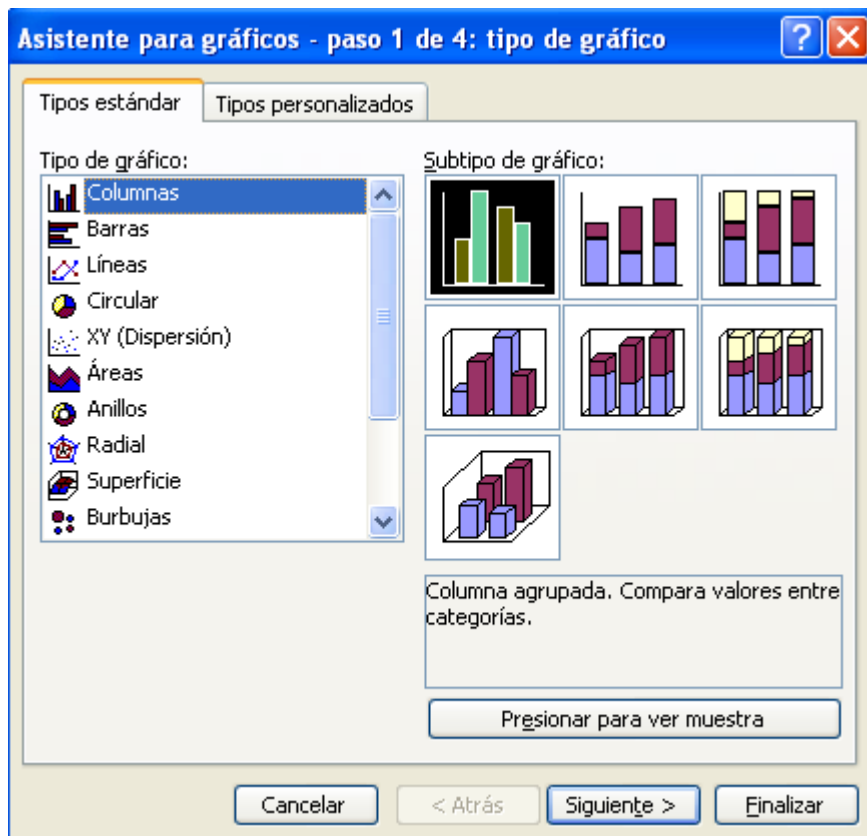
Times New Roman 10

Ir a Office Live Abrir Guardar

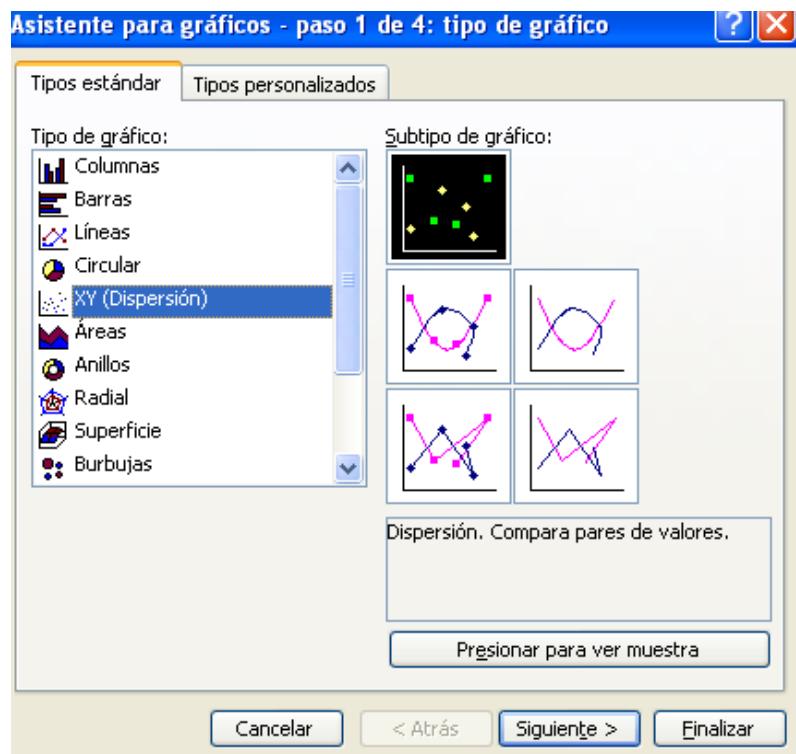
C1 %Volacum + %perdida

	A	B	C	D	E	F	G	H
	Fracción N.	Temp. Corte (°F)	%Volacum + %perdida	Temp. Corte (°C)				
1								
2	1	122	2,8	50				
3	2	167	4,3	75				
4	3	212	5,4	100				
5	4	257	8,2	125				
6	5	302	11,1	150				
7	6	347	14,6	175				
8	7	392	17,3	200				
9	8	437	20,4	225				
10	9	482	24,8	250				
11	10	527	30,1	275				
12	11	585	30,9	307,22				
