

**METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL EFECTO DE LAS  
PROPIEDADES PETROFÍSICAS EN LA RESPUESTA SÍSMICA, APOYADO EN  
REGISTROS DE POZO, MUESTRAS DE CAMPO Y PRUEBAS DE  
LABORATORIO EN UN MEDIO NO IDEAL.**

**OSCAR JAVIER BAUTISTA SÁNCHEZ  
YULIANA KATERINE MEJIA RALLÓN**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA  
2011**

**METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL EFECTO DE LAS  
PROPIEDADES PETROFÍSICAS EN LA RESPUESTA SÍSMICA, APOYADO EN  
REGISTROS DE POZO, MUESTRAS DE CAMPO Y PRUEBAS DE  
LABORATORIO EN UN MEDIO NO IDEAL.**

**OSCAR JAVIER BAUTISTA SÁNCHEZ  
YULIANA KATERINE MEJÍA RALLÓN**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO(A) DE PETRÓLEOS**

**Directores:**

**Geofísico M.Sc. ANDRÉS EDUARDO CALLE OCHOA  
Ingeniera de Petróleos M.Sc .OLGA PATRICIA ORTÍZ CANCINO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA  
2011**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Andrés Eduardo Calle, por su apoyo y guía durante todo el proyecto, por sus enseñanzas, consejos e infinita paciencia, y crear en nosotros una nueva visión de la ingeniería y el ejercicio profesional.

A Olga Patricia Ortiz, por haber cumplido un papel fundamental en la elaboración de este trabajo, por su disposición y apoyo en los momentos de duda y por la valiosa confianza que depositó en nosotros y en nuestro proyecto.

Al Instituto Colombiano del Petróleo, en especial al área de geofísica y al grupo de investigación Petrosísmica, cuyos miembros siempre dispuestos a solucionar dudas y a aportar soluciones a los distintos inconvenientes que surgieron a lo largo de este proyecto. De igual manera a Hernán Mantilla, Carlos Uribe, William Ocampo y todo el equipo del Laboratorio de Mecánica de rocas y del Laboratorio de Análisis Petrofísicos Especiales respectivamente.

A la Universidad Industrial de Santander y a sus docentes, por su formación y por brindarnos los espacios para investigar y desarrollar parte de nuestro proyecto.

Finalmente a nuestras familias, amigos y todos los que de una u otra manera estuvieron presentes durante esta etapa de nuestra formación tanto personal como profesional.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>29</b>
<b>1. MARCO TEORICO.....</b>	<b>30</b>
<b>1.1 VELOCIDAD Y MODULOS ELÁSTICOS .....</b>	<b>30</b>
<b>1.2 EFECTO DE LA PRESIÓN Y LA TEMPERATURA EN EL DESPLAZAMIENTO DE LA ONDA ..</b>	<b>32</b>
<b>1.3 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS.....</b>	<b>34</b>
<b>1.4 ATENUACION .....</b>	<b>37</b>
<b>1.5 RIGIDEZ (STRENGTH) DE LAS ROCAS.....</b>	<b>38</b>
<b>1.6 PROPIEDADES ACÚSTICAS DE LAS ROCAS.....</b>	<b>39</b>
<b>1.7 MODELADO .....</b>	<b>39</b>
1.7.1 GENERACIÓN DE SISMOGRAMAS SINTÉTICOS .....	39
<b>1.8 ANÁLISIS AVO (AMPLITUD vs OFFSET).....</b>	<b>41</b>
<b>1.9 SUBSTITUCIÓN DE FLUIDOS .....</b>	<b>42</b>
<b>1.10 MODELOS USADOS .....</b>	<b>46</b>
1.10.1 MODELO DE BIOT-GASSMANN .....	46
1.10.2 ECUACIONES DE ZOEPPRITZ .....	49
1.10.3 APROXIMACIÓN DE AKI Y RICHARDS .....	53
1.10.4 ECUACIÓN DE LA ONDA ELÁSTICA.....	54
1.10.5 ECUACIONES DE CASTAGNA PARA LA PREDICCIÓN DE LA DENSIDAD.....	55
<b>2. METODOLOGÍA USADA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO.....</b>	<b>57</b>
<b>3. ELABORACIÓN Y ANÁLISIS DE MUESTRAS .....</b>	<b>61</b>
<b>3.1 GENERALIDADES DE LAS ROCAS SINTÉTICAS .....</b>	<b>61</b>
3.1.1 PROPIEDADES DE LA RESINA UTILIZADA .....	62
<b>3.2 GENERALIDADES DE LA ROCA BEREÁ .....</b>	<b>62</b>
3.2.1 DEFINICIÓN.....	62
3.2.2 COMPONENTES MINEROLÓGICOS .....	63
<b>3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>63</b>
<b>3.4 MUESTRAS USADAS .....</b>	<b>64</b>
3.4.1 PROPIEDADES PETROFÍSICAS DE LAS ROCAS USADAS .....	65
<b>3.5 MONTAJE EXPERIMENTAL .....</b>	<b>66</b>

3.5.1	EQUIPOS USADOS.....	67
<b>3.6</b>	<b>ADQUISICIÓN DE DATOS Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO .....</b>	<b>69</b>
3.6.1	ADQUISICIÓN DE DATOS .....	69
3.6.2	FASE DE VALIDACIÓN .....	70
<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS VELOCIDADES BAJO DIFERENTES</b>	
	<b>CONDICIONES .....</b>	<b>72</b>
<b>4.1</b>	<b>CASO 1: POROSIDAD DEL 10% Y PETRÓLEO DE 5°API .....</b>	<b>84</b>
4.1.1	ONDA COMPRESIONAL CONTRA TEMPERATURA A DISTINTAS PRESIONES, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE ACEITE.....	84
4.1.2	ONDA COMPRESIONAL CONTRA PRESION A DISTINTAS TEMPERATURAS, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE ACEITE.....	90
<b>4.2</b>	<b>CASO 2: POROSIDAD DEL 10% Y PETROLEO DE 15°API .....</b>	<b>98</b>
4.2.1	ONDA COMPRESIONAL CONTRA TEMPERATURA A DISTINTAS PRESIONES, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE ACEITE.....	98
4.2.2	ONDA COMPRESIONAL CONTRA PRESION A DISTINTAS TEMPERATURAS, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE PETROLEO .....	104
<b>4.3</b>	<b>CASO 3: POROSIDAD DEL 10% Y PETROLEO DE 25°API .....</b>	<b>112</b>
4.3.1	ONDA COMPRESIONAL CONTRA TEMPERATURA A DISTINTAS PRESIONES, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE ACEITE.....	112
4.3.2	ONDA COMPRESIONAL CONTRA PRESION A DISTINTAS TEMPERATURAS, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE PETROLEO .....	118
<b>4.4</b>	<b>CASO 4: POROSIDAD DEL 20% Y PETROLEO DE 5°API .....</b>	<b>126</b>
4.4.1	ONDA COMPRESIONAL CONTRA TEMPERATURA A DISTINTAS PRESIONES, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE ACEITE.....	126
4.4.2	ONDA COMPRESIONAL CONTRA PRESION A DISTINTAS TEMPERATURAS, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE PETROLEO .....	132
<b>4.5</b>	<b>CASO 5: POROSIDAD DEL 20% Y PETROLEO DE 15°API .....</b>	<b>140</b>
4.5.1	ONDA COMPRESIONAL CONTRA TEMPERATURA A DISTINTAS PRESIONES, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE ACEITE.....	140
4.5.2	ONDA COMPRESIONAL CONTRA PRESION A DISTINTAS TEMPERATURAS, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE PETROLEO .....	146
<b>4.6</b>	<b>CASO 6: POROSIDAD DEL 20% Y PETROLEO DE 25°API .....</b>	<b>154</b>
4.6.1	ONDA COMPRESIONAL CONTRA TEMPERATURA A DISTINTAS PRESIONES, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE ACEITE.....	154
4.6.2	ONDA COMPRESIONAL CONTRA PRESION A DISTINTAS TEMPERATURAS, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE PETROLEO .....	160
<b>4.7</b>	<b>CASO 7: POROSIDAD DEL 30% Y PETROLEO DE 5°API .....</b>	<b>168</b>
4.7.1	ONDA COMPRESIONAL CONTRA TEMPERATURA A DISTINTAS PRESIONES, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE ACEITE.....	168
4.7.2	ONDA COMPRESIONAL CONTRA PRESION A DISTINTAS TEMPERATURAS, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE PETROLEO .....	174
<b>4.8</b>	<b>CASO 8: POROSIDAD DEL 30% Y PETROLEO DE 15°API .....</b>	<b>182</b>

4.8.1	ONDA COMPRESIONAL CONTRA TEMPERATURA A DISTINTAS PRESIONES, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE ACEITE.....	182
4.8.2	ONDA COMPRESIONAL CONTRA PRESION A DISTINTAS TEMPERATURAS, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE PETROLEO .....	188
<b>4.9</b>	<b>CASO 9: POROSIDAD DEL 30% Y PETROLEO DE 25°API .....</b>	<b>196</b>
4.9.1	ONDA COMPRESIONAL CONTRA TEMPERATURA A DISTINTAS PRESIONES, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE ACEITE.....	196
4.9.2	ONDA COMPRESIONAL CONTRA PRESION A DISTINTAS TEMPERATURAS, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE PETRÓLEO .....	202
4.9.3	ONDA COMPRESIONAL CONTRA POROSIDAD A PRESION Y TEMPERATURA CONSTANTES, Y DISTINTOS TIPOS DE PETRÓLEO .....	210
<b>4.10</b>	<b>GRAFICAS COMPARATIVAS DE VELOCIDAD DE LA ONDA P Vs TEMPERATURA A DIFERENTES CONDICIONES .....</b>	<b>211</b>
<b>4.11</b>	<b>GRAFICAS COMPARATIVAS DE VELOCIDAD DE LA ONDA P Vs PRESIÓN A DIFERENTES CONDICIONES .....</b>	<b>213</b>
<b>4.12</b>	<b>GRAFICAS COMPARATIVAS DE VELOCIDAD DE LA ONDA P Vs TEMPERATURA A DIFERENTES POROSIDADES Y SATURACIONES DE PETRÓLEO CON GRAVEDAD API=5. ....</b>	<b>215</b>
<b>4.13</b>	<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>217</b>
<b>5.</b>	<b>APLICACIÓN AL CAMPO TENERIFE.....</b>	<b>220</b>
<b>5.1</b>	<b>GENERALIDADES DE TENERIFE: .....</b>	<b>220</b>
5.1.1	UBICACIÓN .....	220
5.1.2	RESEÑA HISTÓRICA.....	220
5.1.3	POZOS EXISTENTES.....	221
5.1.4	FLUIDOS.....	222
5.1.5	AMBIENTES DE DEPOSITACIÓN .....	222
5.1.6	MODELO ESTRUCTURAL.....	223
5.1.7	MODELO ESTRATIGRAFICO.....	225
<b>5.2</b>	<b>MODELADO .....</b>	<b>226</b>
5.2.1	ELABORACION DE LOS SISMOGRAMAS SINTETICOS .....	226
5.2.2	CAMPO TENERIFE: POZO TENERIFE 1 Y TENERIFE 2 .....	226
5.2.3	ANALISIS AVO (Amplitud Vs Offset) .....	232
5.2.4	TENDENCIA DE VELOCIDADES COMPRESIONALES EN EL CAMPO TENERIFE .....	234
5.2.5	ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS .....	237
<b>6.</b>	<b>METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL EFECTO DE LAS PROPIEDADES PETROFÍSICAS EN LA RESPUESTA SÍSMICA .....</b>	<b>238</b>
<b>6.1</b>	<b>IDENTIFICACION DE PROPIEDADES PETROFISICAS EN ZONAS CERCANAS A LA CARA DEL POZO.....</b>	<b>238</b>
<b>6.2</b>	<b>IDENTIFICACION DE PROPIEDADES PETROFISICAS ENTRE POZOS.....</b>	<b>239</b>
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>241</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>243</b>

**BIBLIOGRAFÍA..... 244**  
**ANEXOS..... 247**

## TABLA DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Mediciones geometricas de masa y volumen de las muestras analizadas en el laboratorio.....	248
<b>Anexo 2.</b> Ecuación De Shuey.....	250
<b>Anexo 3.</b> Intercepto Y gradiente.....	251
<b>Anexo 4.</b> Valores Registro Onda P Pozo Tenerife.....	252

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Variación de la amplitud con el offset para arenas saturadas con salmuera y saturadas con gas. ....	41
Figura 2. Ondas generadas por una onda P incidente.....	42
Figura 3. Coeficientes de reflexión y transmisión por ondas P-SV .....	51
Figura 4. Metodología del Proyecto .....	60
Figura 5. Muestras de roca Berea.....	63
Figura 6. Plug sintético (derecha) y roca Berea (izquierda) .....	65
Figura 7. Montaje de la muestra. ....	67
Figura 8. MTS para ensayos triaxiales.....	67
Figura 9. MTS para ensayos triaxiales.....	68
Figura 10. Respuesta acústica de la Roca Berea y Sintética contra temperatura. ....	70
Figura 11 Respuesta acústica de la Roca Berea y Sintética contra presión.....	71
Figura 12. Registros sintéticos de arenas con porosidad del 10%.....	72
Figura 13. Registros sintéticos de arenas con porosidad del 20%.....	73
Figura 14. Registros sintéticos de arenas con porosidad del 30%.....	73
Figura 15. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $S_o_i=100\%$ y 2500 PSI .....	84
Figura 16. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $S_o_i=100\%$ y 3000 PSI .....	85
Figura 17. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura, a $S_o_i=100\%$ y 3500 PSI .....	85
Figura 18. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $S_o_i=75\%$ , 2500 PSI .....	86
Figura 19. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $S_o_i=75\%$ , 3000 PSI .....	86
Figura 20. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $S_o_i=75\%$ , 3500 PSI .....	87
Figura 21. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $S_o_i=50\%$ , 2500 PSI .....	87
Figura 22. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $S_o_i=50\%$ , 3000 PSI .....	88
Figura 23. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $S_o_i=50\%$ , 3500 PSI .....	88
Figura 24. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $S_o_i=25\%$ , 2500 PSI .....	89
Figura 25. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $S_o_i=25\%$ , 3000 PSI .....	89
Figura 26. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $S_o_i=25\%$ , 3500 PSI .....	90

Figura 27. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , $122^\circ F$ .....	90
Figura 28. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , $167^\circ F$ .....	91
Figura 29. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , $212^\circ F$ .....	91
Figura 30. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , $257^\circ F$ .....	92
Figura 31. . Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $122^\circ F$ .....	92
Figura 32. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $167^\circ F$ .....	93
Figura 33. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $212^\circ F$ .....	93
Figura 34. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $257^\circ F$ .....	94
Figura 35. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , $122^\circ F$ .....	94
Figura 36. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , $167^\circ F$ .....	95
Figura 37. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , $212^\circ F$ .....	95
Figura 38. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , $257^\circ F$ .....	96
Figura 39. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , $122^\circ F$ .....	96
Figura 40. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , $167^\circ F$ .....	97
Figura 41. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , $212^\circ F$ .....	97
Figura 42. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , $257^\circ F$ .....	98
Figura 43. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 2500 psi .....	98
Figura 44. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 3000 psi .....	99
Figura 45. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 3500 psi .....	99
Figura 46. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 2500 psi .....	100
Figura 47. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 3000 psi .....	100

Figura 48. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 3500 psi .....	101
Figura 49. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 2500 psi .....	101
Figura 50. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 3000 psi .....	102
Figura 51. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 3500 psi .....	102
Figura 52. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 2500 psi .....	103
Figura 53. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 3000 psi .....	103
Figura 54. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 3500 psi .....	104
Figura 55. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , 122°F .....	104
Figura 56. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , 167°F .....	105
Figura 57. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , 212°F .....	105
Figura 58. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , 257°F .....	106
Figura 59. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , 122°F .....	106
Figura 60. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , 167°F .....	107
Figura 61. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , 212°F .....	107
Figura 62. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , 257°F .....	108
Figura 63. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , 122°F .....	108
Figura 64. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , 167°F .....	109
Figura 65. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , 212°F .....	109
Figura 66. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , 257°F .....	110
Figura 67. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , 122°F .....	110
Figura 68. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , 167°F .....	111

Figura 69. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , $212^\circ\text{F}$ .....	111
Figura 70. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , $257^\circ\text{F}$ .....	112
Figura 71. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 2500 PSI.....	112
Figura 72. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 3000 PSI.....	113
Figura 73. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 3500 PSI.....	113
Figura 74. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 2500 PSI.....	114
Figura 75. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 3000 PSI.....	114
Figura 76. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 3500 PSI.....	115
Figura 77. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 2500 PSI.....	115
Figura 78. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 3000 PSI.....	116
Figura 79. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 3500 PSI.....	116
Figura 80. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 2500 PSI.....	117
Figura 81. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 3000 PSI.....	117
Figura 82. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 3500 PSI.....	118
Figura 83. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , $122^\circ\text{F}$ .....	118
Figura 84. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , $167^\circ\text{F}$ .....	119
Figura 85. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , $212^\circ\text{F}$ .....	119
Figura 86. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , $257^\circ\text{F}$ .....	120
Figura 87. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $122^\circ\text{F}$ .....	120
Figura 88. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $167^\circ\text{F}$ .....	121
Figura 89. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $212^\circ\text{F}$ .....	121

Figura 90. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , 257°F.....	122
Figura 91. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , 167°F.....	122
Figura 92. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , 212°F.....	123
Figura 93. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , 257°F.....	123
Figura 94. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , 122°F.....	124
Figura 95. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , 167°F.....	124
Figura 96. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , 212°F.....	125
Figura 97. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , 257°F.....	125
Figura 98. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 2500 PSI.....	126
Figura 99. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 3000 PSI.....	126
Figura 100. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 3500 PSI.....	127
Figura 101. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 2500 PSI.....	127
Figura 102. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 3000 PSI.....	128
Figura 103. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 3500 PSI.....	128
Figura 104. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 2500 PSI.....	129
Figura 105. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 3000 PSI.....	129
Figura 106. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 2500 PSI.....	130
Figura 107. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 2500 PSI.....	130
Figura 108. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 3000 PSI.....	131
Figura 109. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 3500 PSI.....	131
Figura 110. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , 122°F.....	132

Figura 111. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , $167^\circ\text{F}$ .....	132
Figura 112. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , $212^\circ\text{F}$ .....	133
Figura 113. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , $257^\circ\text{F}$ .....	133
Figura 114. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $122^\circ\text{F}$ .....	134
Figura 115. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $167^\circ\text{F}$ .....	134
Figura 116. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $212^\circ\text{F}$ .....	135
Figura 117. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $257^\circ\text{F}$ .....	135
Figura 118. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , $122^\circ\text{F}$ .....	136
Figura 119. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , $167^\circ\text{F}$ .....	136
Figura 120. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , $212^\circ\text{F}$ .....	137
Figura 121. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , $257^\circ\text{F}$ .....	137
Figura 122. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , $122^\circ\text{F}$ .....	138
Figura 123. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , $167^\circ\text{F}$ .....	138
Figura 124. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , $212^\circ\text{F}$ .....	139
Figura 125. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , $257^\circ\text{F}$ .....	139
Figura 126. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 2500 PSI .....	140
Figura 127. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 3000 PSI .....	140
Figura 128. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 3500 PSI .....	141
Figura 129. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 2500 PSI .....	141
Figura 130. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 3000 PSI .....	142
Figura 131. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 3500 PSI .....	142

Figura 132. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 2500 PSI .....	143
Figura 133. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 3000 PSI .....	143
Figura 134. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 3500 PSI .....	144
Figura 135. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 2500 PSI .....	144
Figura 136. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 3000 PSI .....	145
Figura 137. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 3500 PSI .....	145
Figura 138. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , 122°F .....	146
Figura 139. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , 167°F .....	146
Figura 140. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , 212°F .....	147
Figura 141. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , 257°F .....	147
Figura 142. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , 122°F .....	148
Figura 143. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , 167°F .....	148
Figura 144. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , 212°F .....	149
Figura 145. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , 257°F .....	149
Figura 146. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , 122°F .....	150
Figura 147. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , 167°F .....	150
Figura 148. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , 212°F .....	151
Figura 149. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , 257°F .....	151
Figura 150. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , 122°F .....	152
Figura 151. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , 167°F .....	152
Figura 152. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , 212°F .....	153

Figura 153. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , $257^\circ\text{F}$ .....	153
Figura 154. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 2500 PSI .....	154
Figura 155. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 3000 PSI .....	154
Figura 156. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 3500 PSI .....	155
Figura 157. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 2500 PSI .....	155
Figura 158. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 3000 PSI .....	156
Figura 159. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 3500 PSI .....	156
Figura 160. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 2500 PSI .....	157
Figura 161. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 3000 PSI .....	157
Figura 162. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 3500 PSI .....	158
Figura 163. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 2500 PSI .....	158
Figura 164. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 3000 PSI .....	159
Figura 165. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 3500 PSI .....	159
Figura 166. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , $122^\circ\text{F}$ .....	160
Figura 167. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , $167^\circ\text{F}$ .....	160
Figura 168. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , $212^\circ\text{F}$ .....	161
Figura 169. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , $257^\circ\text{F}$ .....	161
Figura 170. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $122^\circ\text{F}$ .....	162
Figura 171. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $167^\circ\text{F}$ .....	162
Figura 172. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $212^\circ\text{F}$ .....	163
Figura 173. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $257^\circ\text{F}$ .....	163

Figura 174. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , 122°F .....	164
Figura 175. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , 167°F .....	164
Figura 176. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , 212°F .....	165
Figura 177 Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , 257°F .....	165
Figura 178. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , 122°F .....	166
Figura 179. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , 167°F .....	166
Figura 180. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , 212°F .....	167
Figura 181. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , 257°F .....	167
Figura 182. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 2500 PSI .....	168
Figura 183. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 3000 PSI .....	168
Figura 184. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 3500 PSI .....	169
Figura 185. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 2500 PSI .....	169
Figura 186. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 3000 PSI .....	170
Figura 187. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 3500 PSI .....	170
Figura 188. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 2500 PSI .....	171
Figura 189. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 3000 PSI .....	171
Figura 190. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 3500 PSI .....	172
Figura 191. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 2500 PSI .....	172
Figura 192. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 3000 PSI .....	173
Figura 193. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 3500 PSI .....	173
Figura 194. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , 122°F .....	174

Figura 195. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , $167^\circ F$ .....	174
Figura 196. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , $212^\circ F$ .....	175
Figura 197. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , $257^\circ F$ .....	175
Figura 198. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $122^\circ F$ .....	176
Figura 199. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $167^\circ F$ .....	176
Figura 200. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $212^\circ F$ .....	177
Figura 201. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $257^\circ F$ .....	177
Figura 202. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , $122^\circ F$ .....	178
Figura 203. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , $167^\circ F$ .....	178
Figura 204. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , $212^\circ F$ .....	179
Figura 205. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , $257^\circ F$ .....	179
Figura 206. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , $122^\circ F$ .....	180
Figura 207. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , $167^\circ F$ .....	180
Figura 208. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , $212^\circ F$ .....	181
Figura 209. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , $257^\circ F$ .....	181
Figura 210. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 2500 PSI .....	182
Figura 211. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 3000 PSI .....	182
Figura 212. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 3500 PSI .....	183
Figura 213. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 2500 PSI .....	183
Figura 214. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 3000 PSI .....	184
Figura 215. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 3500 PSI .....	184

Figura 216. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 2500 PSI .....	185
Figura 217. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 3000 PSI .....	185
Figura 218. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 3500 PSI .....	186
Figura 219. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 2500 PSI .....	186
Figura 220. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 3000 PSI .....	187
Figura 221. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 3500 PSI .....	187
Figura 222. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , 112°F .....	188
Figura 223. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , 167°F .....	188
Figura 224. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , 212°F .....	189
Figura 225. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , 257°F .....	189
Figura 226. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , 122°F .....	190
Figura 227. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , 167°F .....	190
Figura 228. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , 212°F .....	191
Figura 229. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , 257°F .....	191
Figura 230. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , 122°F .....	192
Figura 231. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , 167°F .....	192
Figura 232. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , 212°F .....	193
Figura 233. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=50\%$ , 257°F .....	193
Figura 234. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , 122°F .....	194
Figura 235. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , 167°F .....	194
Figura 236. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , 212°F .....	195

Figura 237. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=25\%$ , $257^\circ\text{F}$ .....	195
Figura 238. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 2500 PSI .....	196
Figura 239. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 3000 PSI .....	196
Figura 240. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=100\%$ , 3500 PSI .....	197
Figura 241. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 2500 PSI .....	197
Figura 242. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 3000 PSI .....	198
Figura 243. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=75\%$ , 3500 PSI .....	198
Figura 244. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 2500 PSI .....	199
Figura 245. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 3000 PSI .....	199
Figura 246. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=50\%$ , 3500 PSI .....	200
Figura 247. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 2500 PSI .....	200
Figura 248. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 3000 PSI .....	201
Figura 249. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $So_i=25\%$ , 3500 PSI .....	201
Figura 250. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , $122^\circ\text{F}$ .....	202
Figura 251. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , $167^\circ\text{F}$ .....	202
Figura 252. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , $212^\circ\text{F}$ .....	203
Figura 253. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=100\%$ , $257^\circ\text{F}$ .....	203
Figura 254. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $122^\circ\text{F}$ .....	204
Figura 255. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $167^\circ\text{F}$ .....	204
Figura 256. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $212^\circ\text{F}$ .....	205
Figura 257. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $So_i=75\%$ , $257^\circ\text{F}$ .....	205

Figura 258. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $S_{o_i}=50\%$ , 122°F.....	206
Figura 259. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $S_{o_i}=50\%$ , 167°F.....	206
Figura 260. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $S_{o_i}=50\%$ , 212°F.....	207
Figura 261. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $S_{o_i}=50\%$ , 257°F.....	207
Figura 262. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $S_{o_i}=25\%$ , 122°F.....	208
Figura 263. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $S_{o_i}=25\%$ , 167°F.....	208
Figura 264. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $S_{o_i}=25\%$ , 212°F.....	209
Figura 265. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $S_{o_i}=25\%$ , 257°F.....	209
Figura 266. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de porosidad a $S_{o_i}=100\%$ , y diferentes tipos de petróleo.....	210
Figura 267. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de porosidad a $S_{o_i}=100\%$ , y diferentes tipos de petróleo.....	210
Figura 268. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de porosidad a $S_{o_i}=100\%$ , y diferentes tipos de petróleo.....	211
Figura 269. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $S_{o_i}=100\%$ , y diferentes presiones.....	211
Figura 270. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $S_{o_i}=75\%$ , y diferentes presiones.....	212
Figura 271. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $S_{o_i}=50\%$ , y diferentes presiones.....	212
Figura 272. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $S_{o_i}=25\%$ , y diferentes presiones.....	213
Figura 273. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $S_{o_i}=100\%$ , y diferentes temperaturas.....	213
Figura 274. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $S_{o_i}=75\%$ , y diferentes temperaturas.....	214
Figura 275. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $S_{o_i}=50\%$ , y diferentes temperaturas.....	214
Figura 276. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a $S_{o_i}=25\%$ , y diferentes temperaturas.....	215
Figura 277. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $S_{o_i}=100\%$ , y diferentes porosidades.....	215
Figura 278. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $S_{o_i}=50\%$ , y diferentes porosidades.....	216

Figura 279. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a $S_{oi}=25\%$ , y diferentes porosidades .....	216
Figura 280. Localización del campo Tenerife .....	220
Figura 281. Localización de los pozos del campo Tenerife. ....	222
Figura 282. Esquema de Modelo Depositacional en Ríos Meándricos Miall, A.D. (1987). ....	223
Figura 283. Modelo Estructural del Campo Tenerife.....	224
Figura 284. Columna Estratigráfica del Campo Tenerife. ....	225
Figura 285. Ondícula tipo Ricker, fase cero, para la generación de sismogramas sintéticos 35Hz.....	226
Figura 286. Registros iniciales Pozo Tenerife 2.....	227
Figura 287. Registros sintéticos de densidad para arcillas y arenas. ....	228
Figura 288. Registro de densidad final. ....	228
Figura 289. Sismogramas sintéticos modelados con (de izquierda a derecha) Zoeppritz, Aki-Richards y Elastic-wave. ....	229
Figura 290. Sismogramas sintéticos (de izquierda a derecha) Caso base, $S_o=50\%$ , $S_o=75\%$ y $S_o=100\%$ Tenerife 1 (Gráfica superior) y Tenerife 2 (Gráfica inferior)	230
Figura 291. Análisis de amplitudes pozo Tenerife 1 a-Caso Base b- $S_{oi}=50\%$ c- $S_{oi}=75\%$ y d- $S_{oi}=100\%$ . ....	231
Figura 292. Análisis de amplitudes pozo Tenerife 2 a-Caso Base b- $S_{oi}=50\%$ c- $S_{oi}=75\%$ y d- $S_{oi}=100\%$ . ....	232
Figura 293. Crossplot Análisis de Gradiente A vs B Tenerife 1 arriba izquierda- Caso Base Arriba derecha- $S_{oi}=50\%$ abajo izquierda- $S_{oi}=75\%$ y abajo derecha- $S_{oi}=100\%$ . ....	233
Figura 294. Crossplot Análisis de Gradiente A vs B Tenerife 2 arriba izquierda- Caso Base Arriba derecha- $S_{oi}=50\%$ abajo izquierda- $S_{oi}=75\%$ y abajo derecha- $S_{oi}=100\%$ . ....	233
Figura 295. Variación de la velocidad de propagación de la onda P a diferentes valores de $S_{oi}$ , a 2500 PSI .....	236
Figura 296. Variación de la velocidad de propagación de la onda P a diferentes valores de $S_{oi}$ , a 3000 PSI .....	236
Figura 297. Variación de la velocidad de propagación de la onda P a diferentes valores de $S_{oi}$ , a 3500 PSI .....	237

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de la resina .....	62
Tabla 2. Componentes mineralógicos roca Berea .....	63
Tabla 3. Factores y rangos de las mediciones de laboratorio.....	64
Tabla 4. Propiedades petrofísicas de las rocas usadas.....	65
Tabla 5. Condiciones de temperatura y presión de los ensayos de laboratorio .....	66
Tabla 6. Resultados de Vp y Vs para una roca de porosidad del 10%, bajo diferentes valores de presión, temperatura y saturación inicial de aceite, con gravedad API=5.....	75
Tabla 7. Resultados de Vp y Vs para una roca de porosidad del 10%, bajo diferentes valores de presión, temperatura y saturación inicial de aceite, con gravedad API=15.....	76
Tabla 8. Resultados de Vp y Vs para una roca de porosidad del 10%, bajo diferentes valores de presión, temperatura y saturación inicial de aceite, con gravedad API=25.....	77
Tabla 9. Resultados de Vp y Vs para una roca de porosidad del 20%, bajo diferentes valores de presión, temperatura y saturación inicial de aceite, con gravedad API=5.....	78
Tabla 10. Resultados de Vp y Vs para una roca de porosidad del 20%, bajo diferentes valores de presión, temperatura y saturación inicial de aceite, con gravedad API=15.....	79
Tabla 11. Resultados de Vp y Vs para una roca de porosidad del 20%, bajo diferentes valores de presión, temperatura y saturación inicial de aceite, con gravedad API=25.....	80
Tabla 12. Resultados de Vp y Vs para una roca de porosidad del 30%, bajo diferentes valores de presión, temperatura y saturación inicial de aceite, con gravedad API=5.....	81
Tabla 13. Resultados de Vp y Vs para una roca de porosidad del 30%, bajo diferentes valores de presión, temperatura y saturación inicial de aceite, con gravedad API=15.....	82
Tabla 14. Resultados de Vp y Vs para una roca de porosidad del 30%, bajo diferentes valores de presión, temperatura y saturación inicial de aceite, con gravedad API=25.....	83
Tabla 15. Resultados de Vp y Vs para el campo TENERIFE, bajo diferentes valores de presión, y saturación inicial de aceite, con gravedad API=22,8.....	235

## RESUMEN

**TÍTULO:** METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL EFECTO DE LAS PROPIEDADES PETROFÍSICAS EN LA RESPUESTA SÍSMICA, APOYADO EN REGISTROS DE POZO, MUESTRAS DE CAMPO Y PRUEBAS DE LABORATORIO EN UN MEDIO NO IDEAL<sup>1</sup>.

**AUTORES:** OSCAR JAVIER BAUTISTA SÁNCHEZ- YULIANA MEJÍA RALLÓN<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVE:** Respuesta acústica, Rocas sintéticas, Roca Berea, Efecto de la presión y la temperatura en la propagación de las ondas.

### DESCRIPCIÓN:

Actualmente el proceso exploratorio ha cobrado gran importancia, buscando disminuir en él los altos niveles de incertidumbre y los costos que este conlleva.

La búsqueda de petróleo acarrea consigo una serie de dificultades, afirmar la presencia de una acumulación requiere de un extenso conocimiento de la geología de la zona, de la identificación de rutas de migración y la presencia de formaciones o fallas que permitan su entrapamiento, a su vez, se requiere de un método que confirme la presencia del hidrocarburo en un sitio específico, uno de estos métodos es la sísmica, el cual basado en la generación y análisis de ondas y sus fenómenos de transmisión y reflexión busca dar una imagen del subsuelo, sin embargo, esta imagen puede llegar a ser ambigua, dando entonces por sentado la presencia de un monto considerable de hidrocarburos en zonas donde no existe, o el caso contrario, lo que ocasiona la pérdida de una gran cantidad de recursos y tiempo que finalmente se reflejan en el costo del barril.

Este trabajo se enfoca específicamente en la identificación de la presencia o no de firmas sísmicas que ayuden a identificar la existencia tanto de hidrocarburos como salmueras, a su vez, de las posibles variaciones que presenten las variaciones de amplitud debido a distintos niveles de porosidad en el yacimiento objeto de la exploración. Esta investigación se realiza utilizando de herramientas computacionales, así como de mediciones de laboratorio que se realizan en rocas sintéticas diseñadas para reproducir los diferentes parámetros que influyen en la propagación de las ondas compresionales y de cizalla. Finalmente se espera incrementar la confiabilidad en el análisis de indicadores de hidrocarburos, los cuales son la base para tomar decisiones en lo referente a pozos exploratorios en la industria actualmente.

---

<sup>1</sup> Proyecto de grado

<sup>2</sup> Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director UIS: Olga Patricia Ortiz Cancino, Ms.C., Director ICP Andrés Eduardo Calle Ochoa Ms.C.

## SUMMARY

**TÍTULO:** METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL EFECTO DE LAS PROPIEDADES PETROFÍSICAS EN LA RESPUESTA SÍSMICA, APOYADO EN REGISTROS DE POZO, MUESTRAS DE CAMPO Y PRUEBAS DE LABORATORIO EN UN MEDIO NO IDEAL<sup>3</sup>.

**AUTORES:** OSCAR JAVIER BAUTISTA SÁNCHEZ- YULIANA MEJÍA RALLÓN<sup>4</sup>

**KEYWORDS:** Acoustic response, Synthetic rocks, Berea rock, Effect of pressure and temperature on the wave propagation.

The energetic demand is growing up around the world each year, and find new petroleum reservoirs is increasingly difficult, for that reason, the hydrocarbons exploration process is getting a great importance; today both uncertainly and costs are quite high in that procedure, and is because does not exist a methodology or tool to indicates the presence of oil and is necessary to carry out various processes such as seismic, and exploratory wells (A3) drilling.

Seismic method, which based on generation and analysis of waves and its transmission and reflection phenomena seeks to provide an image of subsurface, however, that image can be ambiguous causing to discard high potential areas or the opposite case, drill in a wrong area, losing funds and time in both cases.

This works is focus in determine and identify the presence or absence of seismic signatures in order to detect the existence of both oil and brine, at the same time, possible variations showing the amplitude variations due to different levels of porosity in exploration site. This research is carry out using computational tools and laboratory measurements carried out in synthetic rock designed to reproduce the different parameters affecting the propagation of compressional and shear waves. Finally we hope to increase the reliability in the analysis of hydrocarbon indicators, which are the basis for decisions regarding exploratory wells in the industry today.

---

<sup>3</sup> Proyecto de grado

<sup>4</sup> Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director UIS: Olga Patricia Ortiz Cancino, Ms.C., Director ICP Andrés Eduardo Calle Ochoa Ms.C.

## INTRODUCCIÓN

La exploración petrolera tiene como puntos críticos dos aspectos principales: Los altos costos y los niveles de incertidumbre; razón por la cual, además de todas las técnicas de superficie utilizadas es necesario realizar múltiples perforaciones de pozos A-3 para la confirmación de la presencia de HC y si es o no comercialmente viable.

El proceso anterior impone limitaciones económicas impidiendo en esta etapa del negocio, tener información suficiente, por lo que se descartan zonas petrolíferas o se asumen como grandes prospectos zonas en las que no vale la pena la inversión de elevadas sumas de dinero.

El gran reto en estas actividades es superar la barrera impuesta por la falta de información, la imposibilidad de tener múltiples pozos exploratorios y disponer de muestras de corazón y registros de pozo, los cuales en conjunto con la sísmica conforman los elementos necesarios para una robusta y correcta evaluación del potencial yacimiento.

Para este caso involucrar la física de rocas, parte de la necesidad de experimentar con nuevos modelos, más completos y fieles a la realidad. Se espera que esta metodología y su aplicación representen ventajas competitivas en la industria de los hidrocarburos aumentando en las operaciones de exploración las probabilidades de éxito y nuevos hallazgos.

## 1. MARCO TEORICO

### 1.1 VELOCIDAD Y MODULOS ELÁSTICOS

Los métodos de exploración sísmicos se basan en la generación de ondas sísmicas, y la perturbación del medio causada por la propagación de estas en el subsuelo, la velocidad de propagación de la onda compresional u onda P ( $V_p$ ), y de la onda de cizalla u onda S ( $V_s$ ), son función de características específicas del medio como la densidad, la anisotropía y la atenuación a la transmisión de estas.

Las ondas compresionales y de cizallamiento para un medio isotrópico, homogéneo y elástico se definen por las siguientes ecuaciones:

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad \text{Ec. 1}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

$V_p$  = Velocidad de la Onda P

$V_s$  = Velocidad de la Onda S

$\rho$  = densidad

$K$  = Módulo volumétrico

$\mu$  = Módulo de Cizalla

La ley de Hooke relaciona el esfuerzo y la deformación de un material linealmente elástico isótropo así:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{\alpha\alpha} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

$\sigma_{ij}$ : Elementos del tensor de esfuerzos

$\varepsilon_{ij}$ : Elementos del tensor de deformación

$\varepsilon_{\alpha\alpha}$ : Esfuerzo medio

$\delta_{ij}$ : 0 si  $i \neq j$ , 1 si  $i = j$

En un medio isótropo la velocidad de las ondas será la misma en cualquier dirección, solo son necesarias dos constantes elásticas para especificar la relación completamente:  $\lambda$  y  $\mu$  (Constantes de Lamé).

El módulo de volumétrico,  $K$ , se define como la relación del esfuerzo hidrostático,  $\sigma_0$ , a la deformación volumétrica:

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} \sigma_{\alpha\alpha} = K \varepsilon_{\alpha\alpha}; \text{ Ec. 4}$$

$$K = \frac{\frac{1}{3} \sigma_{\alpha\alpha}}{\varepsilon_{\alpha\alpha}} \text{ Ec. 5}$$

El módulo de Cizalla,  $\mu$ , definido como la relación entre el esfuerzo de corte o cizalla y la deformación de corte:

$$\sigma_{ij} = 2\mu \varepsilon_{ij} \quad ; \quad i \neq j \text{ Ec. 6}$$

$$\mu = \frac{\sigma_{ij}}{2\varepsilon_{ij}}; \text{ Ec. 7}$$

El módulo de Young,  $E$ , definido como el módulo elástico longitudinal, es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza. Para un material elástico lineal e isótropo, el módulo de Young tiene el mismo valor para una tensión que para una compresión, siendo una constante independiente del esfuerzo siempre que no exceda de un valor máximo denominado límite elástico, y es siempre mayor que cero: si se tensiona una barra, aumenta de longitud, no disminuye.

$$\sigma_{zz} = E\varepsilon_{zz}, \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{xy} = \sigma_{zx} = \sigma_{yz} = 0 \quad \text{Ec. 8}$$

$$E = \frac{\sigma_{zz}}{\varepsilon_{zz}} ; \text{Ec. 9}$$

La relación de Poisson, es la relación entre la deformación lateral y la correspondiente deformación longitudinal, en un cuerpo elástico sometido a un esfuerzo longitudinal.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{xx}}{\varepsilon_{zz}}, \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{xy} = \sigma_{zx} = \sigma_{yz} = 0 \quad \text{Ec. 10}$$

El módulo de la Onda P ( $M$ ) está definido como la relación entre el esfuerzo axial y la deformación axial, en un estado de deformación uniaxial.

$$\sigma_{zz} = M\varepsilon_{zz}, \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{zx} = \varepsilon_{yz} = 0 \quad \text{Ec. 11}$$

$$M = \rho V_p^2 \quad \text{Ec. 12}$$

Todos los módulos tienen las mismas unidades de esfuerzo: (fuerza/área), mientras la relación de Poisson es adimensional (Mavko et. Al)

## 1.2 EFECTO DE LA PRESIÓN Y LA TEMPERATURA EN EL DESPLAZAMIENTO DE LA ONDA

La velocidad de propagación de la onda tanto  $V_p$  como  $V_s$  se ve afectada por las características propias de la roca en la cual se está llevando a cabo la transmisión,

como la porosidad, la litología presente, la estratificación y la presencia de fluidos saturantes, así como la presión y la temperatura a la cual se encuentra el medio. En lo referente a la presión, las velocidades se relacionan específicamente con la presión efectiva que se define como la diferencia entre la presión de confinamiento y la presión de poro, matemáticamente se tiene:

$$P_e = P_c - P_p \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

$P_e$  Es la presión efectiva

$P_c$  Se define como la presión de confinamiento

$P_p$  Se refiere a la presión de poro

Diversos análisis de laboratorio muestran que a mayor presión efectiva se observa un incremento en la velocidad de propagación, aún en muestras que presenten altos niveles de porosidad o existan fracturas en ella, adjudicándose esa variación al cerramiento total o parcial de las fracturas o de una disminución de la porosidad causada por el aumento en la presión de confinamiento; por tanto en muestras con ausencia total de fracturas y/o niveles de porosidad muy bajos se evidencia una tendencia casi constante.

En relación a la temperatura, la propagación de la onda en una muestra rocosa no saturada es mínima; sin embargo, en muestras saturadas se encuentra una tendencia ascendente para la velocidad de propagación a medida que se aumenta esta se aumenta, dándose esta variación en mayor o menor medida dependiendo del tipo de fluido que se encuentre al interior de los poros.

### 1.3 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Los fluidos presentes en los yacimientos petrolíferos se pueden clasificar en tres grupos principales: salmueras, hidrocarburos líquidos e hidrocarburos gaseosos; cada uno con características muy variables e interacciones mutuas, que a su vez causan distinto grado de atenuación a las ondas que se transmiten a través de ellos.

Los Hidrocarburos líquidos se convierten en el grupo más difícil de caracterizar desde el punto de vista de la propagación de las ondas, ya que, según las condiciones tanto de presión como de temperatura a las cuales se encuentre sometido el aceite la composición puede variar desde hidrocarburos livianos hasta largas y complejas cadenas que al interactuar entre sí crean medios de atenuación variables alterando de esta manera los módulos volumétricos, la densidad y las velocidades de propagación.

En términos generales si las condiciones a las cuales se encuentran los fluidos están lejanas a las requeridas para que sufran un cambio de fase, tanto las velocidades de propagación, las densidades, como los módulos volumétricos presentan tendencias lineales en función de los cambios tanto de presión como de temperatura.

Wang y Nur (1986) desarrollaron una correlación sencilla que relaciona el comportamiento de la velocidad de propagación con el peso molecular del hidrocarburo,

$$V_T = V_o - b\Delta T \quad \text{Ec. 14}$$

Donde:

$V_o$  Es la velocidad inicial

$V_T$  La velocidad a la temperatura que se encuentra la muestra

$\Delta T$  Es el cambio de temperatura

$b$  Se define como una constante dependiente del peso molecular, según la siguiente relación:

$$b = 0,306 - 7,6 / M \text{ Ec. 15}$$

Otra manera de correlacionar las velocidades con el peso molecular está dada por la siguiente correlación:

$$V_{TM} = V_{TOMO} - b\Delta T - a_m \left[ \frac{1}{M} - \frac{1}{M_o} \right] \text{ Ec. 16}$$

Donde:

$V_{TM}$  Es la velocidad de propagación en un aceite de peso molecular  $M$

$V_{TOMO}$  Es la velocidad de propagación tomada como base de un aceite de peso molecular  $M_o$  a una temperatura  $T_o$ .

$a_m$  Es una función positiva de la temperatura.

A su vez Wang *et al.* correlacionaron la velocidad con la presión, la temperatura y la gravedad API de la muestra, como se indica a continuación:

$$V = 15454(77,1 + API)^{-1/2} - 1,14T + 0,462P - \left( 1,146 * 10^{-3} - 4,13 * 10^{-4} API^{1/2} \right) TP \text{ Ec. 17}$$

Donde:

$V$  Es la velocidad expresada en m/s

$T$  Es la temperatura expresada en grados centígrados.

$P$  Es la presión dada en Bares

En lo concerniente a la salmuera la siguiente relación puede ser usada en pro de calcular las densidades en función de la presión, la temperatura y la fracción en peso de en soluciones de cloruro de sodio:

$$\rho_B = \rho_W + \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 \sum_{k=1}^2 b_{ijk} T^i P^j x^k \quad \text{Ec. 18}$$

Donde:

$T$  Es la temperatura expresada en grados centígrados

$P$  Es la presión dada en Bares

$x$  Corresponde a la fracción en peso del cloruro de sodio

$\rho_B$  Representa la densidad de la salmuera dada en g/cm<sup>3</sup>

$a_{ij}$  Son constantes.

$\rho_W$  Esta dado por la expresión:

$$\rho_w = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^2 a_{ij} T^i P^j \quad \text{Ec. 19}$$

La velocidad de propagación está dada por la siguiente expresión:

$$V_B = V_W + B \quad \text{Ec. 20}$$

Donde:

$V_w$  Es la velocidad de propagación de la onda en agua pura que a su vez se expresa:

$$V_w = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^3 W_{ij} T^i P^j \quad \text{Ec. 21}$$

y

$$B = m \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^3 c_{ij} T^i P^j + m1.5 \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 d_{ij} T^i P^j + m^2 \sum_{i=0}^2 e_i P^i \quad \text{Ec. 22}$$

Donde  $m$  corresponde a la concentración molar de sal, mientras que  $c_{ij}, d_{ij}, e_{ij}$  son constantes.

#### 1.4 ATENUACION

La atenuación se define como la variación de la amplitud de la onda sísmica debido a la distancia con respecto al *offset* (distancia entre emisor y el receptor)

La atenuación de una onda sísmica plana está dado por:

$$A_{(z)} = A_{(0)} e^{-\alpha z} \quad \text{Ec. 23}$$

Donde:

$A_{(z)}$  = La amplitud de la señal en función de la posición  $z$

$A_{(0)}$  = Amplitud inicial

$\alpha$  = coeficiente de atenuación

El coeficiente de atenuación está en función del factor de calidad  $Q$

$$\alpha = \frac{\pi f}{QV} \quad \text{Ec. 24}$$

$f$  = frecuencia

$V = \text{velocidad}$

## 1.5 RIGIDEZ (STRENGTH) DE LAS ROCAS

Es el esfuerzo necesario para producir una deformación permanente y significativa, también se puede definir rigidez como el esfuerzo que produce la falla.

Para describir la rigidez de un material se hace uso de los diagramas de esfuerzo deformación.

Las deformaciones de las rocas pueden denominarse según el origen de los esfuerzos o forma de aplicación de las cargas:

Por su origen:

Pueden ser tectónicas o no tectónicas, las deformaciones tectónicas están asociadas al movimiento de las placas de la corteza terrestre, mientras las no tectónicas están asociadas a los efectos gravitacionales de las masas de tierra y a las cargas que soportan las rocas por esfuerzos dinámicos externos diferentes a los movimientos tectónicos.

Por el tiempo de aplicación de las cargas:

Las deformaciones pueden ser permanentes o temporales, las deformaciones permanentes pueden ser, según el comportamiento del material, viscosa, plástica, visco elástica y visco plásticas, mientras la deformación temporal, asociada a esfuerzos que no son permanentes, puede ser de tipo elástica o inelástica.

## **1.6 PROPIEDADES ACÚSTICAS DE LAS ROCAS**

Los métodos de exploración sísmicos se basan en la generación de ondas sísmicas, éstas son ondas mecánicas y elásticas que no causan deformaciones permanentes en el medio en que se propagan. La deformación se constituye de una compresión y dilatación alternada, donde las partículas del medio se acercan y se alejan respondiendo a las fuerzas asociadas con las ondas. Su propagación se describe por la ecuación de ondas. La velocidad de la onda sísmica depende de los parámetros elásticos del medio en que se propaga.

Ondas P u ondas longitudinales ó de compresión: La onda P oscila en la dirección de propagación, las ondas P son más rápidas que las ondas S.

Ondas S u ondas transversales ó de cizalla: Oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación. Se distingue las ondas SH, que oscilan en el plano horizontal y perpendicular a la dirección de propagación, y las ondas SV, que oscilan en el plano vertical y perpendicular a la dirección de propagación. Las ondas S polarizadas oscilan en un único plano perpendicular a su dirección de propagación (Farmer *et. al*)

Las velocidades de varios tipos de onda sísmica en un medio homogéneo, isótropo y elástico están dadas por la ecuaciones 1 y 2.

## **1.7 MODELADO**

### **1.7.1 GENERACIÓN DE SISMOGRAMAS SINTÉTICOS**

Los sismogramas sintéticos son generados a partir del modelado convolucional, en que se asume que la respuesta de la tierra es la convolución entre la ondícula (pulso de corta duración en el tiempo) que representa la fuente y la serie temporal de la reflectividad del subsuelo (construida a partir de la velocidad de la onda P y densidad del medio). En el caso de estudios encaminados a conocer la variación

de la amplitud con el offset, se utiliza la Ecuación de Zoeppritz y/o la Ecuación de la Onda Elástica; para lo cual se requiere el registro de densidad y de velocidades de la onda P y S.

En casos donde haga falta uno de los antes mencionados, se puede obtener un registro aproximado usando las ecuaciones empíricas disponibles en la literatura.

### **Registro Gamma Ray**

Este registro mide la radiación gamma en el pozo. La radioactividad es una característica específica de las rocas, Los que permite identificar zonas arcillosas de las que no lo son; las lutitas son altamente radioactivas por el contenido de potasio radioactivo presente en las arcillas. En este orden de ideas se pueden identificar las zonas de arenas.

### **Registro Sónico**

Este registro se adquiere con una herramienta que cuenta con uno ó dos polos, el cual emite ondas de sonido y posteriormente registra las velocidades dadas por los tiempos de llegada a los receptores ubicados en la misma herramienta. El tiempo que tarda la onda en retornar es función de la densidad del medio. A partir de este registro se obtienen simultáneamente las velocidades de las ondas P y S, las cuales permiten indicar el tipo de roca e incluso la presencia de fluidos.

### **Registro de Densidad**

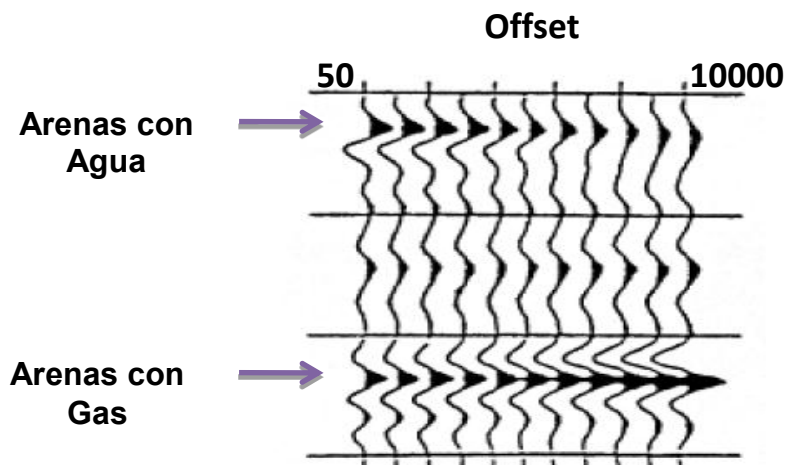
Este registro de pozo se corre a hueco abierto, mide la densidad de la formación. Este registro permite hacer algunas inferencias sobre la porosidad de la roca ya que estas dos son inversamente proporcionales a excepción de que exista presencia de gas o algún fluido liviano.

## 1.8 ANÁLISIS AVO (AMPLITUD vs OFFSET)

En exploración el análisis AVO (AMPLITUD VS OFFSET) es una técnica utilizada como indicador de hidrocarburos. En 1984, Ostrander propuso esta metodología al demostrar que los coeficientes de reflexión en arenas saturadas con gas varían de una forma anómala con el incremento de la distancia fuente-receptor (offset).

En la figura 1 se observa la variación de la amplitud con el offset para arenas saturadas con salmuera y saturadas con gas. Para las arenas saturadas con gas la amplitud crece al aumentar el offset mientras que para las arenas saturadas con salmuera sucede lo contrario.