13	12	634	35,4	334,44				
14	13	686	39,3	363,33				
15	14	739	44,1	392,78				
16	15	792	67,9	422,22				
17	16	817	71,8	436,11				
18	17	842	73,9	450				
19	18	867	76	481,67				
20	19	892	79	495,56				
21	20	917	81	509,44				
22	21	942	83,5	523,33				
23	22	967	85	537,22				
24	23	992	87,5	551,11				
25	24	1017	88	565				
26	25	1042	91	578,89				
27	26	1067	91,9	592,78				
28	27	1100	93,4	611,11				

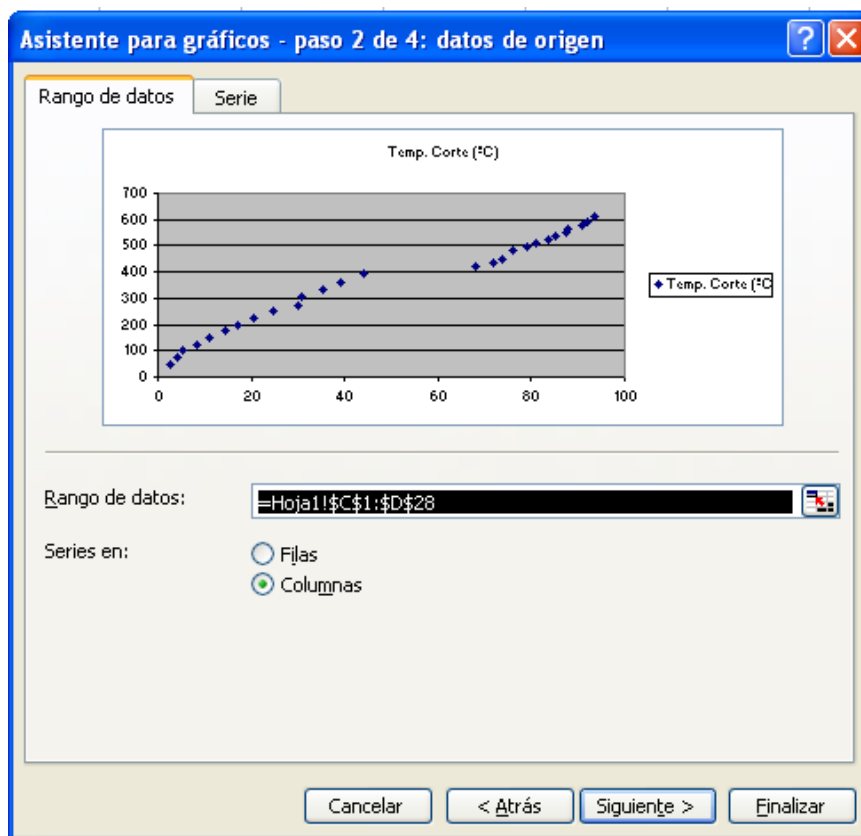
A continuación aparecerá la siguiente ventana:



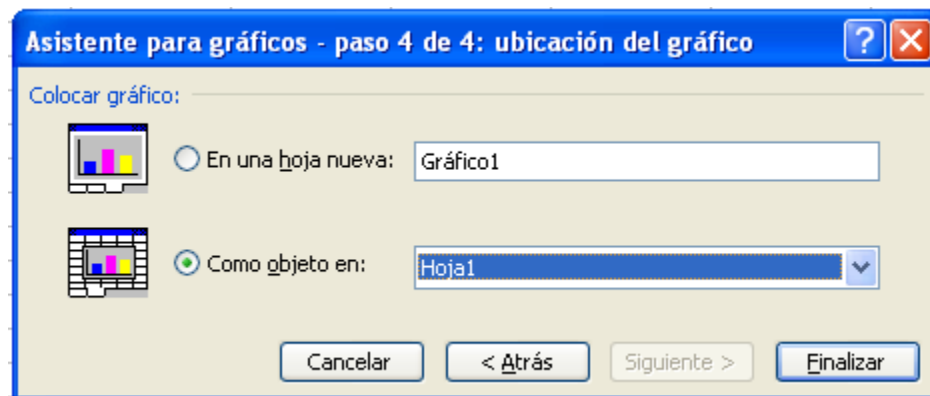
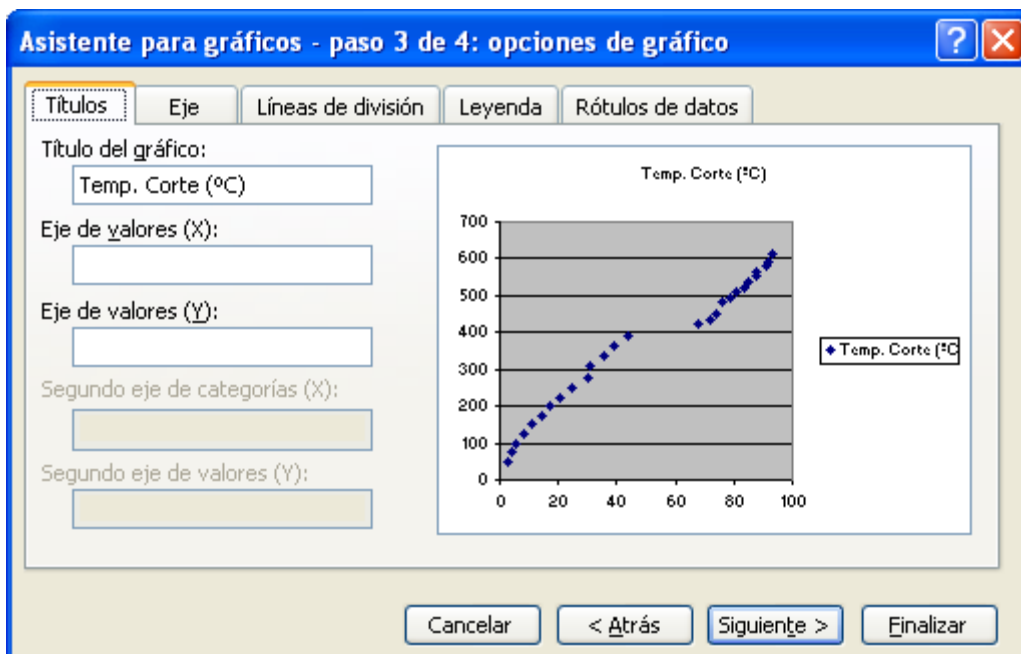
Se selecciona en **Tipo de Gráfico** el que se denomina **XY (Dispersión)**. Inmediatamente aparecerán las opciones para escoger la dispersión más adecuada. Se selecciona el primer gráfico (el que tiene los puntos dispersos sin unir por una línea)