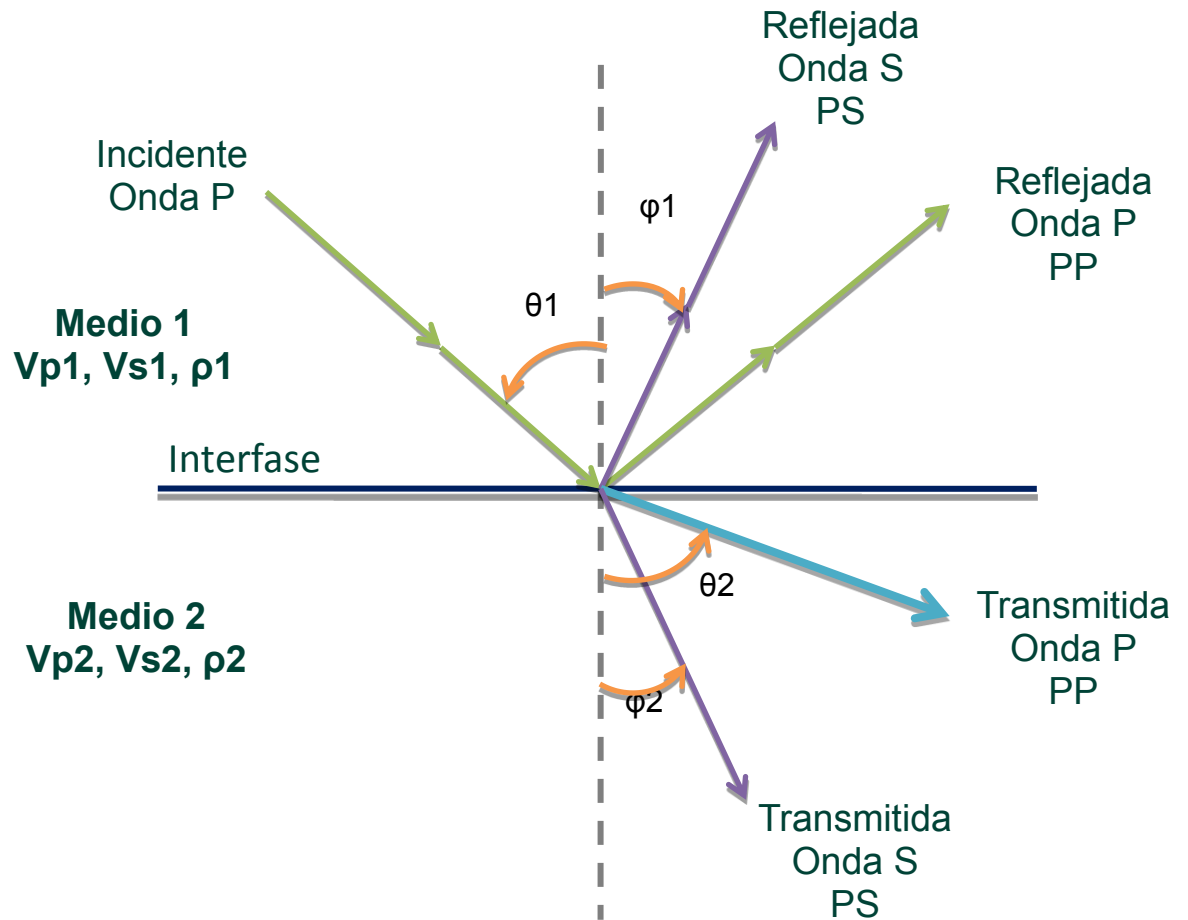
**Figura 1. Variación de la amplitud con el offset para arenas saturadas con salmuera y saturadas con gas.**



Fuente: CASTAGNA, J. Offset-Dependent Reflectivity-Theory and Practice of AVO Analysis. 1993.

Estos cambios de amplitud con respecto a la distancia fuente-receptor se deben a que los coeficientes de reflexión están en función de la velocidad de onda compresiva ( $V_p$ ), de cizalla ( $V_s$ ), la densidad ( $\rho$ ) y ángulo de incidencia ( $\theta$ ); cuando la roca está saturada con salmuera,  $V_p$  y  $\rho$  son mayores en comparación a casos donde la roca está saturada de gas.

Figura 2. Ondas generadas por una onda P incidente



Fuente: CASTAGNA, J. Offset-Dependent Reflectivity-Theory and Practice of AVO Analysis. 1993.

## 1.9 SUBSTITUCIÓN DE FLUIDOS

La sustitución de fluidos es una metodología para modelar los efectos de la composición mineral, la porosidad y los fluidos en las velocidades sísmicas. Esta se basa generalmente en unas formulaciones teóricas y empíricas. La aproximación más utilizada es la teoría de Biot-Gassmann.

Gassmann (1951) y Biot (1956) de manera independiente desarrollaron una completa teoría de la propagación de ondas en rocas saturadas de fluidos, incluyendo dos términos: Roca saturada (Roca con fluidos) y roca seca (Roca drenada).

La ecuación que relaciona las velocidades con los parámetros de Lamé para un medio isótropo y homogéneo, la expresan en función de la saturación de los módulos de volumen, cizalla y densidad:

$$V_{p_{sat}} = \sqrt{\frac{K_{sat} + \frac{4}{3} \mu_{sat}}{\rho_{sat}}} \quad \text{Ec. 25}$$

$$V_{s_{sat}} = \sqrt{\frac{\mu_{sat}}{\rho_{sat}}} \quad \text{Ec. 26}$$

Dónde:

$K_{sat}$  = Módulo de volumen saturado

$\mu_{sat}$  = Módulo de cizalla saturado

$\rho_{sat}$  = Densidad saturada

Para realizar una sustitución de fluidos es necesario determinar:

- La porosidad  $\Phi$
- Propiedades de los fluidos presentes ( $K_{fl}$ ,  $\rho$ )
- Módulo de volumen de la matriz ( $K_o$ )
- Módulo de volumen de la estructura porosa de la roca ( $K^*$ )

Todos estos pueden ser obtenidos o calculados por mediciones de laboratorio, registros de pozo o análisis de corazones.

Para el caso de los fluidos es importante conocer la densidad y el módulo de volumen de los fluidos contenidos en los poros; de igual manera, la densidad y el

módulo de volumen del fluido a modelar. Para efectos de cálculo se deben tener en cuenta las temperaturas y presiones del yacimiento.

## MÓDULO DE VOLUMEN

La teoría de Gassmann relaciona el módulo de volumen saturado de la roca con: La porosidad, el módulo de volumen del armazón de la roca, el modulo de volumen de la matriz mineral y el módulo de volumen del fluido

$$K_{sat} = K^* + \frac{\left(1 - \frac{K^*}{K_0}\right)^2}{\frac{\varphi}{K_{fl}} + \frac{1-\varphi}{K_0} + \frac{K^*}{K_0^2}} \quad \text{Ec. 27}$$

Donde:

$K_{sat}$  = Módulo de volumen saturado

$K_0$  = Módulo de volumen de la matriz mineral

$K_{fl}$  = Módulo de volumen de fluido

$K^*$  = Módulo de volumen el armazón de la roca más espacio poroso vacío

$\varphi$  = Porosidad

## MÓDULO DE VOLUMEN DE LA MATRIZ

Se determina tomando los minerales más importantes de la roca, con el porcentaje de cada mineral y el módulo de capa mineral se calcula  $K_0$  promediando. La ecuación más usada es el promedio de Voigt-Reuss-Hill (VHR), la cual consiste en el promedio de la armónica de Reuss y la aritmética de Voigt:

$$K_{Reuss} = \left[ \frac{F_1}{K_1} + \frac{F_2}{K_2} \right]^{-1} \quad \text{Ec. 28}$$

$$K_{Voigt} = [F_1 * K_1 + F_2 * K_2] \text{Ec. 29}$$

$$K_{VHR} = \frac{1}{2} [K_{Voigt} - K_{Reuss}] \text{Ec. 30}$$

## MÓDULO DE VOLUMEN DEL FLUIDO

El valor del módulo de volumen del fluido se puede determinar de varias formas, ya sea por muestras de fluidos recuperados del espacio poroso del yacimiento, a través de las ecuaciones de estado o calculando las propiedades por medio de ecuaciones empíricas.

Para el modelado generalmente se usa la ecuación de promedio de Reuss asumiendo una distribución uniforme del fluido homogéneo a través del espacio poroso.

$$K_{fl} = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{K_i} \right]^{-1} \text{Ec. 31}$$

Dónde:

$K_{fl}$  = Módulo de volumen del fluido.(Agua, aceite)

$K_i$  = Módulo de volumen de las fases individuales

$S_i$  = Saturación

## MÓDULO DE VOLUMEN DE LA ROCA SECA

Para calcular el módulo de volumen de la roca seca, se utiliza la ecuación de Mavko:

$$\frac{K_{sat}}{K_0 - K_{sat}} = \frac{K^*}{K_0 - K^*} - \frac{K_f}{\phi(K_0 - K_{fl})} \text{Ec. 32}$$

## 1.10 MODELOS USADOS

### 1.10.1 MODELO DE BIOT-GASSMANN

Gassman corresponde a un modelo matemático que busca analizar el comportamiento de la roca a partir de la saturación de fluidos y sus diferentes escenarios de saturación, asumiendo que:

- I. La roca a analizar debe ser homogénea e isotrópica.
- II. La porosidad debe ser 100% efectiva.
- III. Los módulos elásticos de los distintos constituyentes deben ser iguales o lo suficientemente cercanos para que generen un buen ajuste.
- IV. La roca debe estar totalmente saturada.
- V. La presión debe ser constante en la extensión total de la muestra.

Lo anteriormente enunciado genera una serie de complicaciones en el desarrollo de una investigación que tenga como fin reproducir o estudiar medios no idealizados.

Inicialmente la isotropía aunque es un elemento de amplio uso, constituye quizás el más grande impedimento para la generación de una metodología aplicable a yacimientos con diferentes características, y la amarraría a características específicas, por ejemplo, arenas acumuladoras con contenidos de arcillas distintos en coordenadas diferentes al interior del sistema almacenador podría generar que los datos obtenidos a partir de las ecuaciones de Gassmann arrojaran información que no tuvieran la suficiente exactitud con respecto a la realidad de la capa rocosa (Avseth *et al.*). Además de lo anterior, la isotropía descarta por completo, las

variaciones en los porcentajes de porosidad de la roca a lo largo, ancho y alto del yacimiento, lo cual es de común ocurrencia. Aunque para efectos prácticos, la industria suele generar un valor promedio para cada yacimiento, en este caso no es posible adoptar esta práctica, ya que esos cambios están asociados a parámetros que serán objeto de estudio en pro de determinar si son relevantes o no en la respuesta sísmica, como la variación granulométrica, la compactación, los niveles de cementación, la presión litostática a la que se encuentra sometida la roca y el tipo de empaquetamiento (asociado al tipo de minerales constituyentes).

La variación en los distintos minerales que constituyen un yacimiento, además de los cambios que estos sufren debido a diferentes condiciones de confinamiento hacen que los módulos elásticos de cada mineral no converjan en determinados valores, por lo contrario cada uno de estos presenta valores muy diferentes, lo suficiente para violar de manera reiterada esta condición del modelo de Gassman (Smith *et al.*).

En lo referente a la última condición enunciada, puede llegar a manejarse adecuadamente en sistemas saturados con un único fluido o en aquellos donde coexistan más de un fluido pero con una interface bien definida, en aquellos donde exista más de un fluido saturante y por sus características se produzca una zona de transición y no una interfase bien definida, podría llegar a generar variaciones en la presión de la muestra, estaría por definirse el escalamiento adecuado, para poder afirmar o no si este punto sería un problema en este caso.

La tendencia actual de la exploración tiende hacia la búsqueda costa afuera y hacia yacimientos cada vez más profundos en las tierras continentales, razón por la cual, es absolutamente indispensable en este proyecto considerar el comportamiento de muestras con similares características, las cuales al verse sometidas a esfuerzos tanto litostáticos como hidrostáticos mayores, generen rocas cada vez más consolidadas, lo que una vez más se constituye en una

debilidad para la aplicación única de Gassmann en este proyecto, ya que éste básicamente analiza la respuesta de los fluidos a partir de la comparación entre los comportamientos de la roca seca y posteriormente su comportamiento una vez sus poros se encuentran 100% saturados con el mismo fluido, asumiendo como características de los fluidos el delta resultante de esta comparación. El problema en este caso radica básicamente en que a altos niveles de compactación la roca se torna más rígida, por ende su deformación volumétrica ante esfuerzos compresivos va a ser menor (Avseth *et al.*), lo cual acarrea que el diferencial que se busca estudiar entre la roca saturada y la que no lo está sea muy pequeño o quizás tendiente a la nulidad, por lo que esta herramienta sería poco o nada eficiente bajo estas condiciones.

En cuanto a la roca sello, este modelo presenta grandes deficiencias, ya que están compuestas en gran parte de arcillas, cuyo principal inconveniente se encuentra en los niveles de porosidad efectiva, la cual por definición debe tender a cero para poder impedir el flujo de los fluidos. Sin embargo, el modelo presenta situaciones para las cuales sería adecuado su uso, debido a que las condiciones podrían ser similares a algunas de las consideraciones necesarias, dichas situaciones podían ser amarradas a la profundidad en la que la muestra objeto de estudio se localice, ya que este parámetro incide de manera directa en los niveles de compactación, porosidad, permeabilidad, entre muchos otros.

El modelo de Gassmann resulta de los múltiples intentos por predecir la velocidad de propagación de las ondas en el medio poroso, se han desarrollado modelos isótropos donde los que muestran mejores resultados son los que consideran, como éste, las propiedades de la roca y los fluidos despreciando la forma y geometría de los poros.

Gassmann relaciona el módulo de volumen de la roca saturada con su porosidad, el módulo de la estructura de la roca, el módulo de volumen de los minerales que conforman la matriz y el módulo de volumen de los fluidos contenidos en los poros:

$$\frac{K_{sat}}{K_0 - K_{sat}} = \frac{K_{dry}}{K_0 - K_{dry}} + \frac{K_{fl}}{\phi (K_0 - K_{fl})} \text{Ec. 33}$$

Dónde:

$K_{sat}$  = Módulo de volumen de la roca saturada

$K_{dry}$  = Módulo de volumen de la roca seca

$K_0$  = Módulo de volumen de los minerales que conforman la matriz

$K_{fl}$  = Módulo de volumen del fluido contenido en los poros

$\phi$  = Porosidad

Las ecuaciones de Gassmann son estrictamente válidas a frecuencia cero pero funcionan bien para frecuencias bajas, como las presentes en la sísmica, de tal modo que las presiones de poro se vuelven iguales sobre una escala de longitud más grande que la dimensión de los poros y mucho más pequeño que la longitud de la onda sísmica que atraviesa la roca. El modelo considera poros totalmente conectados y fluidos móviles, por lo que puede presentar problemas y resultados poco confiables al aplicarse a rocas carbonatadas o con baja porosidad y a arenas arcillosas.

### 1.10.2 ECUACIONES DE ZOEPPRITZ

Una onda plana al enfrentar una interfase se divide: parte de la energía de la onda P incidente pasa como P o se convierte en onda S. Las dos ondas P y S parcialmente se reflejan y se transmiten, en otras palabras al tener una onda

plana que se encuentra con una interfase que presenta un contraste de velocidad y densidad, la onda incidente se divide en dos ondas al atravesar esa interfase.(Ver figura 3)

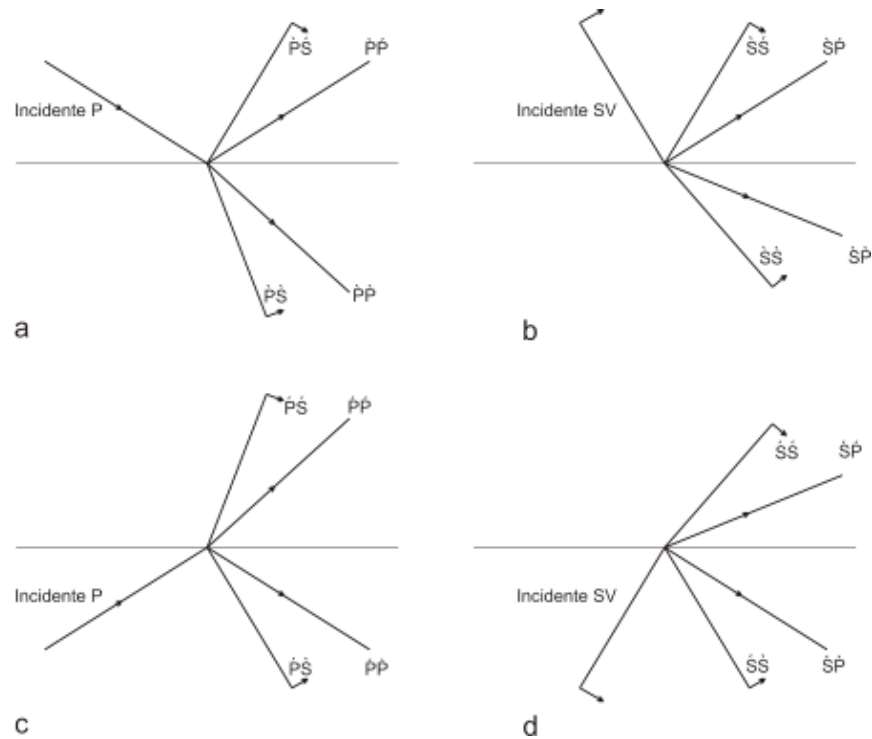
Dadas la densidad y las velocidades del medio, la parte de la onda P incidente que se refleja o trasmite ya sea como onda P o S es función del ángulo de incidencia. En este orden de ideas al analizar los cambios en la amplitud de las ondas reflejadas o transmitidas se puede conocer las propiedades elásticas del medio.

Utilizando la ecuación de Zeoppritz es posible calcular de manera exacta la amplitud de la onda P reflejada en función de ángulo de incidencia si se cumple:

- I. Continuidad en el desplazamiento, es decir, que le interfase responda a la onda incidente como si los dos medios estuviesen soldados.
- II. Continuidad en el esfuerzo, para evitar aceleraciones infinitas y discontinuas.

Para una interface entre dos espacios elásticos semi infinitos, hay 16 coeficientes de reflexión y transmisión:

**Figura 3. Coeficientes de reflexión y transmisión por ondas P-SV**



Fuente: CASTAGNA J. Offset dependent reflectivity- Theory and practice of AVO Analysis.1993.

Los coeficientes están representados por dos letras, la primera indica el tipo de onda incidente y la segunda indica el tipo de onda derivada.

Onda Bajando	P̂ Ŝ	Onda Subiendo
Onda Incidente		Onda Derivada

Con esta notación la matriz de dispersión es:

$$Q = \begin{pmatrix} \begin{matrix} \backslash \backslash \\ PP \\ \backslash \backslash \\ PS \\ \backslash \backslash \\ PP \\ \backslash \backslash \\ PS \end{matrix} & \begin{matrix} \backslash \backslash \\ SP \\ \backslash \backslash \\ SS \\ \backslash \backslash \\ SP \\ \backslash \backslash \\ SS \end{matrix} & \begin{matrix} \backslash \backslash \\ PP \\ \backslash \backslash \\ PS \\ \backslash \backslash \\ PP \\ \backslash \backslash \\ PS \end{matrix} & \begin{matrix} \backslash \backslash \\ SP \\ \backslash \backslash \\ SP \\ \backslash \backslash \\ SP \\ \backslash \backslash \\ SS \end{matrix} \end{pmatrix} = P^{-1}R$$

**Ec. 34**

Donde P es la matriz

$$\begin{pmatrix} -\sin\Theta_1 & -\cos\Phi_1 & \sin\Theta_2 & \cos\Phi_2 \\ \cos\Theta_1 & -\sin\Phi_1 & \cos\Theta_2 & -\sin\Phi_1 \\ 2\rho_1 V_{S1} \sin\Phi_1 \cos\Theta_1 & \rho_1 V_{S1} (1-2\sin^2\Phi_1) & 2\rho_2 V_{S2} \sin\Phi_2 \cos\Theta_2 & \rho_2 V_{S2} (1-2\sin^2\Phi_2) \\ -\rho_1 V_{P1} (1-2\sin^2\Phi_1) & \rho_1 V_{S1} \sin 2\Phi_1 & \rho_2 V_{P2} (1-2\sin^2\Phi_2) & -\rho_2 V_{S2} \sin 2\Phi_2 \end{pmatrix}$$

Y R es la matriz

$$\begin{pmatrix} \sin\Theta_1 & \cos\Phi_1 & -\sin\Theta_2 & -\cos\Phi_2 \\ \cos\Theta_1 & -\sin\Phi_1 & \cos\Theta_2 & -\sin\Phi_1 \\ 2\rho_1 V_{S1} \sin\Phi_1 \cos\Theta_1 & \rho_1 V_{S1} (1-2\sin^2\Phi_1) & 2\rho_2 V_{S2} \sin\Phi_2 \cos\Theta_2 & \rho_2 V_{S2} (1-2\sin^2\Phi_2) \\ \rho_1 V_{P1} (1-2\sin^2\Phi_1) & -\rho_1 V_{S1} \sin 2\Phi_1 & -\rho_2 V_{P2} (1-2\sin^2\Phi_2) & \rho_2 V_{S2} \sin 2\Phi_2 \end{pmatrix}$$

### 1.10.3 APROXIMACIÓN DE AKI Y RICHARDS

Utilizando la ecuación de Zeoppritz (1919) es posible calcular de manera exacta la amplitud de la onda P reflejada en función del ángulo de incidencia, pero su inversión directa tiene grandes dificultades algebraicas. Debido a que las ecuaciones son muy extensas y de difícil manipulación durante años muchos investigadores han trabajado en aproximaciones que se puedan invertir con elementos más sencillos. Entre estas aproximaciones se encuentran las desarrolladas por Bortfeld, Aki & Richards, y Shuey entre otras.

AKI & RICHARDS (Quantitative Seismology, 1980) tomaron la ecuación desarrollada por Bortfeld en 1961, escribiendo una nueva ecuación de tres términos: cada uno de ellos incluye uno de los parámetros elásticos de los medios presentes en la interfase, el primero involucra la velocidad de la onda P, el segundo la densidad y el tercero la velocidad de la onda S.

$$R(\theta) = a \frac{\Delta\alpha}{\alpha} + b \frac{\Delta\rho}{\rho} + c \frac{\Delta\beta}{\beta} \quad \text{Ec. 35}$$

Donde

$$a = \frac{1}{(2\cos^2\theta)}$$
$$b = 0.5 - \left[ \frac{(2\beta^2)}{\alpha^2} \text{sen}^2\theta \right]$$
$$c = -\frac{(4\beta^2)}{\alpha^2} [\text{sen}^2\theta]$$
$$\alpha = \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{2}$$
$$\beta = \frac{(\beta_1 + \beta_2)}{2}$$

$$\rho = \frac{(\rho_1 + \rho_2)}{2}$$

$$\Delta\alpha = (\alpha_2 - \alpha_1)$$

$$\Delta\beta = (\beta_2 - \beta_1)$$

$$\Delta\rho = (\rho_2 - \rho_1)$$

$$\theta = \frac{(\theta_1 + \theta_2)}{2}; \text{ Donde } \theta_t = \arcsen \left[ \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \right] (\text{sen}\theta_i)$$

Aki y Richards, al no observar en la práctica, variaciones relativas separadas de velocidades y densidad, reformularon la ecuación en función del ángulo de incidencia dando origen a la que hoy se conoce como la ecuación general AVO de tres términos.

$$R(\theta) = \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta\alpha}{\alpha} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) \right] + \left[ \frac{1}{2} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} - 4 \frac{\beta^2 \Delta\beta}{\alpha^2 \beta} - 2 \frac{\beta^2 \Delta\rho}{\alpha^2 \rho} \right] \text{sen}^2\theta + \left[ \frac{1}{2} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right] (\tan^2\theta - \text{sen}^2\theta) \text{ Ec. 36}$$

#### 1.10.4 ECUACIÓN DE LA ONDA ELÁSTICA

La ecuación de onda elástica busca suplir las falencias que la ecuación de Zoeppritz posee, es decir, tiene como objetivo modelar el comportamiento de las ondas sísmicas ante la presencia de varios estratos. Zoeppritz genera el conjunto de ondas cuyas frecuencias corresponden a las obtenidas en una adquisición real, sin embargo, no da una idea de cómo es el yacimiento o zona objetivo, y ante la presencia de una gran cantidad de estratos genera interferencias que pueden llegar a alterar la respuesta, por el contrario la ecuación de la onda elástica es capaz de corregir esa superposición de ondas, generando un mejor ajuste en zonas altamente estratificadas.

Esta ecuación presenta las siguientes suposiciones:

El yacimiento presenta dos zonas, la primera de ellas corresponde a los estratos superiores a la zona objetivo, la segunda es el conjunto de estratos que se van a estudiar.

El modelo está compuesto por un número determinado de estratos planos, homogéneos e isótropos.

De cada estrato debe ser conocido su espesor, densidad, y las velocidades tanto compresionales como de cizalla.

La precisión y exactitud de este modelo depende de la información del número de capas y sus características.

### **1.10.5 ECUACIONES DE CASTAGNA PARA LA PREDICCIÓN DE LA DENSIDAD**

En 1993 Castagna presenta una serie de ecuaciones capaces de predecir los valores de densidad en distintas litologías; estas ecuaciones representan una mejor aproximación a los valores reales que la ecuación de Gardner, la cual está dada por:

$$\rho = 0.23V^{0.25} \text{ Ec. 37}$$

La práctica ha mostrado que esta última ecuación genera una sobre estimación de la densidad para las arenas y lo opuesto para las arcillas.

Las ecuaciones planteadas por Castagna son:

Arenas:

$$\rho = 0.200V_p^{0.261} \text{ Ec. 38}$$

Arcillas:

$$\rho = 0.204V_p^{0.265} \text{ Ec. 39}$$

Dolomitas:

$$\rho = 0.226V_p^{0.243} \text{ Ec. 40}$$

Caliza:

$$\rho = 0.243V_p^{0.225} \text{ Ec. 41}$$

Sin embargo, estas ecuaciones tienen un origen netamente empírico, razón por la cual su aplicación y adecuado ajuste es dependiente de la similitud con las muestras con las cuales fueron derivadas.

## **2. METODOLOGÍA USADA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO**

Para cumplir con el total de objetivos trazados para este trabajo de grado, el modelado de yacimientos sin la utilización de teorías que asumen modelos idealizados se realizará basados en dos ejes principales:

- a) Roca.
- b) Fluidos.

Para evaluar cada uno de los ejes se pretende seguir las siguientes fases:

(Obsérvese La Figura 4.)

### **Fase 1. Identificación de los modelos a usar**

Inicialmente, se debe identificar los modelos existentes y clasificarlos de acuerdo a la necesidad o caso de estudio apoyándose en las consideraciones del modelo, las limitaciones y el error intrínseco de éste.