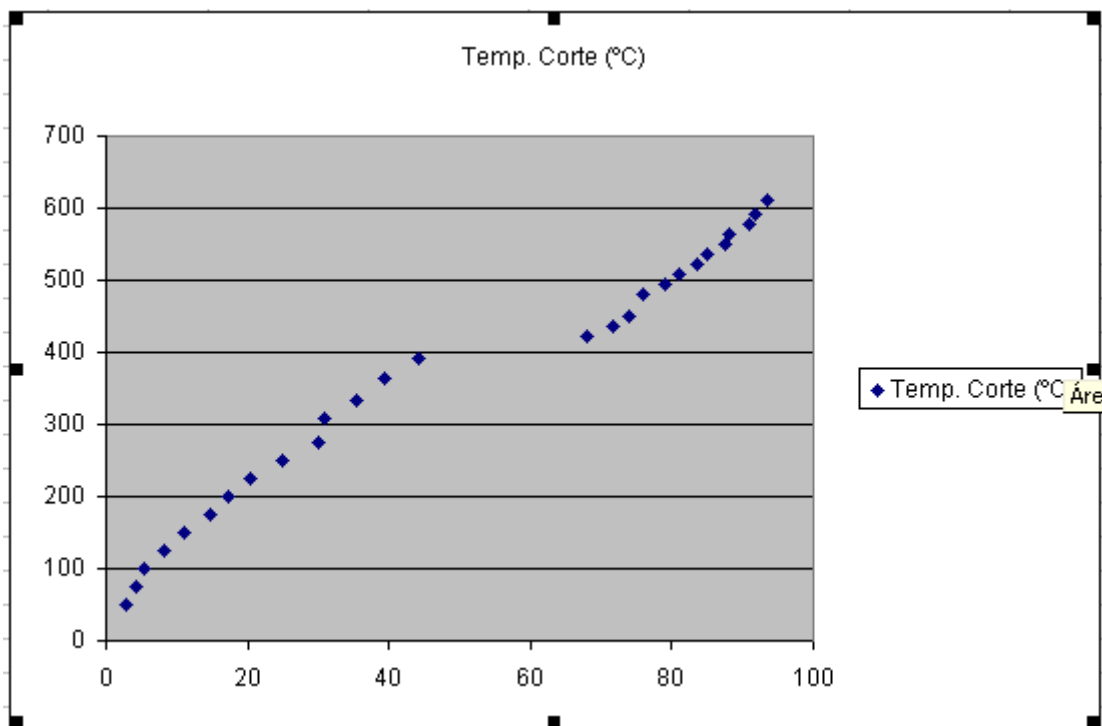
Luego se hace Clic en **Siguiente** y aparecerá una ventana como ésta:



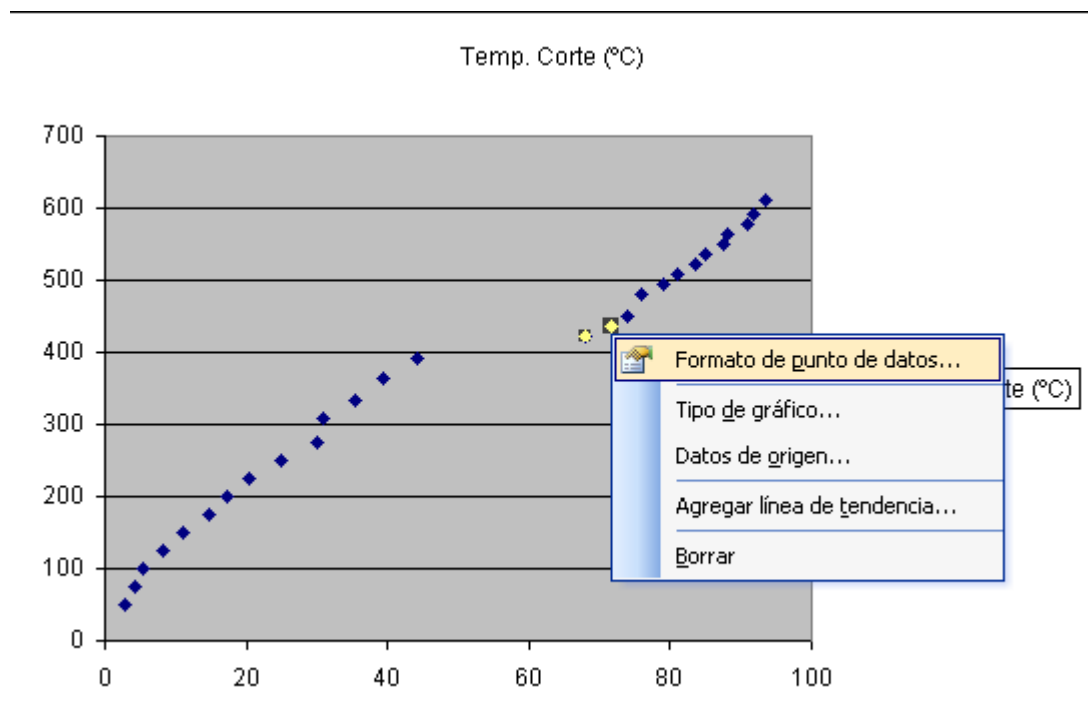
Se hace clic en **Siguiente**:

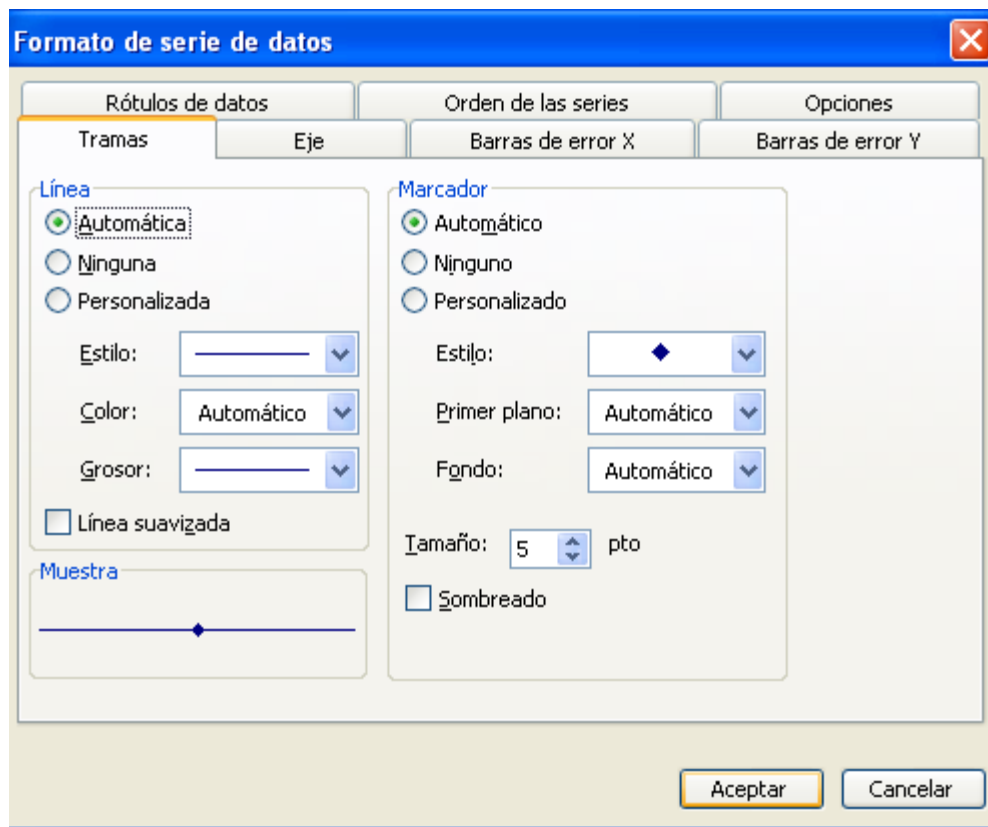


Luego de hacer click a la opción finalizar aparecerá el gráfico final que es la curva TBP. Dicho gráfico puede ser sometido a cambios para mejorar su apariencia (ver archivo de Excel).