### **Fase 2. Determinación del rango de acción de los modelos teóricos**

Identificados los modelos adecuados, es necesario establecer las situaciones y las características para las cuales su implementación genera respuestas exactas o en su defecto que estén dentro de un rango de tolerancia aceptable (puede variar según la precisión que se desee).

### **Fase 3. Implementación de los modelos teóricos seleccionados**

En esta fase se procede a realizar la aplicación matemática de los modelos seleccionados en el paso anterior, y comprobar, mediante la comparación con los datos reales que los datos obtenidos se encuentren dentro del rango deseado.

#### **Fase 4. Construcción de las muestras sintéticas**

Este paso, busca generar rocas sintéticas en las cuales realizar pruebas de laboratorio que permitan la identificación y cuantificación de los parámetros relevantes para la respuesta sísmica, para esto se debe reproducir en las rocas sintéticas parámetros petrofísicos y geológicos de la roca real.

#### **Fase 5. Validación del comportamiento mecánico y acústico de las muestras sintéticas**

Esta etapa busca determinar el éxito del proceso de construcción, es decir, comparar las propiedades petrofísicas básicas y la respuesta de las rocas reales con las elaboradas en lo referente al comportamiento mecánico y acústico de estas.

#### **Fase 6. Estudio mecánico a los fluidos saturantes**

El análisis del comportamiento mecánico se realizará de dos maneras, la primera de ellas se basa en observar las diferencias existentes entre el comportamiento de la roca no saturada con la que sí lo está, y la segunda en estudiar los niveles de compresibilidad de los fluidos de manera independiente.

#### **Fase 7. Estudio acústico a los fluidos saturantes**

El estudio de la respuesta acústica de los fluidos saturantes se realizará mediante la comparación de los resultados obtenidos en el estudio acústico de la roca seca y la saturada, además, de un análisis individual a cada uno de ellos en pro de determinar adecuadamente sus comportamientos en estas pruebas.

## **Fase 8. Planteamiento matemático**

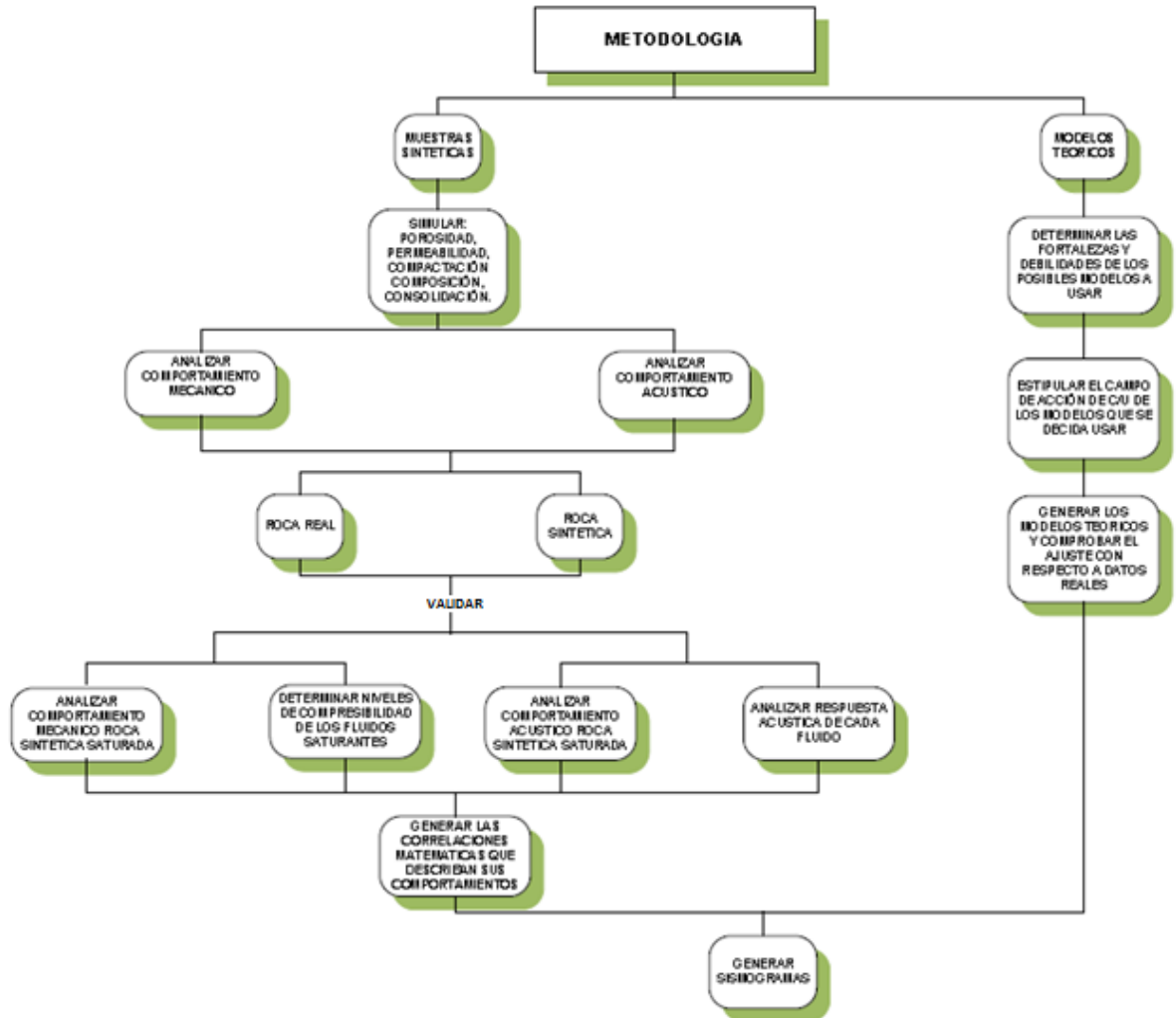
Una vez terminados los estudios referentes a las etapas anteriores se procederá a generar las expresiones matemáticas que permitan describir el comportamiento de cada uno de ellos.

## **Fase 9. Implementación de los sismogramas sintéticos**

Finalmente se busca generar sismogramas sintéticos con el apoyo de algún programa computacional especializado que permita indicar los patrones de los parámetros estudiados.

El desarrollo de esta metodología pretende además de disminuir los costos, optimizar los recursos disponibles y tener como resultado modelos más precisos basados en mediciones y sus respectivas interpretaciones. Además, será posible alimentar modelos con nuevos datos que en consecuencia reflejen mejor la realidad, reemplazando los modelos ideales y generales con los que se trabaja hasta el momento, para finalmente, caracterizar algunos parámetros de los yacimientos de manera más precisa.

**Figura 4. Metodología del Proyecto**



Fuente: Los Autores

### **3. ELABORACIÓN Y ANÁLISIS DE MUESTRAS**

Debido a los altos costos del corazonamiento y a la inexistencia de dos núcleos iguales, la posibilidad de realizar estudios que por sus características tiendan a destruir o alterar las propiedades iniciales de la muestra son nulas, por esta razón, parte de los objetivos de este trabajo se enfocaron en la fabricación de *plugs* o tapones sintéticos que permitieran reproducir las características de mayor incidencia en el estudio sísmico, en pro de verificar que la roca sintética es una adecuada representación de una real se utilizó una roca Berea como patrón y en consecuencia confirmar la validez de los resultados obtenidos a partir de las muestras sintéticas.

#### **3.1 GENERALIDADES DE LAS ROCAS SINTÉTICAS**

Estas muestras, fueron elaboradas a partir de una selección de distintos tamaños de grano cuyas mezclas garantizarán los porcentajes de porosidad requeridos para el estudio, a su vez, se eligió como material cementante una resina epóxica comercial base agua, que presentó un adecuado comportamiento bajo los diferentes valores tanto de presión como de temperatura requeridos en las pruebas realizadas. La metodología usada en la fabricación de las muestras sintéticas no se detalla en este documento ya que hace parte de la propiedad intelectual del laboratorio de Análisis Petrofísicos Especiales del Instituto Colombiano del Petróleo.

### 3.1.1 PROPIEDADES DE LA RESINA UTILIZADA

*Tabla 1. Propiedades físicas y químicas de la resina*

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS	
Punto de ebullición	117.8 ° C - 244 ° F
Densidad específica	1.2008
Tasa de evaporación	Menor al Butyl- acetato
Viscosidad	Baja
Estado físico	Líquido
Solubilidad en Agua	Baja

Fuente: Los Autores

### 3.2 GENERALIDADES DE LA ROCA BEREA

#### 3.2.1 DEFINICIÓN

Es una roca sedimentaria aceptada internacionalmente como patrón en estudios tanto sónicos como mecánicos, constituida principalmente por granos tamaño arena, cuyo principal componente es cuarzo cementado con material silícico, este material presenta altos niveles tanto de porosidad como de permeabilidad, convirtiéndola en una excelente roca almacenadora; además, presenta estratificaciones claras que permiten una adecuada laminación facilitando su estudio.

**Figura 5. Muestras de roca Berea**



Fuente: <http://www.bereasandstonecores.com/>

### 3.2.2 COMPONENTES MINEROLÓGICOS

**Tabla 2. Componentes mineralógicos roca Berea**

COMPOSICIÓN		
Sílice	SiO <sub>2</sub>	93.13%
Alúmina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.86%
Óxido férrico	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.11%
Óxido ferroso	FeO	0.54%
Óxido de magnesio	MgO	0.25%
Óxido de calcio	CaO	0.10%

Fuente: Los Autores

### 3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño propuesto contempla mediciones acústicas y mecánicas de manera simultánea a condiciones de temperatura y presión en rangos en los cuales bajo

sus distintas combinaciones pueda representar las condiciones de un yacimiento real promedio

**Tabla 3. Factores y rangos de las mediciones de laboratorio.**

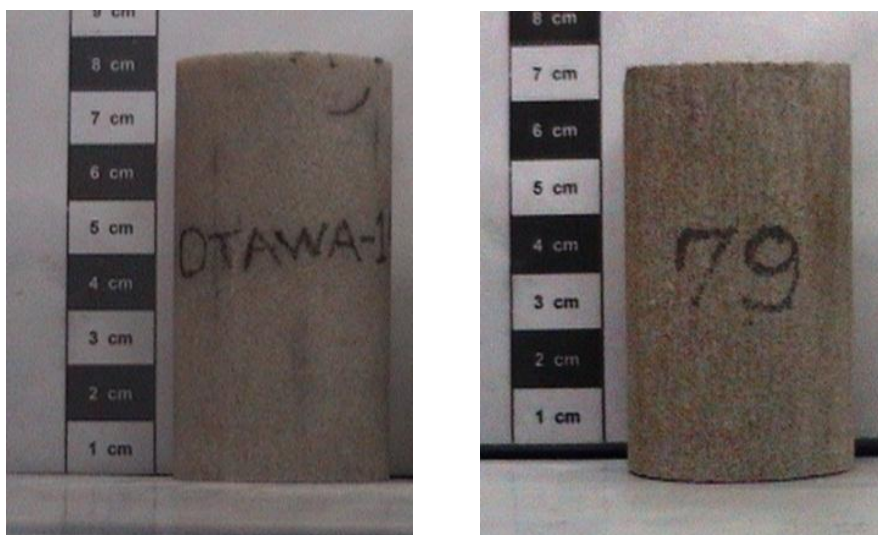
FACTORES	RANGOS		DIFERENCIALES
	MINIMO	MAXIMO	
$\Phi(\%) =$ Porosidad	10	30	$\Delta = 10\%$
P(PSI) = Presión	2500	3000	$\Delta = 250$ psi
T( $^{\circ}$ C) = Temperatura	50	125	$\Delta = 25^{\circ}$ C

*Fuente: Los Autores*

### 3.4 MUESTRAS USADAS

En los ensayos se utilizaron dos muestras: una de Roca Berea y una sintética (Figura 6). Estas fueron sometidas a mediciones petrofísicas básicas (Ver tabla 4) para verificar sus propiedades. Posteriormente fueron preparadas y pulidas para evaluar y comprobar que cumplieran con los requerimientos geométricos y de cilindridad y planitud para el montaje experimental. (Ver Anexo 1).

**Figura 6. Plug sintético (derecha) y roca Berea (izquierda)**



Fuente: Laboratorio Mecánica de Rocas- ICP

### 3.4.1 PROPIEDADES PETROFÍSICAS DE LAS ROCAS USADAS

*Tabla 4. Propiedades petrofísicas de las rocas usadas.*

IDENTIFICACION	PRESION DE CONFINAMIENTO		LONGITUD (cm)	DIAMETRO (cm)	DENSIDAD DE GRANOS (g/cm <sup>3</sup> )	POROSIDAD (%)	PERMEABILIDAD KLINKENBERG (mD)	PERMEABILIDAD AL AIRE (mD)
	(Psi)	(MPa)						
<b>BEREA 79</b>	800	5,516	6,768	3,784	2,666	17,6	126	131
<b>OTAWA 14</b>	800	5,516	7,352	3,706	2,227	17,3	2222	2253

Fuente: Los Autores

### 3.5 MONTAJE EXPERIMENTAL

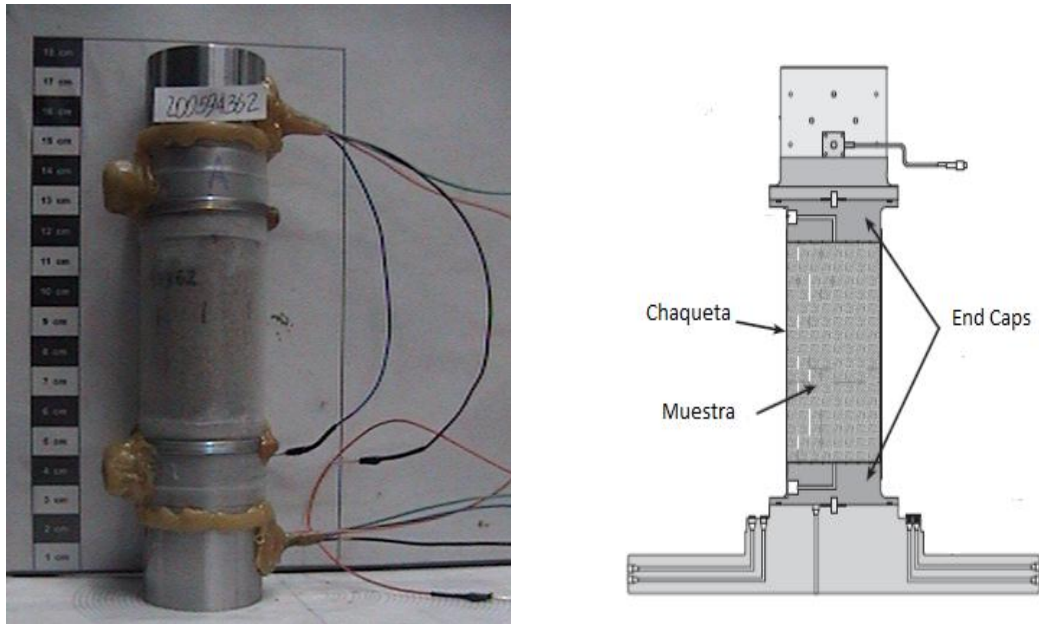
El montaje consiste en el MTS (Mechanics Testing System), un Pulsador y un Osciloscopio, la muestra es encapsulada como se ve en la figura 7 de manera que exista un contacto entre la superficie del plug y los cristales piezoeléctricos (Emisores y receptores de la Onda) dentro de una celda de carga. El MTS aplica una carga Triaxial sobre la muestra a una temperatura estabilizada, evaluando las propiedades mecánicas y registrando el tiempo de tránsito de las ondas, por ejemplo, a temperatura ambiente se registraron los esfuerzos y los tiempos de tránsito con una carga TX de 2500(psi), luego de 2750(psi) y finalmente de 3000 (psi). Al terminar se incrementa la temperatura, estabilizándola alrededor de 10 a 12 horas y se repite el procedimiento para cada una de las Temperaturas (Ver tabla 5)

**Tabla 5. Condiciones de temperatura y presión de los ensayos de laboratorio**

TEMPERATURA (°C)	PRESIÓN (Psi)
25- Ambiente	2500/2750/3000
50	2500/2750/3000
75	2500/2750/3000
100	2500/2750/3000

Fuente: Los Autores

**Figura 7. Montaje de la muestra.**



Fuente: Los Autores

### 3.5.1 EQUIPOS USADOS

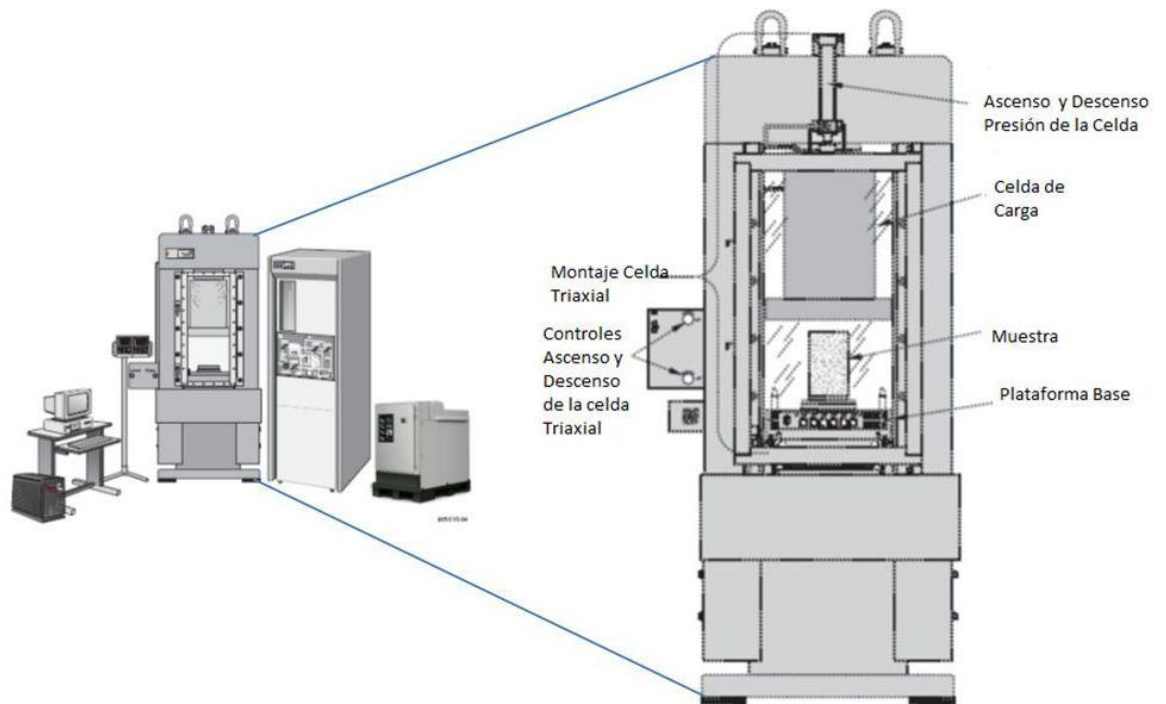
A continuación se describe brevemente el equipo utilizado en el montaje experimental:

**MTS (Mechanics Testing System)** (Ver figura 8)

Equipo diseñado para llevar a cabo ensayos de laboratorio que simulen las condiciones *in situ* de la manera más precisa posible. El equipo puede recrear altas presiones de confinamiento y temperatura, temperaturas bajas, presiones de poro y diferentes estados de esfuerzos aplicados sobre la muestra. El equipo cumple con las especificaciones de la Normas para Compresión triaxial con o sin mediciones de presión de poro en muestras cilíndricas: ASTM D2664-86 y ASTM D4406-84.

**Figura 8. MTS para ensayos triaxiales.**

**Figura 9. MTS para ensayos triaxiales.**



Fuente: Manual de usuario de MTS.

## **PULSADOR**

El pulsador empleado es de Marca SOFRANEL® modelo 5055 PR, el cual genera los pulsos o señales. Tiene una capacidad de entrega de 50 V a una carga de 50 Ohmios, y un ancho de pulso variable entre 1y 10 (ms) ofreciendo de 20 a 100 repeticiones por segundo. Este pulsador genera además un pulso de disparo para efectos de sincronizar con el osciloscopio.( Madero y Rueda 2005)

## **OSCILOSCOPIO**

El osciloscopio utilizado es de marca TEKTRONIX TDS 2024® de cuatro canales. Tiene respuesta en frecuencia Plana y es activado por el generador de pulsos.

### **3.6 ADQUISICIÓN DE DATOS Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO**

#### **3.6.1 ADQUISICIÓN DE DATOS**

##### **MEDICIONES**

- I. Se realizaron diferentes mediciones de los tiempos de tránsito: entre los end caps, en una probeta de ensayo sin carga, posteriormente en la celda de carga, con y sin presión de confinamiento. Todo esto con el fin de garantizar que los valores obtenidos sean en realidad los tiempos de tránsito a través del medio estudiado.
- II. Se registraron los tiempos de propagación de las ondas a través de la roca a las tres condiciones triaxiales a Temperatura ambiente
- III. Ascenso de Temperatura a 50°C. Estabilización durante 10 horas.
- IV. Ascenso a condición triaxial 2500 psi y toma de Ondas, ascenso condición triaxial 2750 y toma de ondas, finalmente lo mismo para la condición 3000psi.
- V. Ascenso de temperatura a 75°C. Estabilización durante 10 horas.
- VI. Se realizan las mediciones del numeral IV.
- VII. Ascenso de temperatura a 100°C. Estabilización durante 10 horas.
- VIII. Se realizan las mediciones del numeral IV.

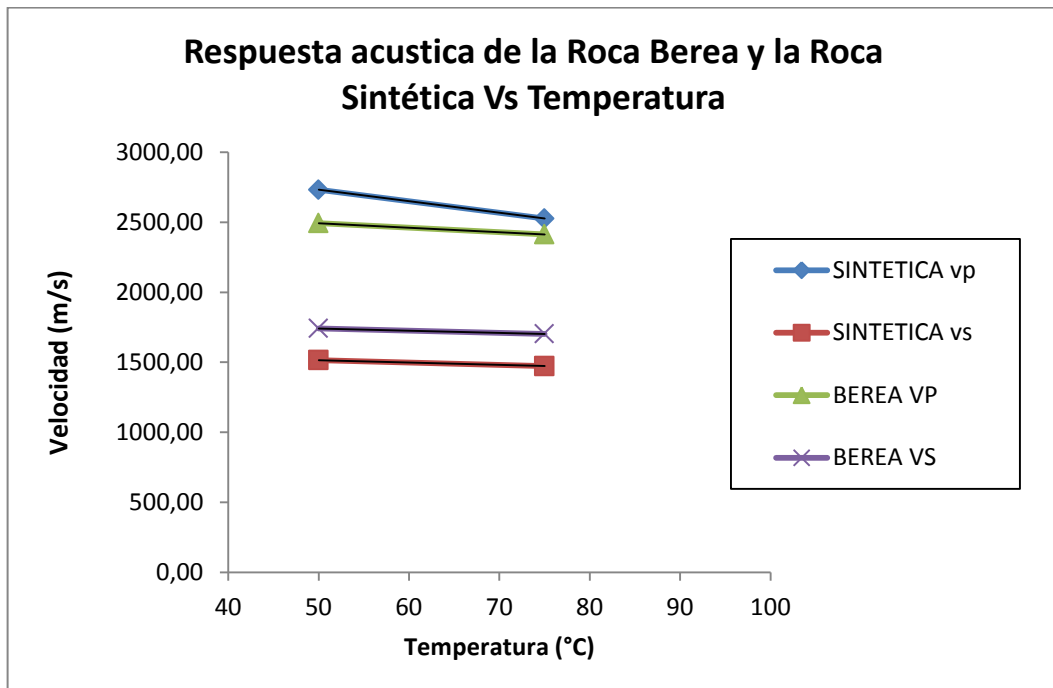
IX. Se Determinó la velocidad de propagación de la Onda P y la Onda S.

X. Se calcularon los Módulos Elásticos

### 3.6.2 FASE DE VALIDACIÓN

Durante esta fase se buscó determinar la existencia de una correlación entre la respuesta acústica de la roca sintética fabricada y la roca Berea (patrón), con el fin de determinar la validez de las mediciones realizadas en rocas sintéticas fabricadas con la metodología del Instituto Colombiano del Petróleo ICP. Las correlaciones obtenidas son las siguientes (ver ecuaciones 42-45) y son válidas para Temperaturas entre 50 y 80 grados Celsius y a Presiones entre 2500 y 3000 psi. Se espera ampliar la correlación con futuras mediciones.

**Figura 10. Respuesta acústica de la Roca Berea y Sintética contra temperatura.**

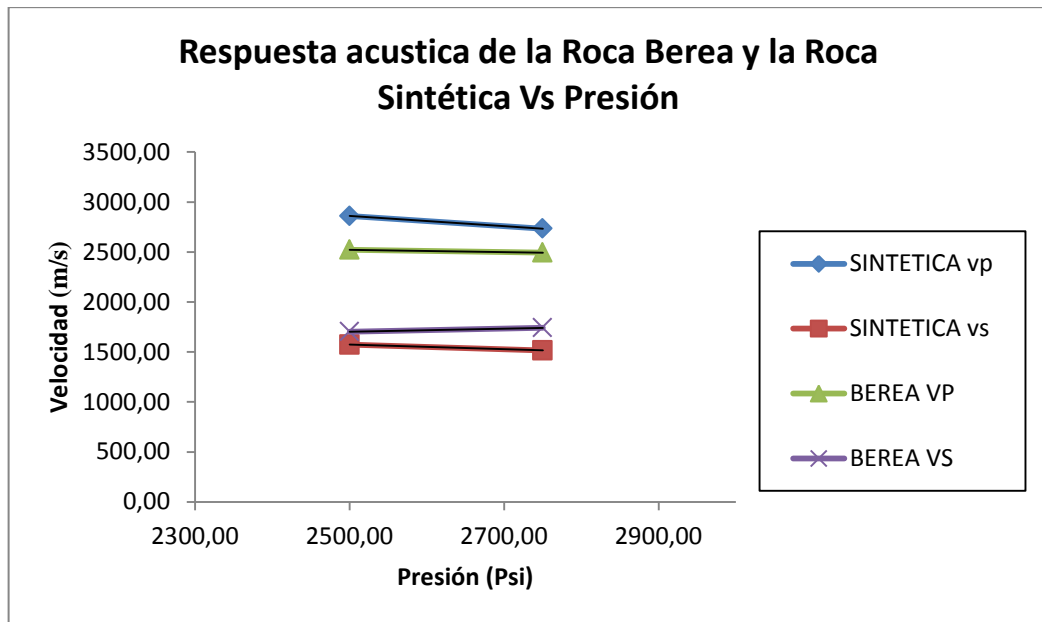


FUENTE: Los Autores.

$$Vp = VpSIN - 5,0298T + 490,5 \quad \text{Ec. 42}$$

$$Vs = VsSIN + 0,114 T + 221,9 \quad \text{Ec. 43}$$

**Figura 11 Respuesta acústica de la Roca Berea y Sintética contra presión.**



FUENTE: Los Autores.

$$Vp = VpSIN - 0,396P + 1330,2 \quad \text{Ec. 44}$$

$$Vs = VsSIN + 0,3906 P - 847,4 \quad \text{Ec. 45}$$

#### 4. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS VELOCIDADES BAJO DIFERENTES CONDICIONES

Lo que se busca con este análisis es determinar las ecuaciones que regirían la tendencia de la transmisión de la onda bajo determinadas condiciones en las cuales se encuentra el yacimiento al momento en que se realiza tanto la adquisición sísmica como los registros.

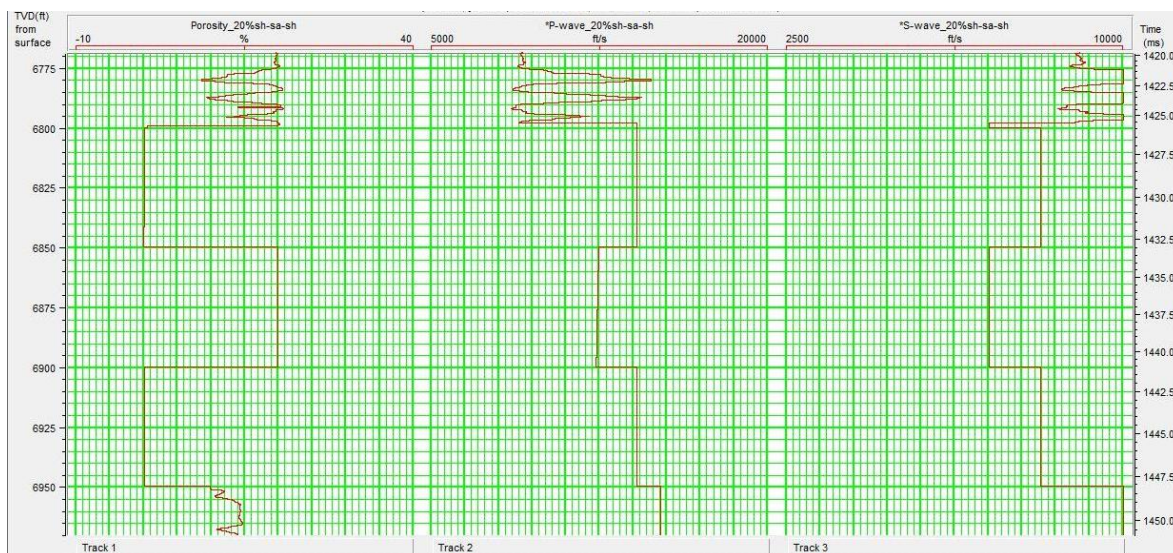
Lo anterior permite inferir con menor incertidumbre cual sería la respuesta de las velocidades sísmicas de una zona del yacimiento sin la necesidad de perforar un pozo, asociándolo al contenido de fluidos y las características que éste presente; en pro de eso se generaron una serie de registros sintéticos cuyas mediciones correspondieran a casos de rocas almacenadoras de porosidades del 10%, 20% y 30%, como se muestra en las figuras que siguen

**Figura 12. Registros sintéticos de arenas con porosidad del 10%.**



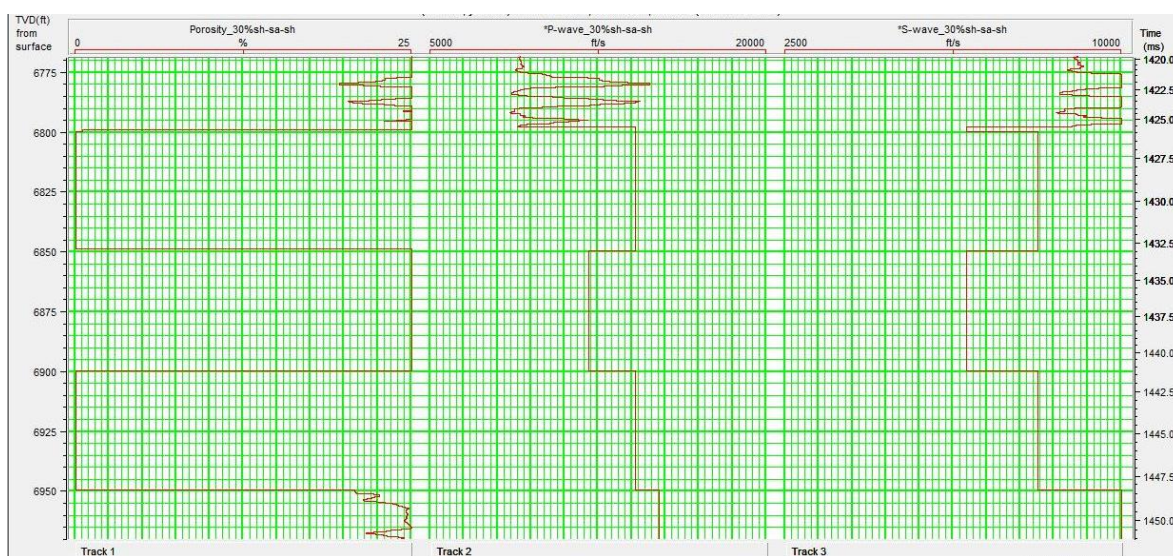
FUENTE: Los Autores.

**Figura 13. Registros sintéticos de arenas con porosidad del 20%.**



**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 14. Registros sintéticos de arenas con porosidad del 30%.**



**FUENTE: Los Autores.**

Una vez obtenidos los registros, se procede a realizar la substitución de fluidos, lo que permite especificar las características y la proporción de los componentes que saturan la roca, obteniendo los resultados que se muestran en las siguientes tablas.

**Tabla 6. Resultados de Vp y Vs para una roca de porosidad del 10%, bajo diferentes valores de presión, temperatura y saturación inicial de aceite, con gravedad API=5.**

Soi	P	T ( C )	T ( F )	Vp (ft/s)	Vp (Km/s)	Vs (ft/s)	Vs (Km/s)
100	2500	50	122	13428,4	4,09297632	7589,83	2,31338018
100	2500	75	167	13317,4	4,05914352	7591,5	2,3138892
100	2500	100	212	13236,9	4,03460712	7592,66	2,31424277
100	2500	125	257	13184,6	4,01866608	7593,3	2,31443784
100	3000	50	122	13438,1	4,09593288	7589,84	2,31338323
100	3000	75	167	13325,4	4,06158192	7591,49	2,31388615
100	3000	100	212	13242,7	4,03637496	7592,64	2,31423667
100	3000	125	257	13188,1	4,01973288	7593,28	2,31443174
100	3500	50	122	13447,9	4,09891992	7589,84	2,31338323
100	3500	75	167	13333,5	4,0640508	7591,48	2,3138831
100	3500	100	212	13248,9	4,03826472	7592,63	2,31423362
100	3500	125	257	13192,1	4,02095208	7593,26	2,31442565
75	2500	50	122	13421,8	4,09096464	7590,42	2,31356002
75	2500	75	167	13337,4	4,06523952	7591,67	2,31394102
75	2500	100	212	13272,9	4,04557992	7592,54	2,31420619
75	2500	125	257	13228,7	4,03210776	7593,02	2,3143525
75	3000	50	122	13428,9	4,09312872	7590,42	2,31356002
75	3000	75	167	13343,6	4,06712928	7591,66	2,31393797
75	3000	100	212	13277,7	4,04704296	7592,53	2,31420314
75	3000	125	257	13231,8	4,03305264	7593	2,3143464
75	3500	50	122	13436,1	4,09532328	7590,42	2,31356002
75	3500	75	167	13350	4,06908	7591,65	2,31393492
75	3500	100	212	13282,8	4,04859744	7592,51	2,31419705
75	3500	125	257	13235,4	4,03414992	7592,99	2,31434335
50	2500	50	122	13415,3	4,08898344	7591	2,3137368
50	2500	75	167	13358,2	4,07157936	7591,84	2,31399283
50	2500	100	212	13312,2	4,05755856	7592,42	2,31416962
50	2500	125	257	13278,8	4,04737824	7592,74	2,31426715
50	3000	50	122	13420	4,090416	7591,01	2,31373985
50	3000	75	167	13362,5	4,07289	7591,83	2,31398978
50	3000	100	212	13315,7	4,05862536	7592,41	2,31416657
50	3000	125	257	13281,3	4,04814024	7592,73	2,3142641
50	3500	50	122	13424,7	4,09184856	7591,01	2,31373985
50	3500	75	167	13366,9	4,07423112	7591,83	2,31398978
50	3500	100	212	13319,5	4,0597836	7592,4	2,31416352
50	3500	125	257	13284,1	4,04899368	7592,72	2,31426106
25	2500	50	122	13408,9	4,08703272	7591,59	2,31391663
25	2500	75	167	13379,9	4,07819352	7592,01	2,31404465
25	2500	100	212	13355,2	4,07066496	7592,3	2,31413304
25	2500	125	257	13336,2	4,06487376	7592,46	2,31418181
25	3000	50	122	13411,2	4,08773376	7591,59	2,31391663
25	3000	75	167	13382,2	4,07889456	7592	2,3140416
25	3000	100	212	13357,2	4,07127456	7592,29	2,31412999
25	3000	125	257	13337,7	4,06533096	7592,45	2,31417876
25	3500	50	122	13413,5	4,0884348	7591,59	2,31391663
25	3500	75	167	13384,5	4,0795956	7592	2,3140416
25	3500	100	212	13359,3	4,07191464	7592,29	2,31412999
25	3500	125	257	13339,4	4,06584912	7592,45	2,31417876

**FUENTE: Los Autores.**

**Tabla 7. Resultados de Vp y Vs para una roca de porosidad del 10%, bajo diferentes valores de presión, temperatura y saturación inicial de aceite, con gravedad API=15.**

Soi	P	T ( C )	T ( F )	Vp (ft/s)	Vp (Km/s)	Vs (ft/s)	Vs (Km/s)
100	2500	50	122	13309,1	4,05661368	7600,15	2,31652572
100	2500	75	167	13204,7	4,02479256	7601,57	2,31695854
100	2500	100	212	13134,5	4,0033956	7602,49	2,31723895
100	2500	125	257	13094,9	3,99132552	7602,88	2,31735782
100	3000	50	122	13318,7	4,05953976	7600,13	2,31651962
100	3000	75	167	13212,9	4,02729192	7601,53	2,31694634
100	3000	100	212	13140,7	4,00528536	7602,43	2,31722066
100	3000	125	257	13099	3,9925752	7602,82	2,31733954
100	3500	50	122	13328,4	4,06249632	7600,1	2,31651048
100	3500	75	167	13221,2	4,02982176	7601,48	2,3169311
100	3500	100	212	13147,4	4,00732752	7602,38	2,31720542
100	3500	125	257	13103,7	3,99400776	7602,76	2,31732125
75	2500	50	122	13330,3	4,06307544	7598,16	2,31591917
75	2500	75	167	13245,5	4,0372284	7599,22	2,31624226
75	2500	100	212	13185,1	4,01881848	7599,91	2,31645257
75	2500	125	257	13148,2	4,00757136	7600,2	2,31654096
75	3000	50	122	13337	4,0651176	7598,14	2,31591307
75	3000	75	167	13252,4	4,03933152	7599,19	2,31623311
75	3000	100	212	13190,8	4,02055584	7599,86	2,31643733
75	3000	125	257	13152,4	4,00885152	7600,15	2,31652572
75	3500	50	122	13345,5	4,0677084	7598,11	2,31590393
75	3500	75	167	13259,4	4,04146512	7599,15	2,31622092
75	3500	100	212	13196,8	4,02238464	7599,82	2,31642514
75	3500	125	257	13157,1	4,01028408	7600,11	2,31651353
50	2500	50	122	13352,9	4,06996392	7596,16	2,31530957
50	2500	75	167	13291,4	4,05121872	7596,87	2,31552598
50	2500	100	212	13244,8	4,03701504	7597,33	2,31566618
50	2500	125	257	13213,9	4,02759672	7597,52	2,3157241
50	3000	50	122	13358,2	4,07157936	7596,15	2,31530652
50	3000	75	167	13296,6	4,05280368	7596,85	2,31551988
50	3000	100	212	13249,5	4,0384476	7597,3	2,31565704
50	3000	125	257	13217,7	4,02875496	7597,49	2,31571495
50	3500	50	122	13363,6	4,07322528	7596,13	2,31530042
50	3500	75	167	13301,9	4,05441912	7596,82	2,31551074
50	3500	100	212	13254,3	4,03991064	7597,27	2,3156479
50	3500	125	257	13221,9	4,03003512	7597,46	2,31570581
25	2500	50	122	13376,9	4,07727912	7594,17	2,31470302
25	2500	75	167	13343,3	4,06703784	7594,52	2,3148097
25	2500	100	212	13316,1	4,05874728	7594,75	2,3148798
25	2500	125	257	13296,4	4,05274272	7594,85	2,31491028
25	3000	50	122	13379,8	4,07816304	7594,16	2,31469997
25	3000	75	167	13346,3	4,06795224	7594,51	2,31480665
25	3000	100	212	13319	4,0596312	7594,74	2,31487675
25	3000	125	257	13299	4,0535352	7594,83	2,31490418
25	3500	50	122	13382,6	4,07901648	7594,15	2,31469692
25	3500	75	167	13349,3	4,06886664	7594,5	2,3148036
25	3500	100	212	13322	4,0605456	7594,72	2,31487066
25	3500	125	257	13301,8	4,05438864	7594,82	2,31490114

FUENTE: Los Autores.

**Tabla 8. Resultados de Vp y Vs para una roca de porosidad del 10%, bajo diferentes valores de presión, temperatura y saturación inicial de aceite, con gravedad API=25.**

Soi	P	T ( C )	T ( F )	Vp (ft/s)	Vp (Km/s)	Vs (ft/s)	Vs (Km/s)
100	2500	50	122	13210,5	4,0265604	7609,13	2,31926282
100	2500	75	167	13112,1	3,99656808	7610,34	2,31963163
100	2500	100	212	13051,1	3,97797528	7611,04	2,31984499
100	2500	125	257	13022,4	3,96922752	7611,22	2,31989986
100	3000	50	122	13219,6	4,02933408	7609,07	2,31924454
100	3000	75	167	13119,9	3,99894552	7610,25	2,3196042
100	3000	100	212	13057	3,9797736	7610,94	2,31981451
100	3000	125	257	13026,3	3,97041624	7611,11	2,31986633
100	3500	50	122	13228,7	4,03210776	7609	2,3192232
100	3500	75	167	13127,9	4,00138392	7610,16	2,31957677
100	3500	100	212	13063,4	3,98172432	7610,84	2,31978403
100	3500	125	257	13030,9	3,97181832	7611,01	2,31983585
75	2500	50	122	13249,1	4,03832568	7604,88	2,31796742
75	2500	75	167	13164,6	4,01257008	7605,79	2,31824479
75	2500	100	212	13108,5	3,9954708	7606,31	2,31840329
75	2500	125	257	13078,7	3,98638776	7606,44	2,31844291
75	3000	50	122	13256,8	4,04067264	7604,83	2,31795218
75	3000	75	167	13171,7	4,01473416	7605,72	2,31822346
75	3000	100	212	13114,5	3,9972996	7606,23	2,3183789
75	3000	125	257	13083,2	3,98775936	7606,36	2,31841853
75	3500	50	122	13264,5	4,0430196	7604,78	2,31793694
75	3500	75	167	13179	4,0169592	7605,65	2,31820212
75	3500	100	212	13120,9	3,99925032	7606,16	2,31835757
75	3500	125	257	13088,4	3,98934432	7606,29	2,31839719
50	2500	50	122	13293,2	4,05176736	7600,64	2,31667507
50	2500	75	167	13228	4,0318944	7601,24	2,31685795
50	2500	100	212	13181,4	4,01769072	7601,59	2,31696463
50	2500	125	257	13153,4	4,00915632	7601,68	2,31699206
50	3000	50	122	13299,1	4,05356568	7600,61	2,31666593
50	3000	75	167	13233,9	4,03369272	7601,2	2,31684576
50	3000	100	212	13186,9	4,01936712	7601,54	2,31694939
50	3000	125	257	13158,1	4,01058888	7601,63	2,31697682
50	3500	50	122	13304,9	4,05533352	7600,57	2,31665374
50	3500	75	167	13239,9	4,03552152	7601,15	2,31683052
50	3500	100	212	13192,6	4,02110448	7601,49	2,31693415
50	3500	125	257	13163,2	4,01214336	7601,57	2,31695854
25	2500	50	122	13343,9	4,06722072	7596,41	2,31538577
25	2500	75	167	13305,7	4,05557736	7596,7	2,31547416
25	2500	100	212	13276,1	4,04655528	7596,88	2,31552902
25	2500	125	257	13255,8	4,04036784	7596,92	2,31554122
25	3000	50	122	13347,3	4,06825704	7596,39	2,31537967
25	3000	75	167	13309,5	4,0567356	7596,68	2,31546806
25	3000	100	212	13279,9	4,04771352	7596,85	2,31551988
25	3000	125	257	13259,5	4,0414956	7596,9	2,31553512
25	3500	50	122	13350,6	4,06926288	7596,37	2,31537358
25	3500	75	167	13313,2	4,05786336	7596,66	2,31546197
25	3500	100	212	13283,7	4,04887176	7596,83	2,31551378
25	3500	125	257	13263,3	4,04265384	7596,87	2,31552598

FUENTE: Los Autores.

**Tabla 9. Resultados de Vp y Vs para una roca de porosidad del 20%, bajo diferentes valores de presión, temperatura y saturación inicial de aceite, con gravedad API=5.**

Soi	P	T ( C )	T ( F )	Vp (ft/s)	Vp (Km/s)	Vs (ft/s)	Vs (Km/s)
100	2500	50	122	12384,6	3,77482608	6989,51	2,13040265
100	2500	75	167	12297,1	3,74815608	6992,81	2,13140849
100	2500	100	212	12232,7	3,72852696	6995,1	2,13210648
100	2500	125	257	12167,3	3,70859304	6996,37	2,13249358
100	3000	50	122	12386,2	3,77531376	6989,52	2,1304057
100	3000	75	167	12270,6	3,74007888	6992,79	2,13140239
100	3000	100	212	12211,3	3,72200424	6995,07	2,13209734
100	3000	125	257	12179,7	3,71237256	6996,33	2,13248138
100	3500	50	122	12411,7	3,78308616	6989,53	2,13040874
100	3500	75	167	12270,1	3,73992648	6992,77	2,1313963
100	3500	100	212	12217,1	3,72377208	6995,04	2,13208819
100	3500	125	257	12201,7	3,71907816	6996,3	2,13247224
75	2500	50	122	12371,1	3,77071128	6990,67	2,13075622
75	2500	75	167	12307,9	3,75144792	6993,14	2,13150907
75	2500	100	212	12265,8	3,73861584	6994,86	2,13203333
75	2500	125	257	12234,6	3,72910608	6995,81	2,13232289
75	3000	50	122	12418,3	3,78509784	6990,68	2,13075926
75	3000	75	167	12356,2	3,76616976	6993,13	2,13150602
75	3000	100	212	12279,1	3,74266968	6994,84	2,13202723
75	3000	125	257	12219,5	3,7245036	6995,78	2,13231374
75	3500	50	122	12425,2	3,78720096	6990,68	2,13075926
75	3500	75	167	12336,8	3,76025664	6993,11	2,13149993
75	3500	100	212	12231,4	3,72813072	6994,81	2,13201809
75	3500	125	257	12222,8	3,72550944	6995,76	2,13230765
50	2500	50	122	12365,7	3,76906536	6991,83	2,13110978
50	2500	75	167	12328,2	3,75763536	6993,47	2,13160966
50	2500	100	212	12276,6	3,74190768	6994,62	2,13196018
50	2500	125	257	12262,7	3,73767096	6995,26	2,13215525
50	3000	50	122	12370,3	3,77046744	6991,83	2,13110978
50	3000	75	167	12332,3	3,75888504	6993,47	2,13160966
50	3000	100	212	12280	3,742944	6994,61	2,13195713
50	3000	125	257	12265,1	3,73840248	6995,24	2,13214915
50	3500	50	122	12366,9	3,76943112	6991,84	2,13111283
50	3500	75	167	12344,9	3,76272552	6993,45	2,13160356
50	3500	100	212	12275	3,74142	6994,59	2,13195103
50	3500	125	257	12285,2	3,74452896	6995,22	2,13214306
25	2500	50	122	12368,6	3,76994928	6992,99	2,13146335
25	2500	75	167	12349,4	3,76409712	6993,81	2,13171329
25	2500	100	212	12334,4	3,75952512	6994,38	2,13188702
25	2500	125	257	12299,5	3,7488876	6994,7	2,13198456
25	3000	50	122	12362,7	3,76815096	6992,99	2,13146335
25	3000	75	167	12343,3	3,76223784	6993,8	2,13171024
25	3000	100	212	12344,7	3,76266456	6994,38	2,13188702
25	3000	125	257	12301	3,7493448	6994,69	2,13198151
25	3500	50	122	12356,9	3,76638312	6992,99	2,13146335
25	3500	75	167	12345,5	3,7629084	6993,8	2,13171024
25	3500	100	212	12363,5	3,7683948	6994,37	2,13188398
25	3500	125	257	12311,1	3,75242328	6994,68	2,13197846

FUENTE: Los Autores.

**Tabla 10. Resultados de Vp y Vs para una roca de porosidad del 20%, bajo diferentes valores de presión, temperatura y saturación inicial de aceite, con gravedad API=15.**

Soi	P	T ( C )	T ( F )	Vp (ft/s)	Vp (Km/s)	Vs (ft/s)	Vs (Km/s)
100	2500	50	122	12270,6	3,74007888	7009,95	2,13663276
100	2500	75	167	12210,9	3,72188232	7012,78	2,13749534
100	2500	100	212	12158,2	3,70581936	7014,61	2,13805313
100	2500	125	257	12113,4	3,69216432	7015,4	2,13829392
100	3000	50	122	12288,3	3,74547384	7009,89	2,13661447
100	3000	75	167	12209,1	3,72133368	7012,68	2,13746486
100	3000	100	212	12182,7	3,71328696	7014,49	2,13801655
100	3000	125	257	12117	3,6932616	7015,28	2,13825734
100	3500	50	122	12331,9	3,75876312	7009,83	2,13659618
100	3500	75	167	12207,7	3,72090696	7012,59	2,13743743
100	3500	100	212	12141,2	3,70063776	7014,38	2,13798302
100	3500	125	257	12121,2	3,69454176	7015,16	2,13822077
75	2500	50	122	12321,6	3,75562368	7005,99	2,13542575
75	2500	75	167	12217,1	3,72377208	7008,1	2,13606888
75	2500	100	212	12180,3	3,71255544	7009,47	2,13648646
75	2500	125	257	12165,7	3,70810536	7010,07	2,13666934
75	3000	50	122	12328,7	3,75778776	7005,94	2,13541051
75	3000	75	167	12232,5	3,728466	7008,04	2,13605059
75	3000	100	212	12185,5	3,7141404	7009,39	2,13646207
75	3000	125	257	12131,8	3,69777264	7009,98	2,1366419
75	3500	50	122	12335,9	3,75998232	7005,9	2,13539832
75	3500	75	167	12265,8	3,73861584	7007,97	2,13602926
75	3500	100	212	12209,4	3,72142512	7009,3	2,13643464
75	3500	125	257	12154,8	3,70478304	7009,89	2,13661447
50	2500	50	122	12339,4	3,76104912	7002,03	2,13421874
50	2500	75	167	12300	3,74904	7003,44	2,13464851
50	2500	100	212	12221,8	3,72520464	7004,35	2,13492588
50	2500	125	257	12220,4	3,72477792	7004,75	2,1350478
50	3000	50	122	12352,9	3,76516392	7002	2,1342096
50	3000	75	167	12287,3	3,74516904	7003,4	2,13463632
50	3000	100	212	12252,9	3,73468392	7004,3	2,13491064
50	3000	125	257	12223,9	3,72584472	7004,69	2,13502951
50	3500	50	122	12357,9	3,76668792	7001,97	2,13420046
50	3500	75	167	12301	3,7493448	7003,35	2,13462108
50	3500	100	212	12239,6	3,73063008	7004,24	2,13489235
50	3500	125	257	12227,6	3,72697248	7004,63	2,13501122
25	2500	50	122	12358,7	3,76693176	6998,09	2,13301783
25	2500	75	167	12310,3	3,75217944	6998,79	2,13323119
25	2500	100	212	12293,1	3,74693688	6999,24	2,13336835
25	2500	125	257	12300,6	3,74922288	6999,44	2,13342931
25	3000	50	122	12378	3,7728144	6998,07	2,13301174
25	3000	75	167	12313,2	3,75306336	6998,77	2,1332251
25	3000	100	212	12304,5	3,7504116	6999,21	2,13335921
25	3000	125	257	12311,7	3,75260616	6999,41	2,13342017
25	3500	50	122	12347,5	3,763518	6998,06	2,13300869
25	3500	75	167	12307,6	3,75135648	6998,74	2,13321595
25	3500	100	212	12290,2	3,74605296	6999,19	2,13335311
25	3500	125	257	12262,3	3,73754904	6999,38	2,13341102

FUENTE: Los Autores.