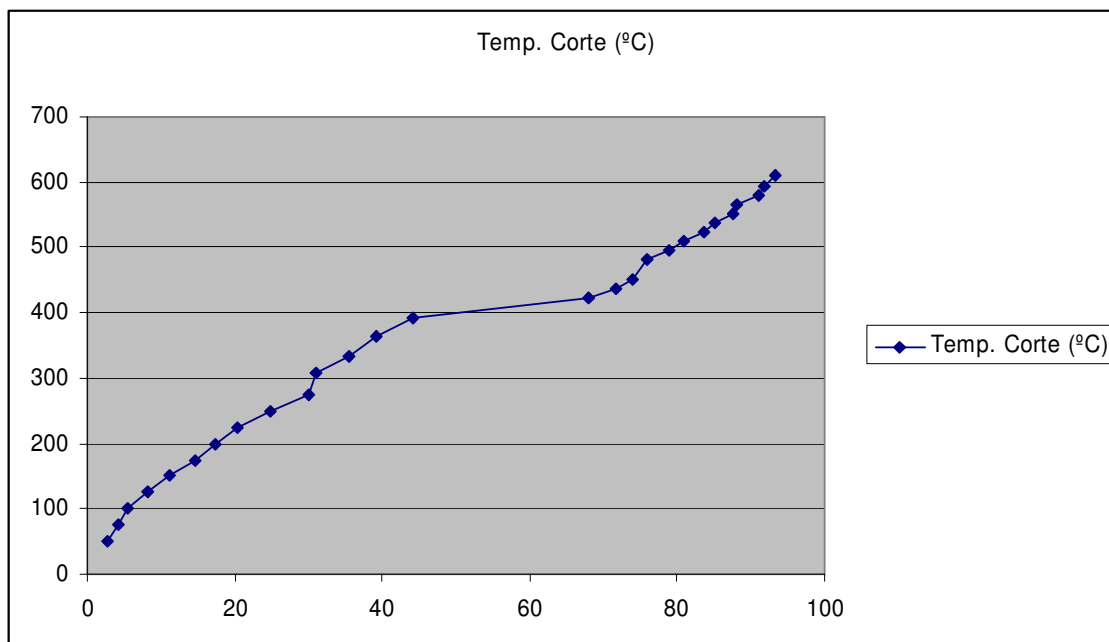


Los puntos pueden ser unidos haciendo click exactamente sobre uno de ellos y seleccionando la opción **Formato de serie de datos** que aparece en el menú desplegable. Posteriormente en la opción **“Tramas”** donde dice línea se marca la opción **“automática”**