**Tabla 11. Resultados de Vp y Vs para una roca de porosidad del 20%, bajo diferentes valores de presión, temperatura y saturación inicial de aceite, con gravedad API=25.**

Soi	P	T ( C )	T ( F )	Vp (ft/s)	Vp (Km/s)	Vs (ft/s)	Vs (Km/s)
100	2500	50	122	12230,6	3,72788688	7027,81	2,14207649
100	2500	75	167	12114,7	3,69256056	7030,23	2,1428141
100	2500	100	212	12110,8	3,69137184	7031,65	2,14324692
100	2500	125	257	12065,4	3,67753392	7032,04	2,14336579
100	3000	50	122	12238,7	3,73035576	7027,67	2,14203382
100	3000	75	167	12102,3	3,68878104	7030,05	2,14275924
100	3000	100	212	12105,8	3,68984784	7031,45	2,14318596
100	3000	125	257	12068,6	3,67850928	7031,82	2,14329874
100	3500	50	122	12256,2	3,73568976	7027,53	2,14199114
100	3500	75	167	12138,4	3,69978432	7029,87	2,14270438
100	3500	100	212	12051,6	3,67332768	7031,24	2,14312195
100	3500	125	257	12082,7	3,68280696	7031,61	2,14323473
75	2500	50	122	12249,1	3,73352568	7019,35	2,13949788
75	2500	75	167	12182,3	3,71316504	7021,16	2,14004957
75	2500	100	212	12122,9	3,69505992	7022,22	2,14037266
75	2500	125	257	12105,8	3,68984784	7022,51	2,14046105
75	3000	50	122	12265,1	3,73840248	7019,24	2,13946435
75	3000	75	167	12160,5	3,7065204	7021,02	2,1400069
75	3000	100	212	12128,2	3,69667536	7022,06	2,14032389
75	3000	125	257	12109,7	3,69103656	7022,35	2,14041228
75	3500	50	122	12281,1	3,74327928	7019,14	2,13943387
75	3500	75	167	12176,5	3,7113972	7020,89	2,13996727
75	3500	100	212	12133,8	3,69838224	7021,91	2,14027817
75	3500	125	257	12094,6	3,68643408	7022,19	2,14036351
50	2500	50	122	12273,7	3,74102376	7010,91	2,13692537
50	2500	75	167	12222,6	3,72544848	7012,12	2,13729418
50	2500	100	212	12217,4	3,72386352	7012,82	2,13750754
50	2500	125	257	12135,5	3,6989004	7013,02	2,1375685
50	3000	50	122	12287,9	3,74535192	7010,85	2,13690708
50	3000	75	167	12209,9	3,72157752	7012,03	2,13726674
50	3000	100	212	12166,5	3,7083492	7012,72	2,13747706
50	3000	125	257	12186,8	3,71453664	7012,91	2,13753497
50	3500	50	122	12293,3	3,74699784	7010,78	2,13688574
50	3500	75	167	12224,5	3,7260276	7011,94	2,13723931
50	3500	100	212	12199,4	3,71837712	7012,62	2,13744658
50	3500	125	257	12181,9	3,71304312	7012,8	2,13750144
25	2500	50	122	12258,1	3,73626888	7019,35	2,13949788
25	2500	75	167	12287	3,7450776	7003,11	2,13454793
25	2500	100	212	12276,8	3,74196864	7003,46	2,13465461
25	2500	125	257	12266,8	3,73892064	7003,56	2,13468509
25	3000	50	122	12309	3,7517832	7002,48	2,1343559
25	3000	75	167	12299,1	3,74876568	7003,07	2,13453574
25	3000	100	212	12262,7	3,73767096	7003,41	2,13463937
25	3000	125	257	12261,2	3,73721376	7003,51	2,13466985
25	3500	50	122	12337,5	3,76047	7002,45	2,13434676
25	3500	75	167	12302,6	3,74983248	7003,03	2,13452354
25	3500	100	212	12266,3	3,73876824	7003,36	2,13462413
25	3500	125	257	12255,9	3,73559832	7003,46	2,13465461

FUENTE: Los Autores.

**Tabla 12. Resultados de Vp y Vs para una roca de porosidad del 30%, bajo diferentes valores de presión, temperatura y saturación inicial de aceite, con gravedad API=5.**

Soi	P	T ( C )	T ( F )	Vp (ft/s)	Vp (Km/s)	Vs (ft/s)	Vs (Km/s)
100	2500	50	122	12059,2	3,67564416	6539,35	1,99319388
100	2500	75	167	11977,6	3,65077248	6544,34	1,99471483
100	2500	100	212	11920	3,633216	6547,83	1,99577858
100	2500	125	257	11883,2	3,62199936	6549,75	1,9963638
100	3000	50	122	12067,2	3,67808256	6539,36	1,99319693
100	3000	75	167	11983,8	3,65266224	6544,31	1,99470569
100	3000	100	212	11924,7	3,63464856	6547,78	1,99576334
100	3000	125	257	11885,8	3,62279184	6549,7	1,99634856
100	3500	50	122	12075,2	3,68052096	6539,37	1,99319998
100	3500	75	167	11990,2	3,65461296	6544,28	1,99469654
100	3500	100	212	11929,3	3,63605064	6547,72	1,99574506
100	3500	125	257	11888,7	3,62367576	6549,64	1,99633027
75	2500	50	122	12056,2	3,67472976	6541,1	1,99372728
75	2500	75	167	11993,9	3,65574072	6544,85	1,99487028
75	2500	100	212	11947,2	3,64150656	6547,46	1,99566581
75	2500	125	257	11915,1	3,63172248	6548,9	1,99610472
75	3000	50	122	12062,1	3,67652808	6541,11	1,99373033
75	3000	75	167	11998,8	3,65723424	6544,82	1,99486114
75	3000	100	212	11950,9	3,64263432	6547,43	1,99565666
75	3000	125	257	11917,5	3,632454	6548,87	1,99609558
75	3500	50	122	12068	3,6783264	6541,12	1,99373338
75	3500	75	167	12003,8	3,65875824	6544,8	1,99485504
75	3500	100	212	11954,8	3,64382304	6547,39	1,99564447
75	3500	125	257	11920,1	3,63324648	6548,82	1,99608034
50	2500	50	122	12053,4	3,67387632	6542,86	1,99426373
50	2500	75	167	12011	3,6609528	6545,35	1,99502268
50	2500	100	212	11977,1	3,65062008	6547,1	1,99555608
50	2500	125	257	11952,2	3,64303056	6548,06	1,99584869
50	3000	50	122	12057,2	3,67503456	6542,86	1,99426373
50	3000	75	167	12014,5	3,6620196	6545,34	1,99501963
50	3000	100	212	11979,9	3,65147352	6547,07	1,99554694
50	3000	125	257	11954,1	3,64360968	6548,3	1,99592184
50	3500	50	122	12061	3,6761928	6542,87	1,99426678
50	3500	75	167	12018	3,6630864	6542,32	1,99409914
50	3500	100	212	11982,8	3,65235744	6547,05	1,99554084
50	3500	125	257	11956,3	3,64428024	6548,01	1,99583345
25	2500	50	122	12050,6	3,67302288	6544,61	1,99479713
25	2500	75	167	12029	3,6664392	6545,86	1,99517813
25	2500	100	212	12010,4	3,66076992	6546,73	1,9954433
25	2500	125	257	11995,9	3,65635032	6547,22	1,99559266
25	3000	50	122	12052,5	3,673602	6549,62	1,99632418
25	3000	75	167	12030,8	3,66698784	6545,86	1,99517813
25	3000	100	212	12012	3,6612576	6546,72	1,99544026
25	3000	125	257	11997,1	3,65671608	6547,2	1,99558656
25	3500	50	122	12054,3	3,67415064	6544,62	1,99480018
25	3500	75	167	12032,7	3,66756696	6545,85	1,99517508
25	3500	100	212	12013,7	3,66177576	6546,71	1,99543721
25	3500	125	257	11998,4	3,65711232	6547,19	1,99558351

FUENTE: Los Autores.

**Tabla 13. Resultados de Vp y Vs para una roca de porosidad del 30%, bajo diferentes valores de presión, temperatura y saturación inicial de aceite, con gravedad API=15.**

Soi	P	T ( C )	T ( F )	Vp (ft/s)	Vp (Km/s)	Vs (ft/s)	Vs (Km/s)
100	2500	50	122	12007,3	3,65982504	6570,4	2,00265792
100	2500	75	167	11934	3,6374832	6574,73	2,0039777
100	2500	100	212	11885,9	3,62282232	6577,55	2,00483724
100	2500	125	257	11858,3	3,61440984	6578,79	2,00521519
100	3000	50	122	12014,6	3,66205008	6570,31	2,00263049
100	3000	75	167	11939,9	3,63928152	6574,58	2,00393198
100	3000	100	212	11890,2	3,62413296	6577,36	2,00477933
100	3000	125	257	11861	3,6152328	6578,61	2,00516033
100	3500	50	122	12022	3,6643056	6570,22	2,00260306
100	3500	75	167	11945,9	3,64111032	6574,44	2,00388931
100	3500	100	212	11894,9	3,62556552	6577,19	2,00472751
100	3500	125	257	11864,2	3,61620816	6578,42	2,00510242
75	2500	50	122	12015,4	3,66229392	6564,36	2,00081693
75	2500	75	167	11954,6	3,64376208	6567,6	2,00180448
75	2500	100	212	11911,9	3,63074712	6569,71	2,00244761
75	2500	125	257	11885,4	3,62266992	6570,65	2,00273412
75	3000	50	122	12021,2	3,66406176	6564,29	2,00079559
75	3000	75	167	11959,7	3,64531656	6567,5	2,001774
75	3000	100	212	11916	3,6319968	6569,57	2,00240494
75	3000	125	257	11888,4	3,62358432	6570,51	2,00269145
75	3500	50	122	12027,1	3,66586008	6564,23	2,0007773
75	3500	75	167	11964,9	3,64690152	6567,38	2,00173742
75	3500	100	212	11920,3	3,63330744	6569,45	2,00236836
75	3500	125	257	11891,7	3,62459016	6570,37	2,00264878
50	2500	50	122	12024,8	3,66515904	6558,35	1,99898508
50	2500	75	167	11979,7	3,65141256	6560,5	1,9996404
50	2500	100	212	11945,7	3,64104936	6561,9	2,00006712
50	2500	125	257	11922,8	3,63406944	6562,52	2,0002561
50	3000	50	122	12029	3,6664392	6558,31	1,99897289
50	3000	75	167	11983,7	3,65263176	6560,43	1,99961906
50	3000	100	212	11949,2	3,64211616	6561,81	2,00003969
50	3000	125	257	11925,6	3,63492288	6562,43	2,00022866
50	3500	50	122	12033,1	3,66768888	6558,26	1,99895765
50	3500	75	167	11987,7	3,65385096	6560,36	1,99959773
50	3500	100	212	11952,8	3,64321344	6561,73	2,0000153
50	3500	125	257	11928,6	3,63583728	6562,34	2,00020123
25	2500	50	122	12035,6	3,66845088	6552,35	1,99715628
25	2500	75	167	12010,4	3,66076992	6553,43	1,99748546
25	2500	100	212	11989,8	3,65449104	6554,12	1,99769578
25	2500	125	257	11974,6	3,64985808	6554,43	1,99779026
25	3000	50	122	12037,8	3,66912144	6552,33	1,99715018
25	3000	75	167	12012,7	3,66147096	6553,39	1,99747327
25	3000	100	212	11992,1	3,65519208	6554,08	1,99768358
25	3000	125	257	11976,6	3,65046768	6554,39	1,99777807
25	3500	50	122	12040	3,669792	6552,31	1,99714409
25	3500	75	167	12015	3,662172	6553,35	1,99746108
25	3500	100	212	11994,3	3,65586264	6554,03	1,99766834
25	3500	125	257	11978,8	3,65113824	6554,34	1,99776283

FUENTE: Los Autores.

**Tabla 14. Resultados de Vp y Vs para una roca de porosidad del 30%, bajo diferentes valores de presión, temperatura y saturación inicial de aceite, con gravedad API=25.**

Soi	P	T ( C )	T ( F )	Vp (ft/s)	Vp (Km/s)	Vs (ft/s)	Vs (Km/s)
100	2500	50	122	11970,6	3,64863888	6597,68	2,01097286
100	2500	75	167	11904	3,6283392	6601,41	2,01210977
100	2500	100	212	11863,1	3,61587288	6603,62	2,01278338
100	2500	125	257	11843,3	3,60983784	6604,39	2,01301807
100	3000	50	122	11977	3,6505896	6597,45	2,01090276
100	3000	75	167	11909,1	3,62989368	6601,13	2,01202442
100	3000	100	212	11867	3,6170616	6603,33	2,01269498
100	3000	125	257	11845,4	3,61047792	6603,95	2,01288396
100	3500	50	122	11983,6	3,65260128	6597,25	2,0108418
100	3500	75	167	11914,6	3,63157008	6600,87	2,01194518
100	3500	100	212	11871,1	3,61831128	6603,02	2,0126005
100	3500	125	257	11848,2	3,61133136	6603,62	2,01278338
75	2500	50	122	11981,4	3,65193072	6584,73	2,0070257
75	2500	75	167	11922,3	3,63391704	6587,52	2,0078761
75	2500	100	212	11883,6	3,62212128	6589,2	2,00838816
75	2500	125	257	11862	3,6155376	6589,68	2,00853446
75	3000	50	122	11986,9	3,65360712	6584,56	2,00697389
75	3000	75	167	11927,2	3,63541056	6587,31	2,00781209
75	3000	100	212	11887,5	3,62331	6588,95	2,00831196
75	3000	125	257	11864,9	3,61642152	6589,43	2,00845826
75	3500	50	122	11992,6	3,65534448	6584,41	2,00692817
75	3500	75	167	11932,4	3,63699552	6587,11	2,00775113
75	3500	100	212	11891,8	3,62462064	6588,71	2,00823881
75	3500	125	257	11868,3	3,61745784	6589,17	2,00837902
50	2500	50	122	11997	3,6566856	6571,87	2,00310598
50	2500	75	167	11949,9	3,64232952	6573,72	2,00366986
50	2500	100	212	11916,3	3,63208824	6574,82	2,00400514
50	2500	125	257	11895,5	3,6257484	6575,15	2,00410572
50	3000	50	122	12001,4	3,65802672	6571,76	2,00307245
50	3000	75	167	11954,2	3,64364016	6573,59	2,00363023
50	3000	100	212	11920,2	3,63327696	6574,66	2,00395637
50	3000	125	257	11898,7	3,62672376	6574,97	2,00405086
50	3500	50	122	12005,8	3,65936784	6571,67	2,00304502
50	3500	75	167	11958,5	3,6449508	6573,45	2,00358756
50	3500	100	212	11924,2	3,63449616	6574,5	2,0039076
50	3500	125	257	11902,3	3,62782104	6574,81	2,00400209
25	2500	50	122	12018,7	3,66329976	6559,08	1,99920758
25	2500	75	167	11990,1	3,65458248	6560	1,999488
25	2500	100	212	11967,7	3,64775496	6560,55	1,99965564
25	2500	125	257	11952	3,6429696	6560,71	1,99970441
25	3000	50	122	12021,3	3,66409224	6559,03	1,99919234
25	3000	75	167	11992,9	3,65543592	6559,93	1,99946666
25	3000	100	212	11970,5	3,6486084	6560,47	1,99963126
25	3000	125	257	11954,7	3,64379256	6560,63	1,99968002
25	3500	50	122	12023,8	3,66485424	6558,97	1,99917406
25	3500	75	167	11995,7	3,65628936	6559,87	1,99944838
25	3500	100	212	11973,4	3,64949232	6560,4	1,99960992
25	3500	125	257	11957,6	3,64467648	6560,54	1,99965259

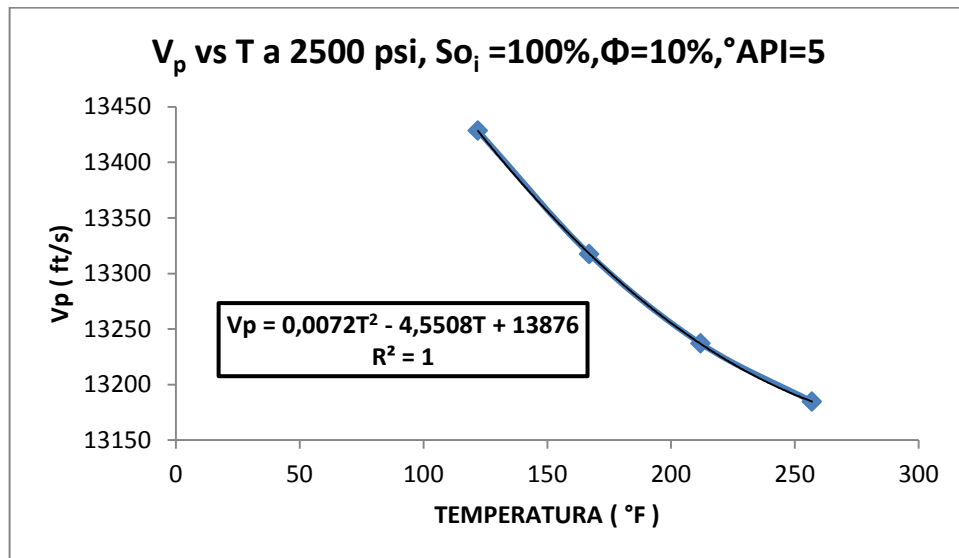
FUENTE: Los Autores.

Al graficar los datos anteriores se evidencian tanto las tendencias, como las ecuaciones que las describen, obteniéndose lo que sigue.

#### 4.1 CASO 1: POROSIDAD DEL 10% Y PETRÓLEO DE 5°API

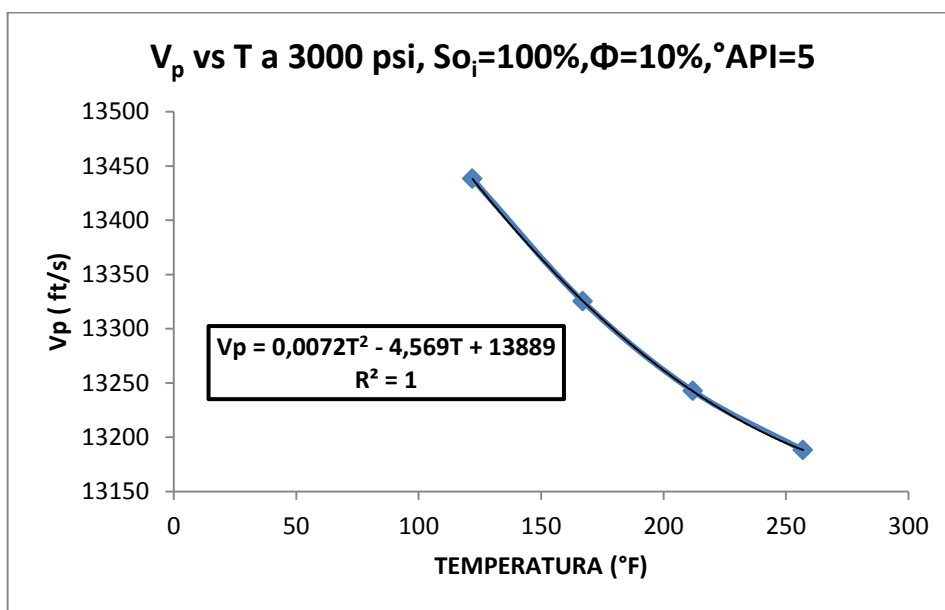
##### 4.1.1 ONDA COMPRESIONAL CONTRA TEMPERATURA A DISTINTAS PRESIONES, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE ACEITE

*Figura 15. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=100\%$  y 2500 PSI*



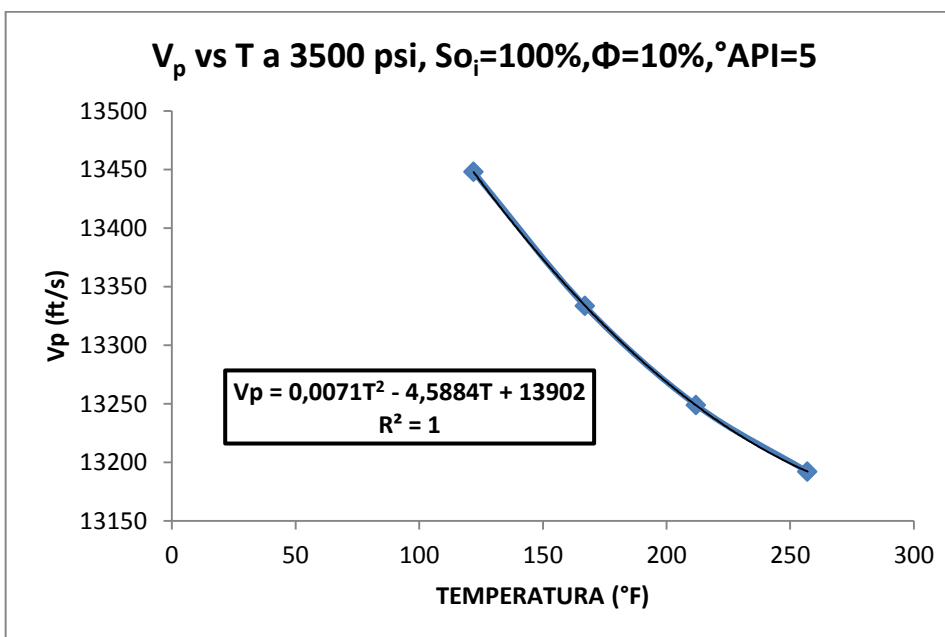
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 16. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=100\%$  y 3000 PSI**



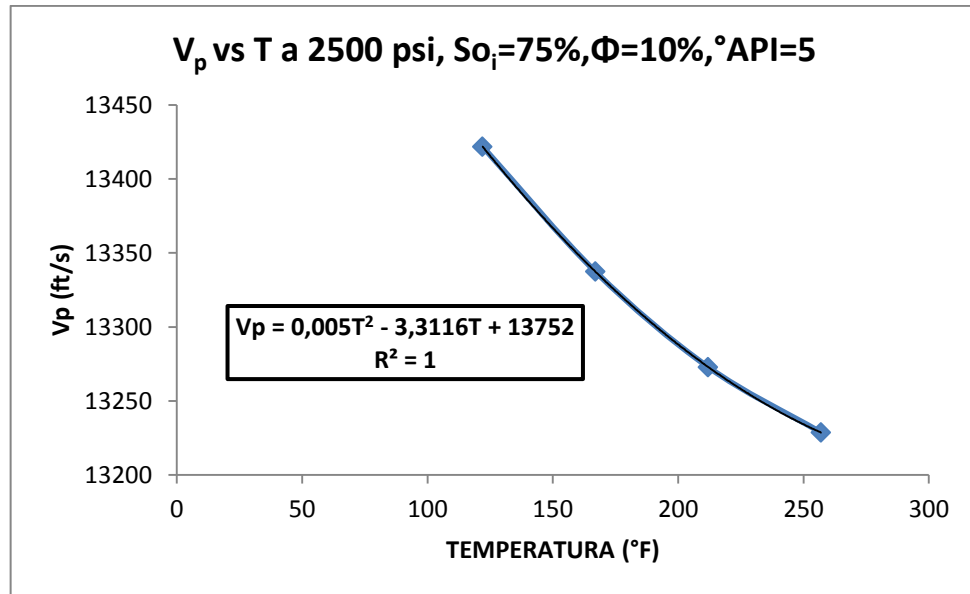
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 17. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura, a  $S_{o_i}=100\%$  y 3500 PSI**



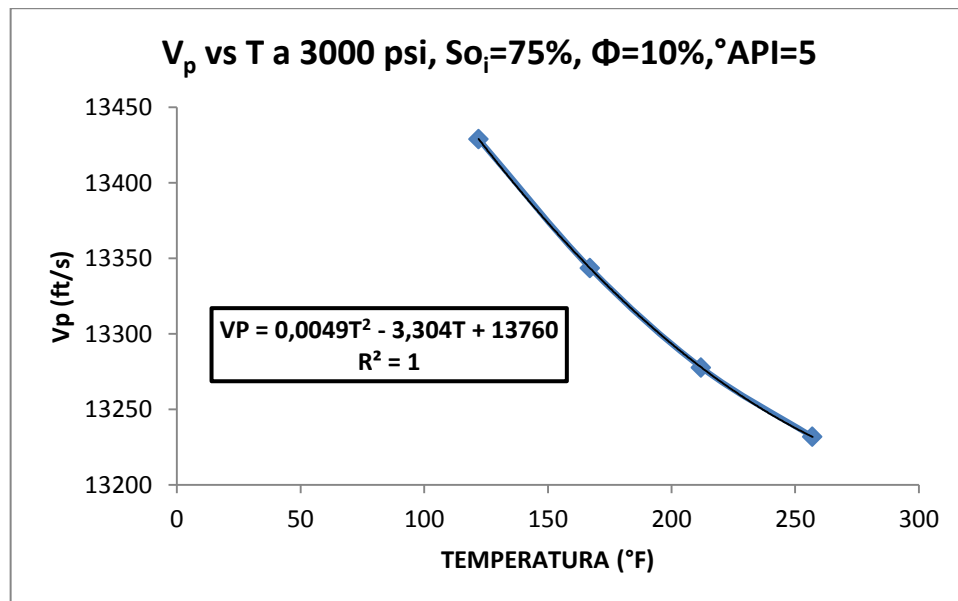
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 18. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=75\%$ , 2500 PSI**



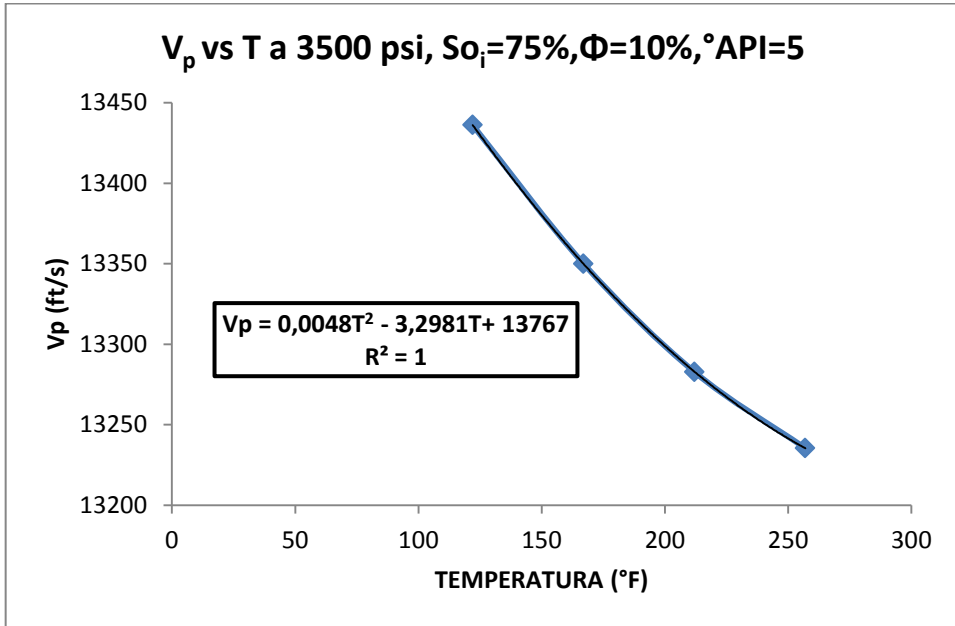
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 19. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=75\%$ , 3000 PSI**



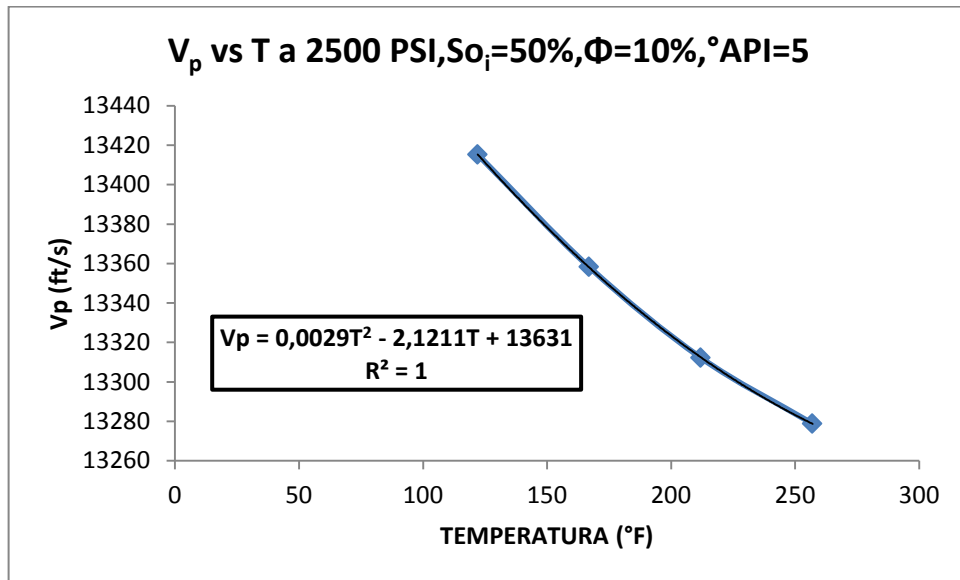
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 20. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=75\%$ , 3500 PSI**



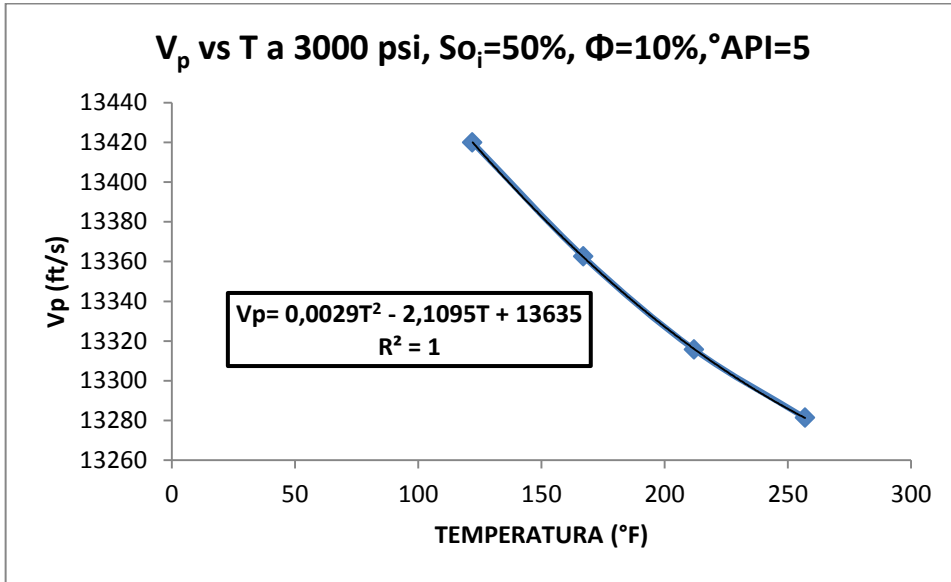
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 21. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=50\%$ , 2500 PSI**



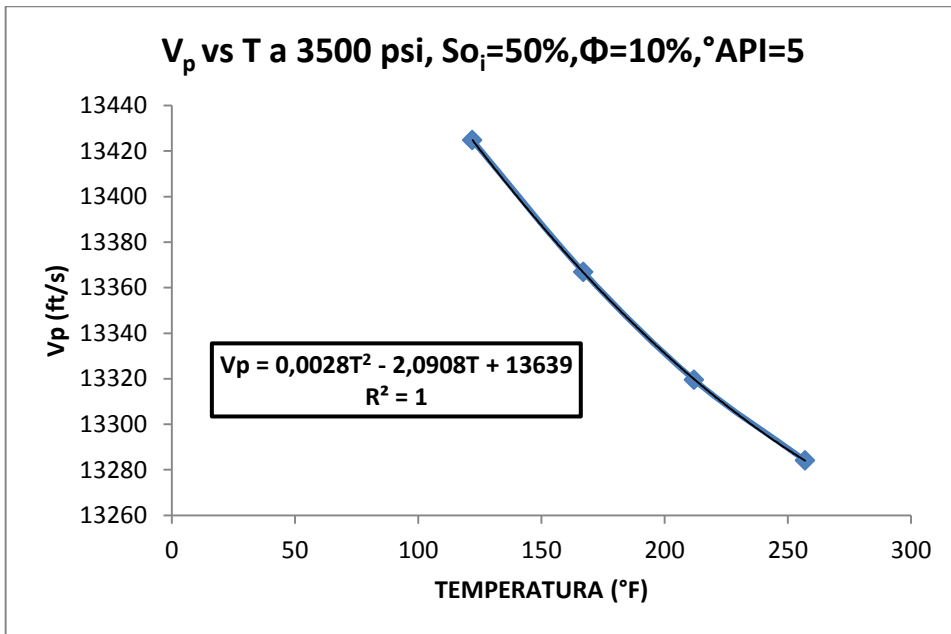
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 22. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=50\%$ , 3000 PSI**



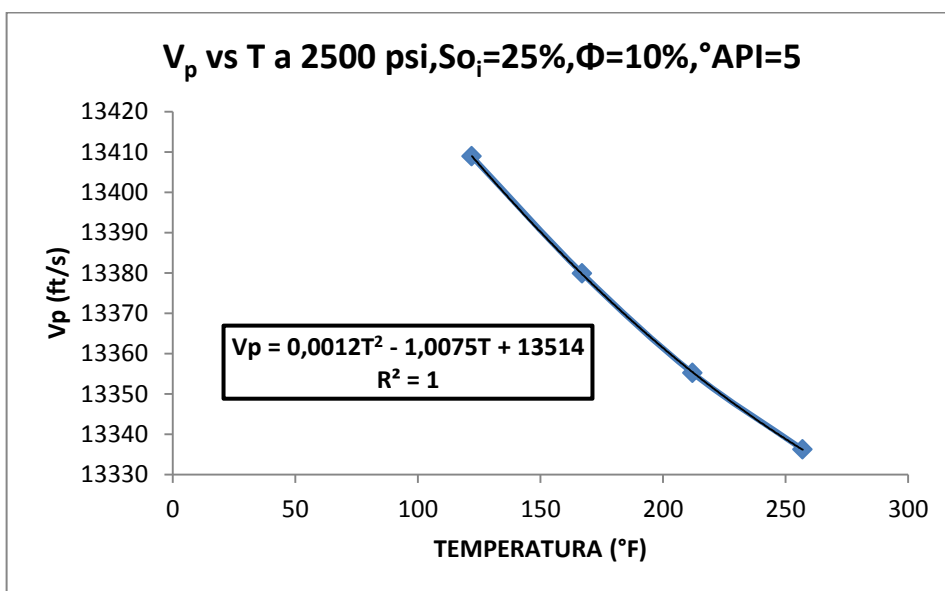
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 23. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=50\%$ , 3500 PSI**



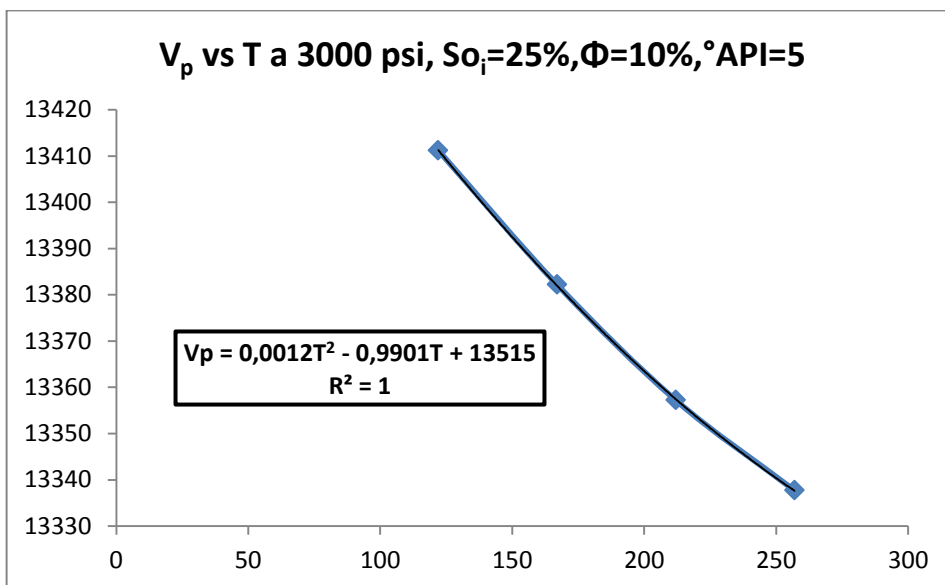
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 24. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=25\%$ , 2500 PSI**



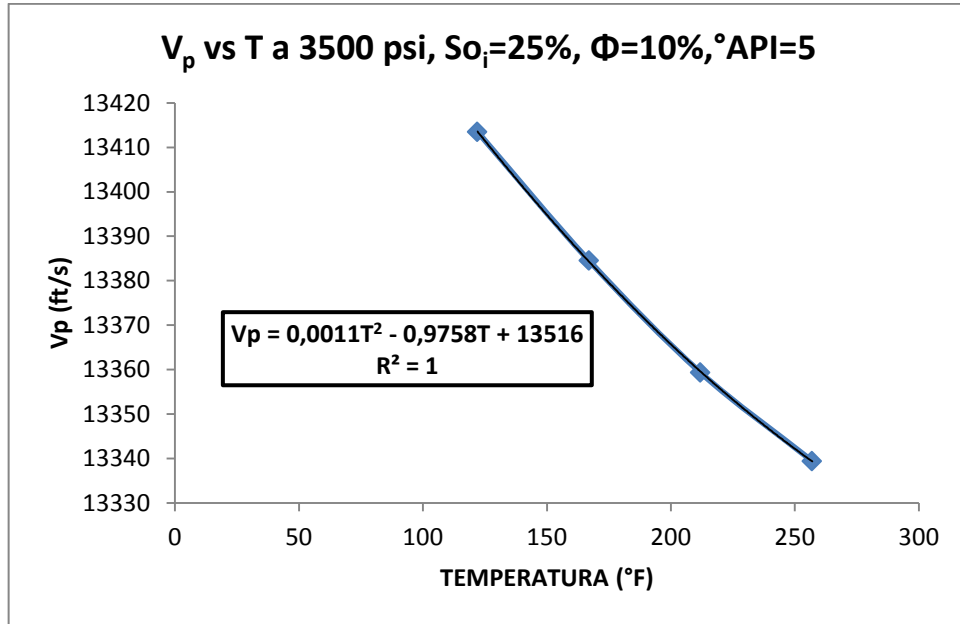
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 25. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=25\%$ , 3000 PSI**



**FUENTE: Los Autores.**

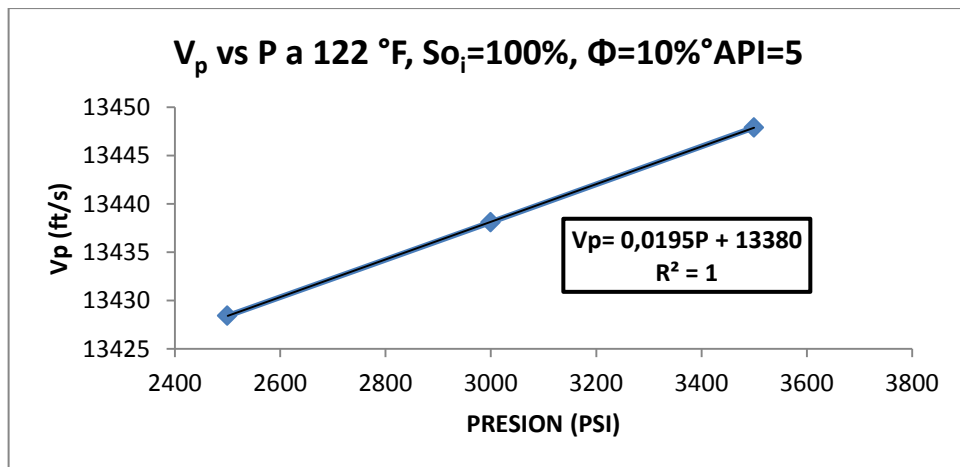
**Figura 26. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=25\%$ , 3500 PSI**



**FUENTE: Los Autores.**

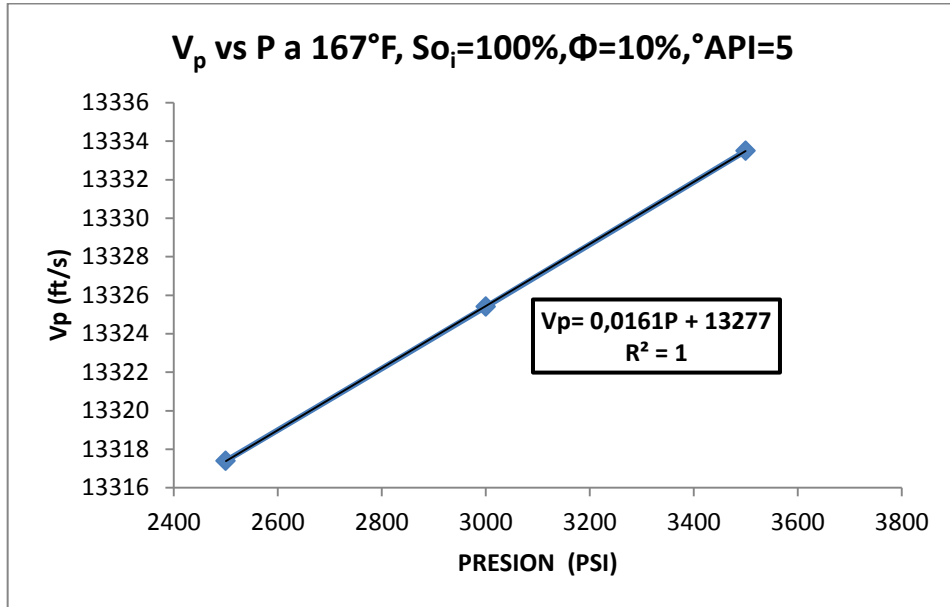
**4.1.2 ONDA COMPRESIONAL CONTRA PRESION A DISTINTAS TEMPERATURAS, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE ACEITE**

**Figura 27. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=100\%$ , 122°F**



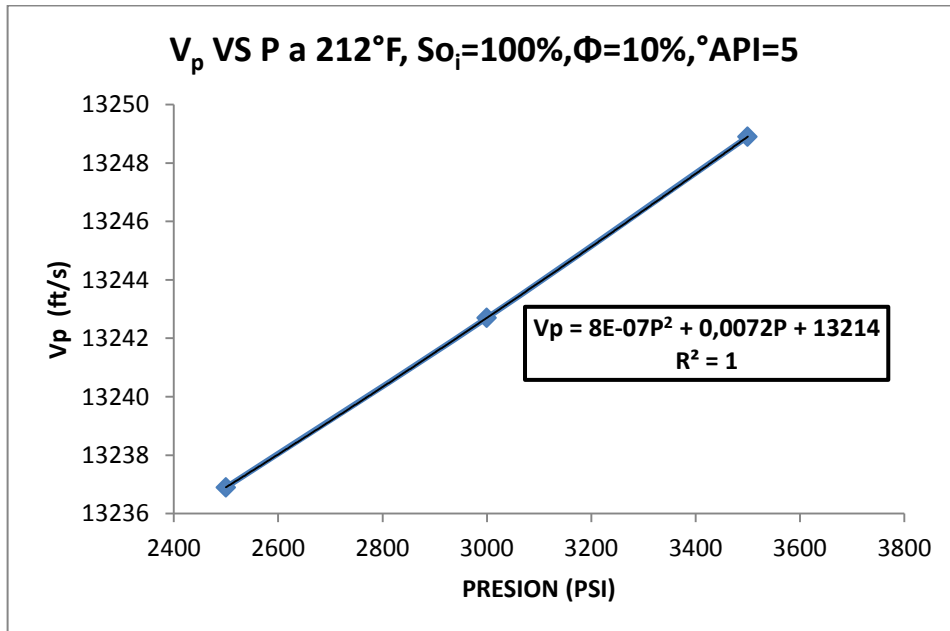
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 28. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=100\%$ ,  $167^\circ\text{F}$**



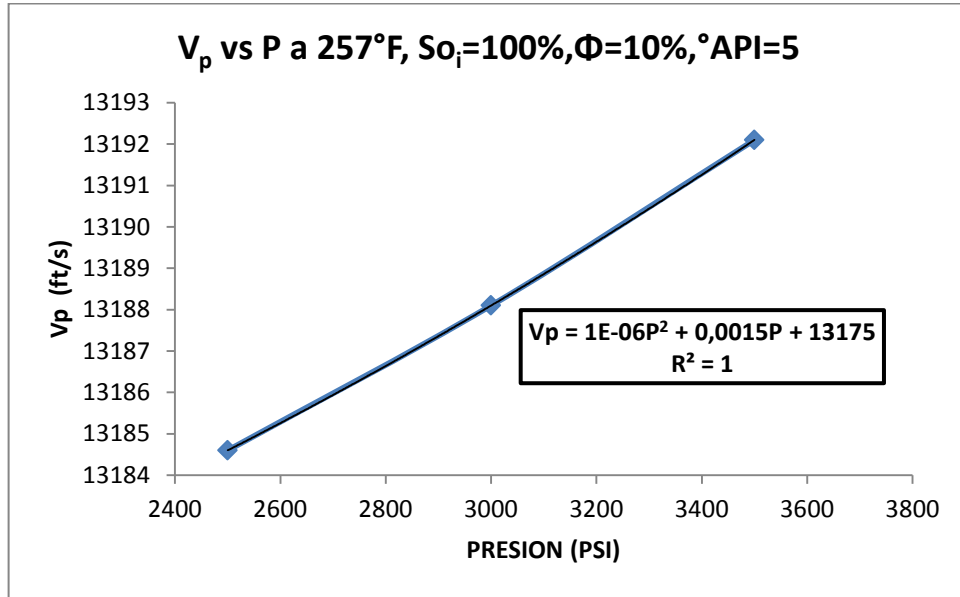
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 29. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=100\%$ ,  $212^\circ\text{F}$**



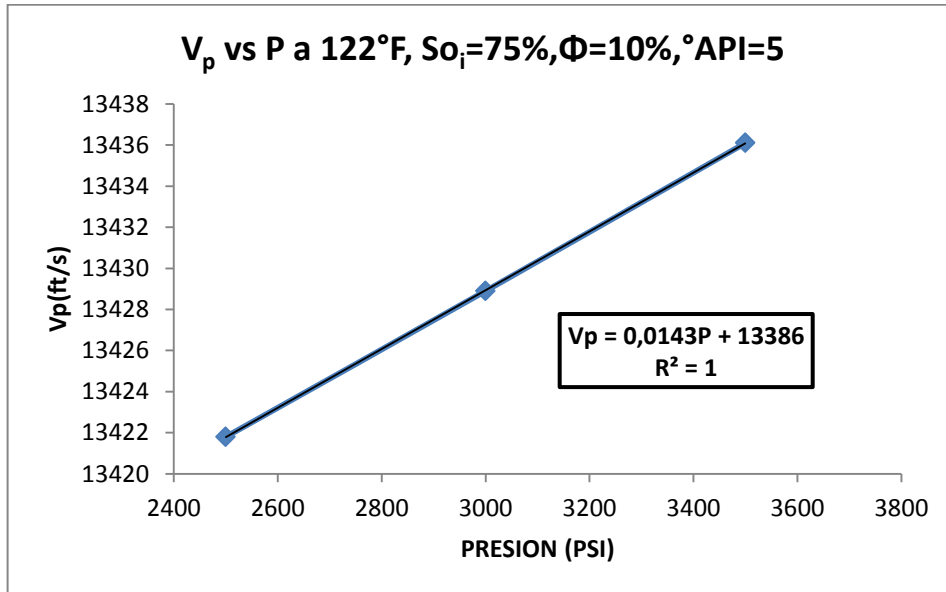
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 30. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=100\%$ ,  $257^\circ\text{F}$**



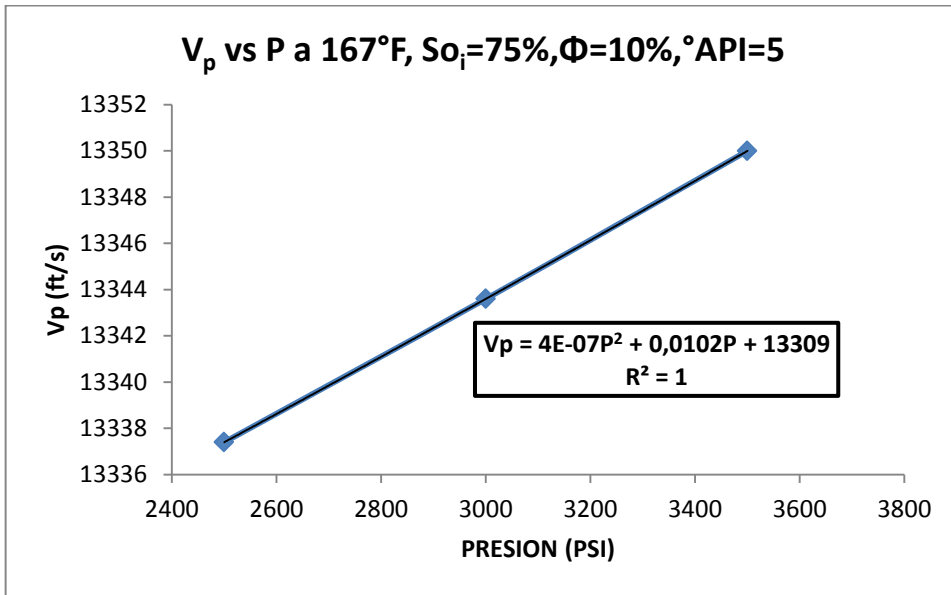
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 31. . Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=75\%$ ,  $122^\circ\text{F}$**



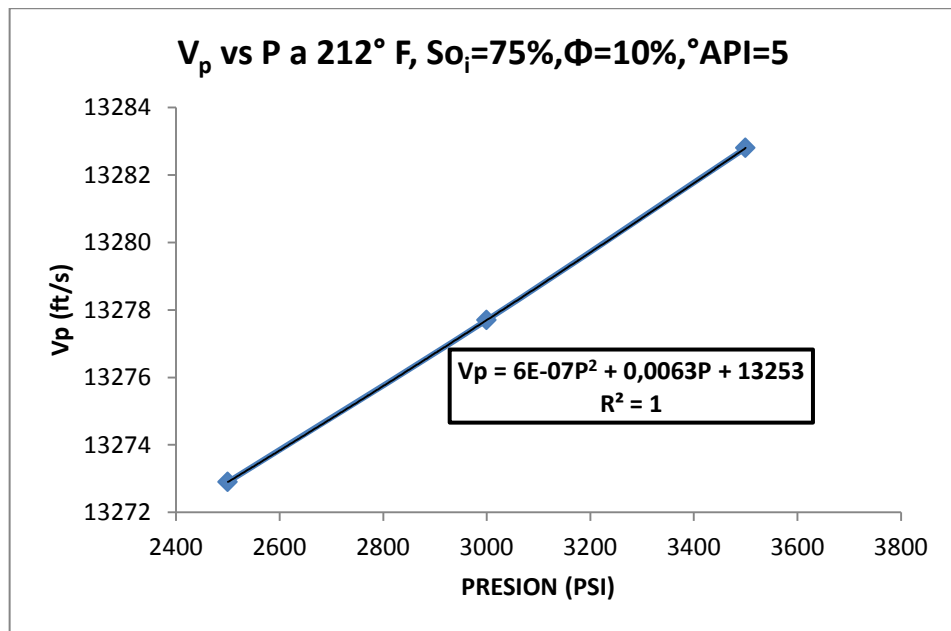
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 32. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $167^{\circ}F$**



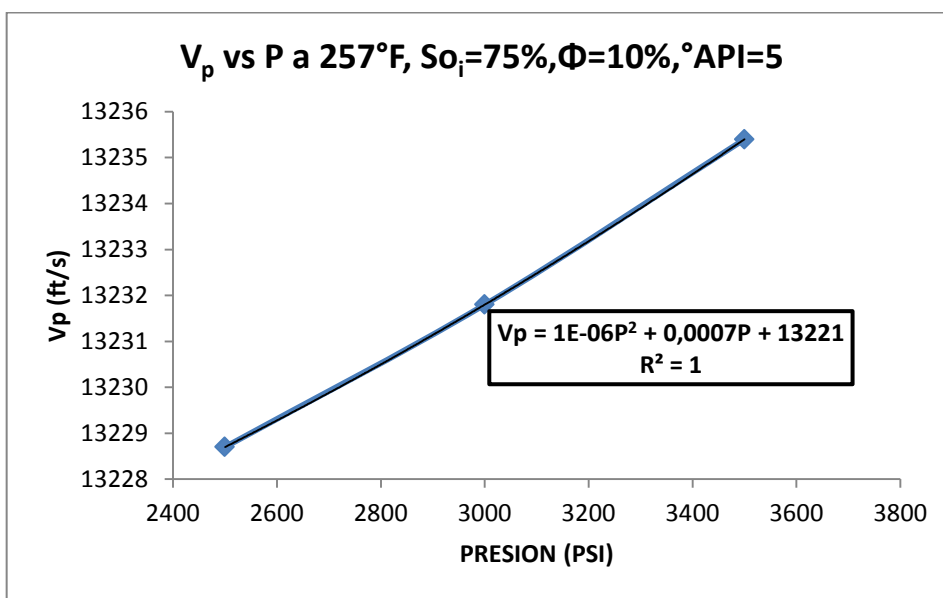
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 33. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $212^{\circ}F$**



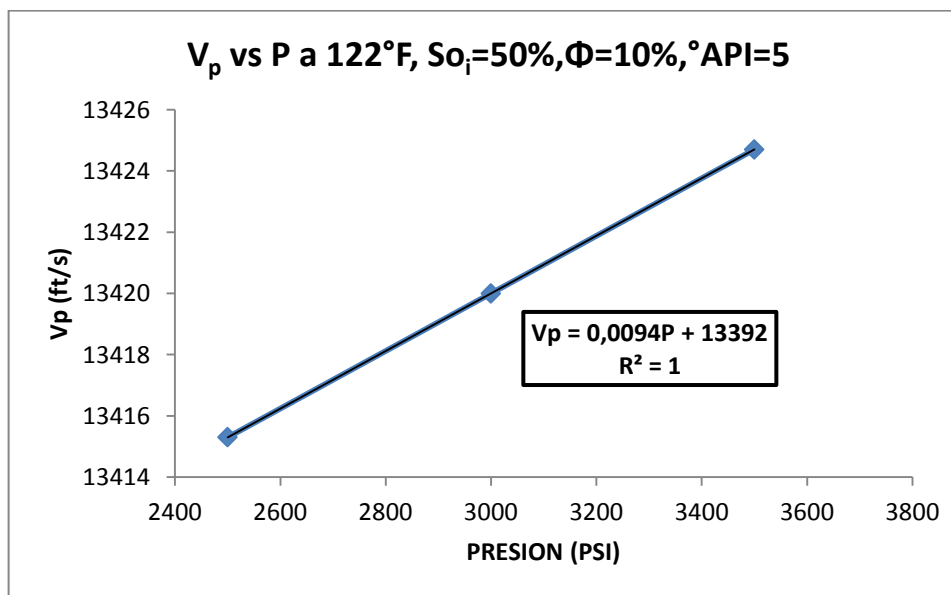
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 34. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $257^{\circ}\text{F}$**