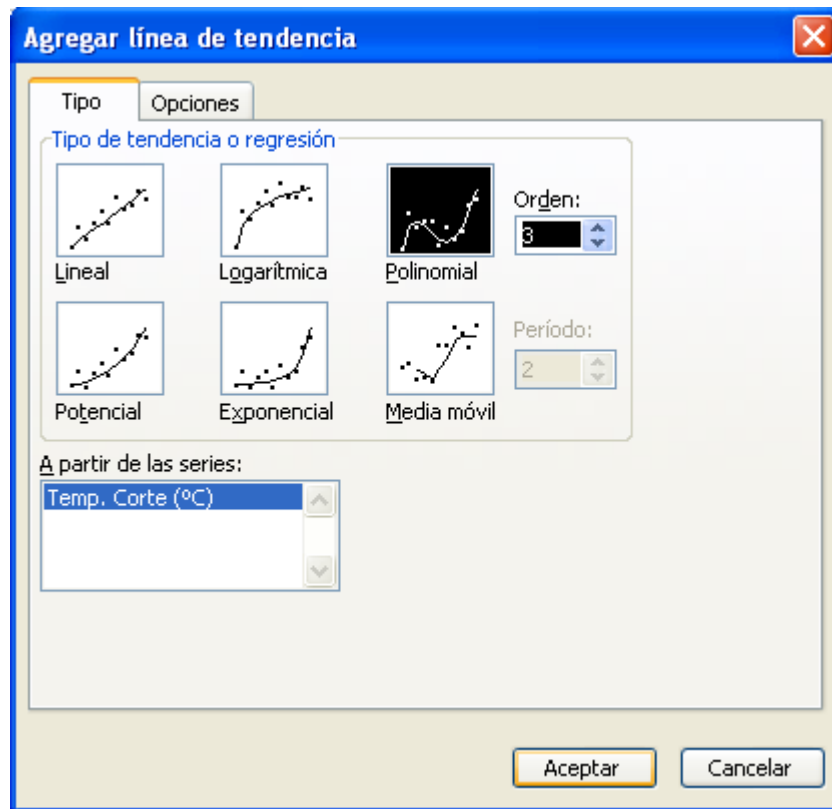
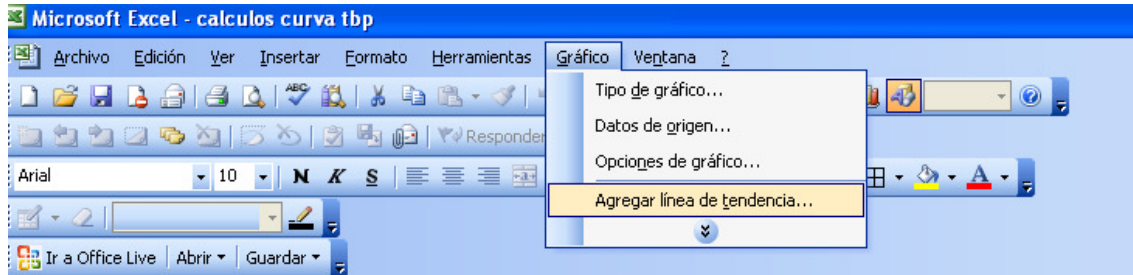


Quedando finalmente la gráfica con esta apariencia:

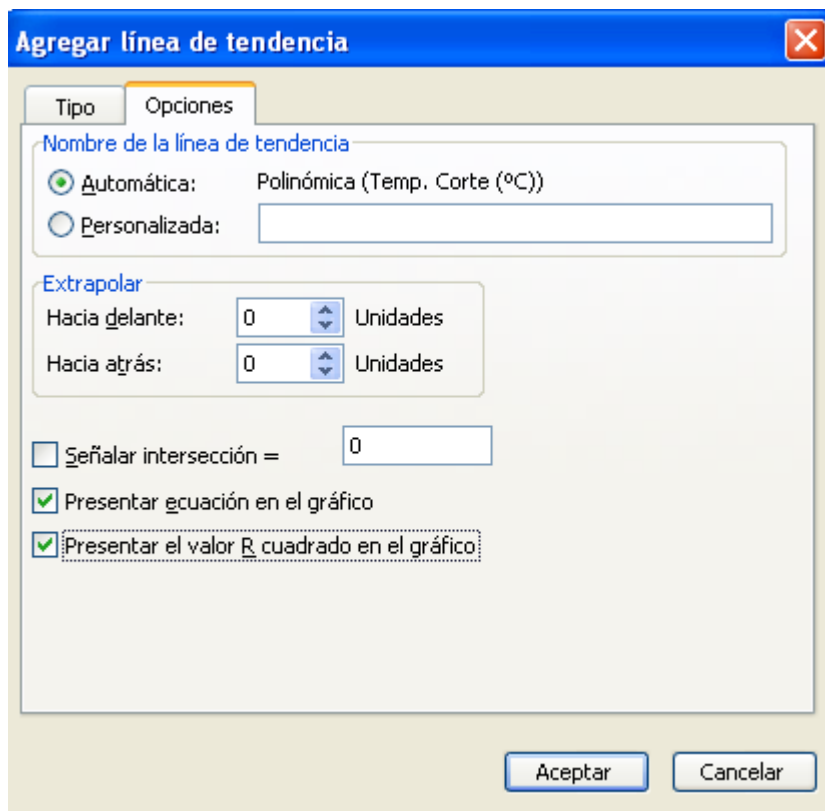


Ajuste de los Datos:

La ecuación de ajuste TBP viene dada por una función polinómica. Para obtener dicha ecuación y su respectiva correlación, en el menú principal se selecciona la opción **Gráfico** y en el menú desplegable se marca **Agregar línea de tendencia**



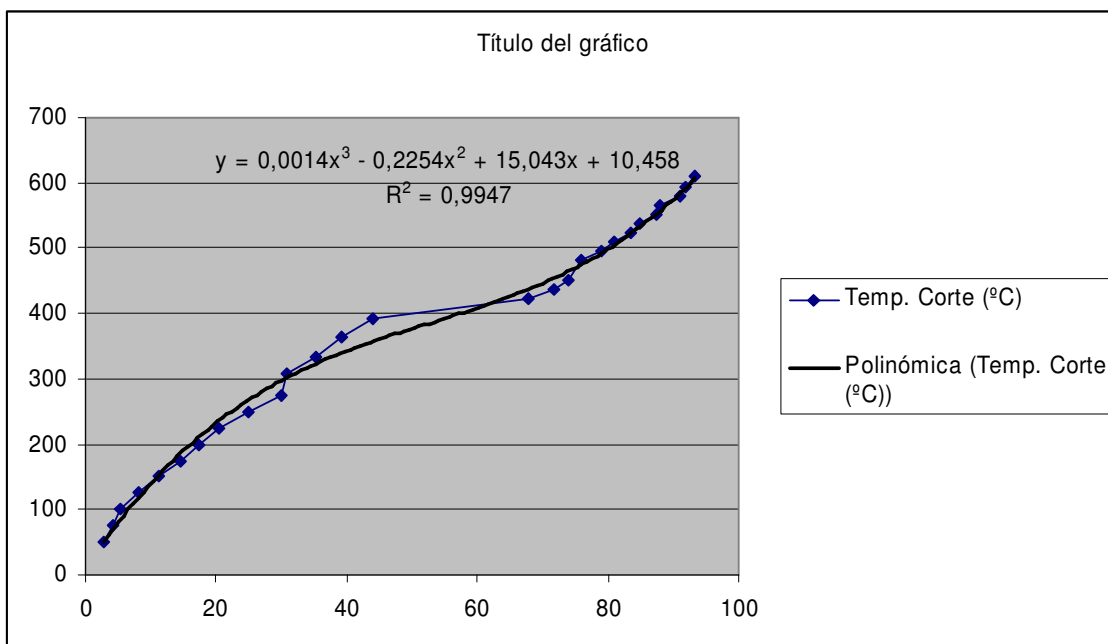
Para observar la ecuación de ajuste y su respectiva correlación se hace click en **Opciones**:



Como puede apreciarse en la imagen de la ventana anterior, aparecen marcadas las opciones

Presentar ecuación en el gráfico y Presentar valor de R cuadrado en el gráfico

Finalmente aparece la gráfica con esta apariencia:



Una vez obtenida la ecuación del ajuste, se procede finalmente a calcular las temperaturas correspondientes a 0, 10, 30, 50, 70, 90 y 100% de destilado, obteniéndose la siguiente tabla:

Tabla 4		
Rango de destilación TBP a 760 mm Hg para una muestra de crudo.		
% Destilado	TBP (°C)	TBP (°F)
0	10,46	50,82
10	142,65	288,77
30	297,39	567,30
50	381,41	718,54
70	461,91	863,44
90	606,09	1122,96
100	723,06	1333,51

Factor de Caracterización de Watson

Parafínicos K_w (13.0-13.5)

Nafténicos (10.5-13.2)

Aromáticos (9.5-12.5)