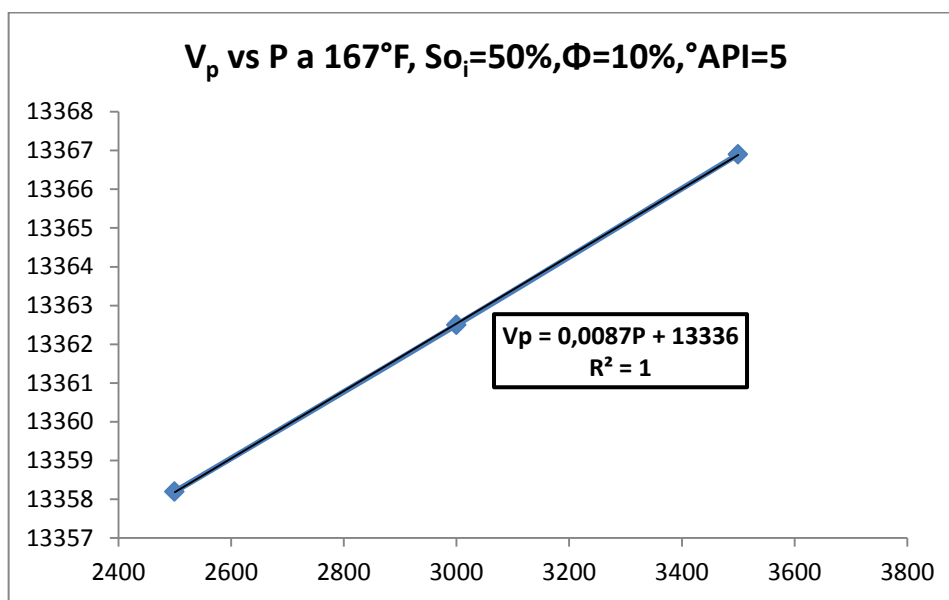
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 35. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $122^{\circ}\text{F}$**



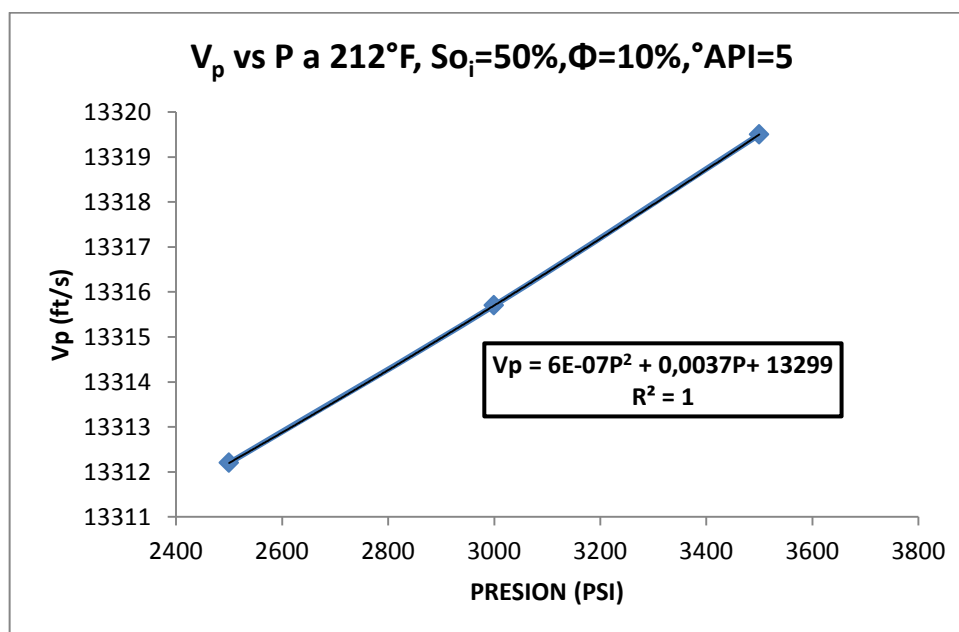
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 36. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $167^{\circ}F$**



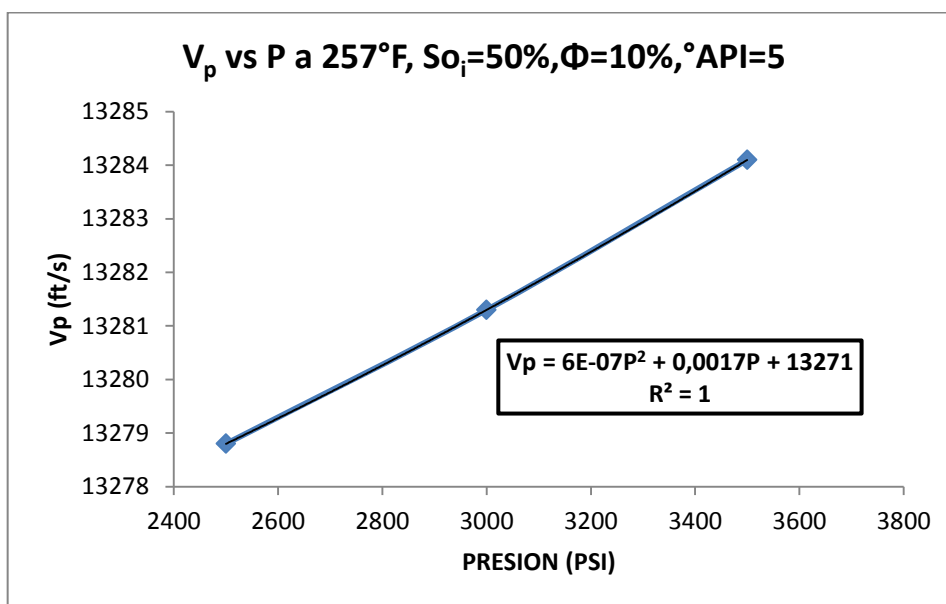
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 37. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $212^{\circ}F$**



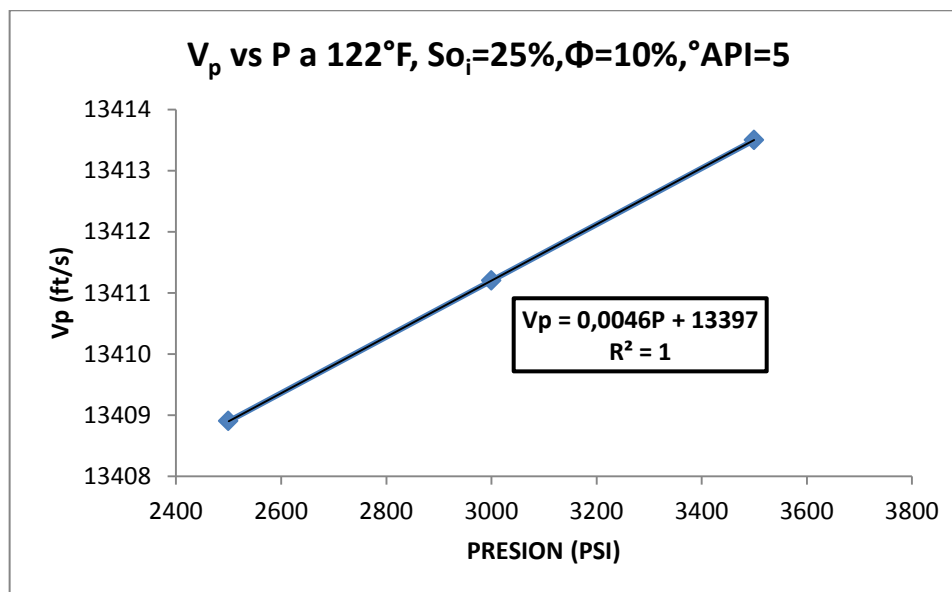
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 38. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $257^{\circ}\text{F}$**



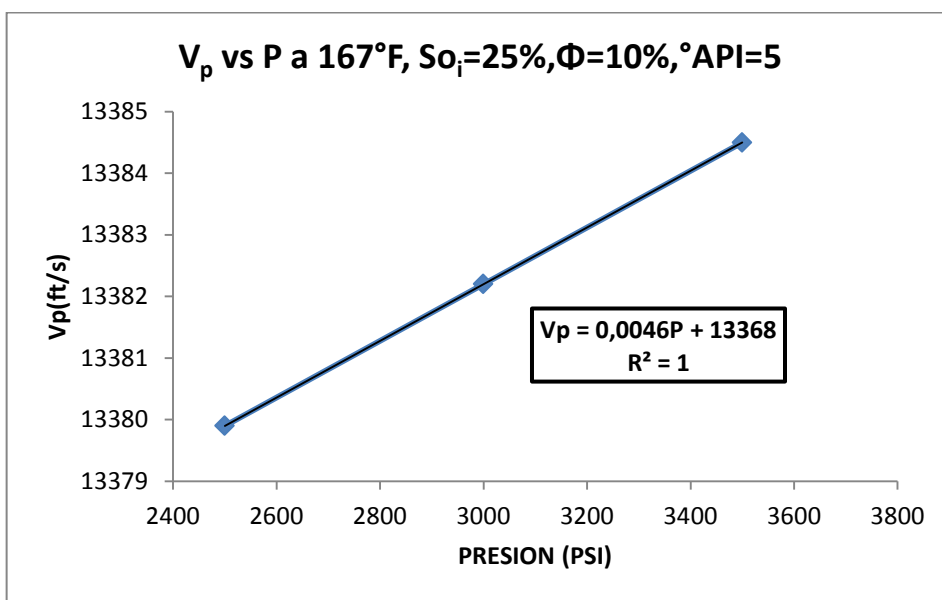
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 39. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $122^{\circ}\text{F}$**



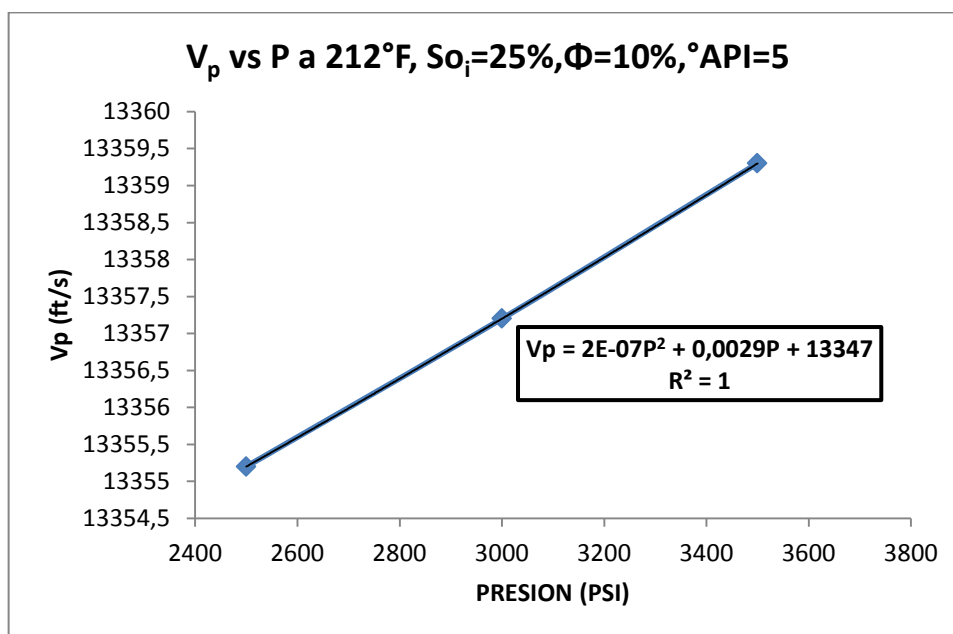
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 40. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_o_i=25\%$ ,  $167^\circ F$**



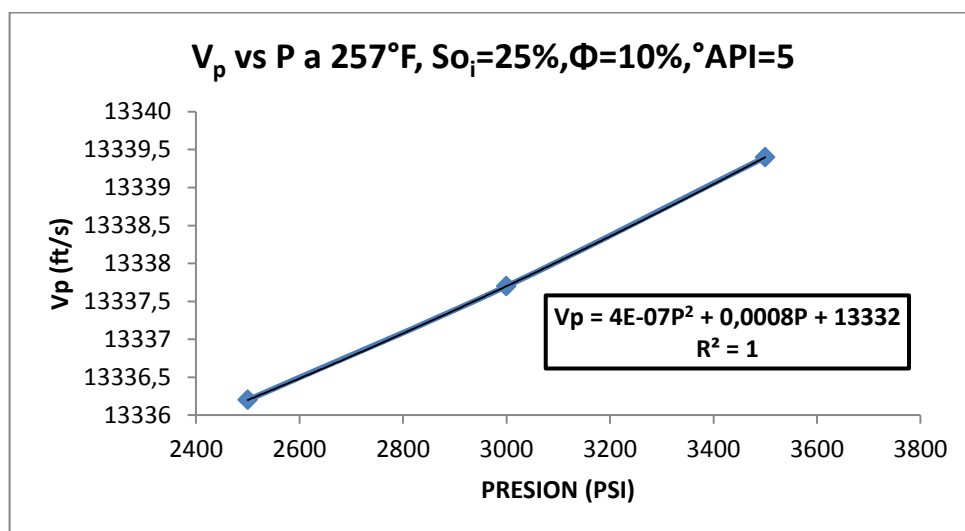
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 41. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_o_i=25\%$ ,  $212^\circ F$**



**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 42. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $257^{\circ}F$**

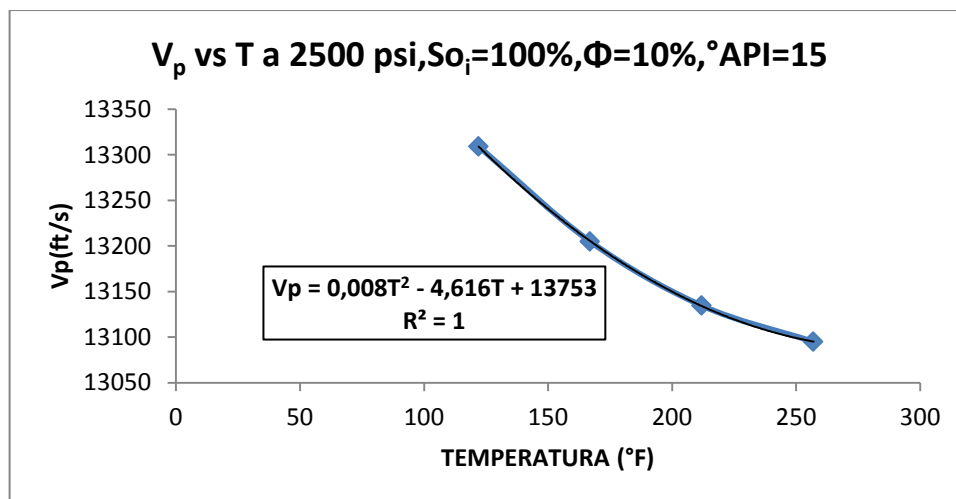


**FUENTE: Los Autores.**

## 4.2 CASO 2: POROSIDAD DEL 10% Y PETROLEO DE $15^{\circ}API$

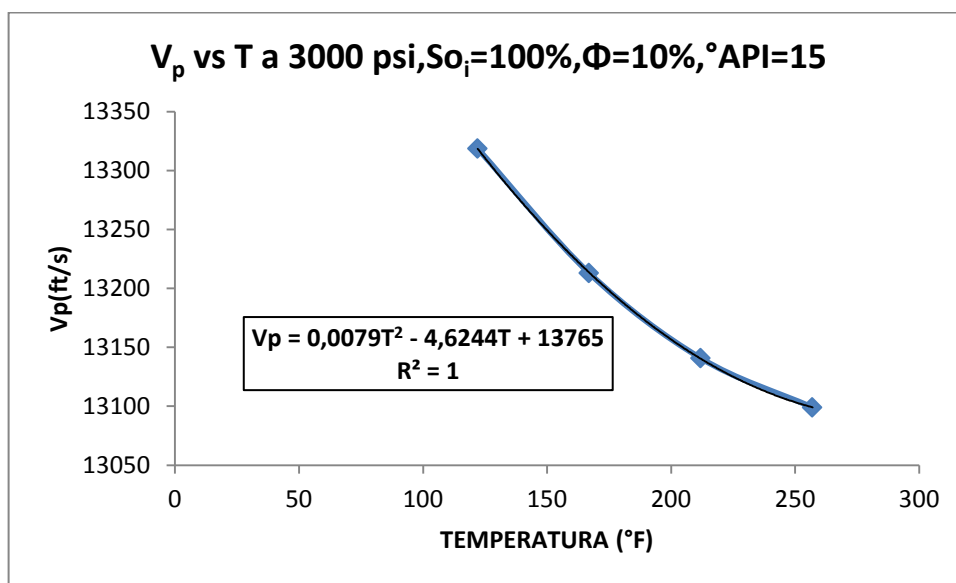
### 4.2.1 ONDA COMPRESIONAL CONTRA TEMPERATURA A DISTINTAS PRESIONES, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE ACEITE

**Figura 43. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=100\%$ ,  $2500$  psi**



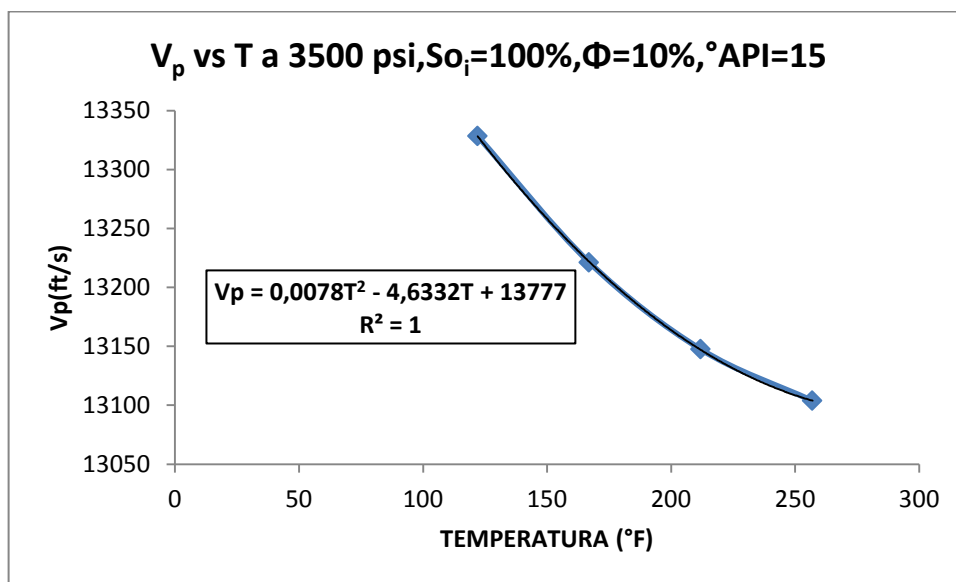
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 44. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=100\%$ , 3000 psi**



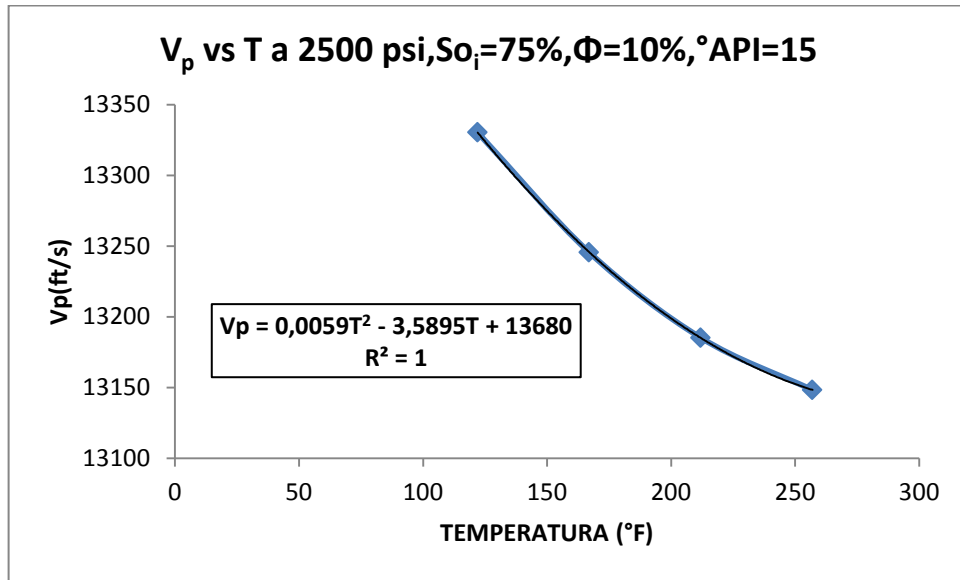
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 45. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=100\%$ , 3500 psi**



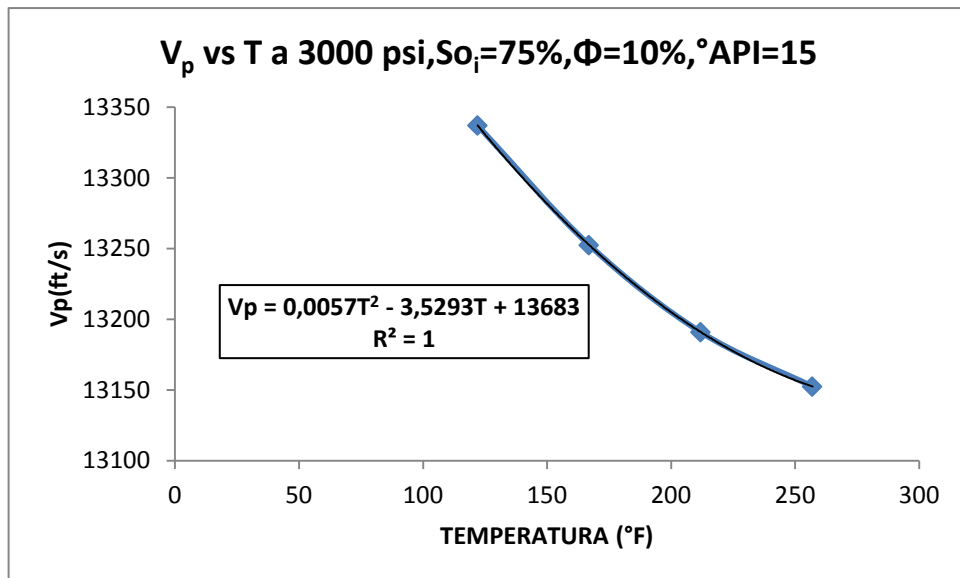
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 46. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o_i=75\%$ , 2500 psi**



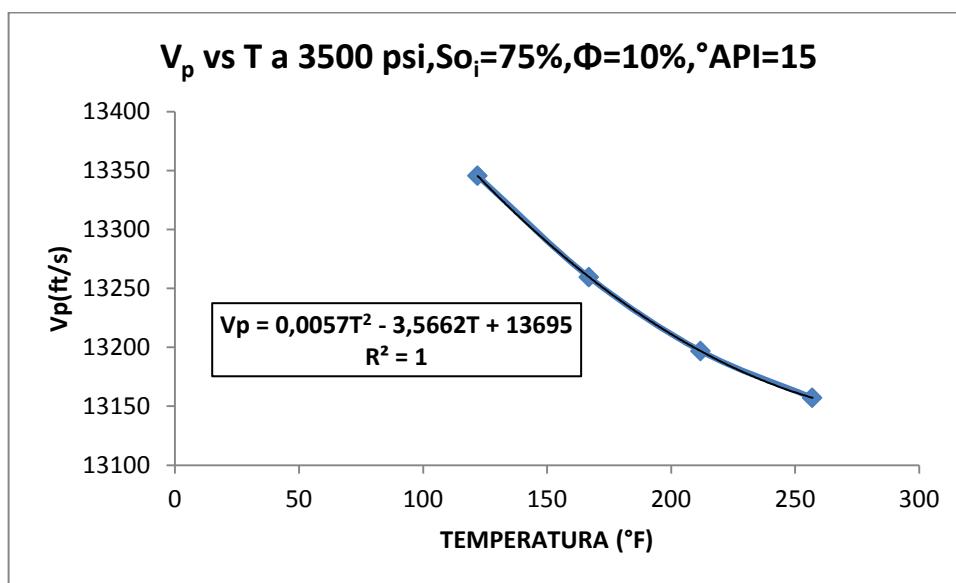
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 47. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o_i=75\%$ , 3000 psi**



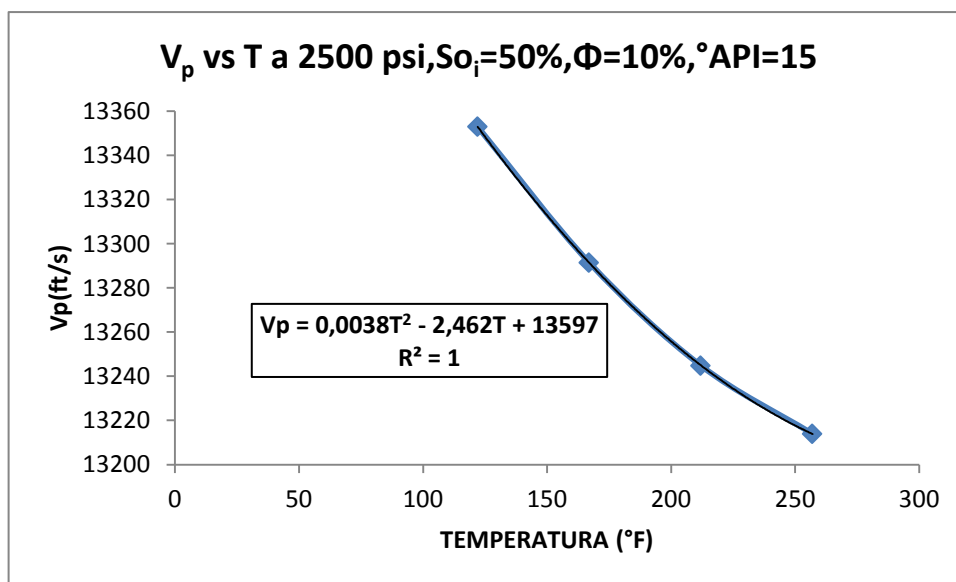
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 48. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=75\%$ , 3500 psi**



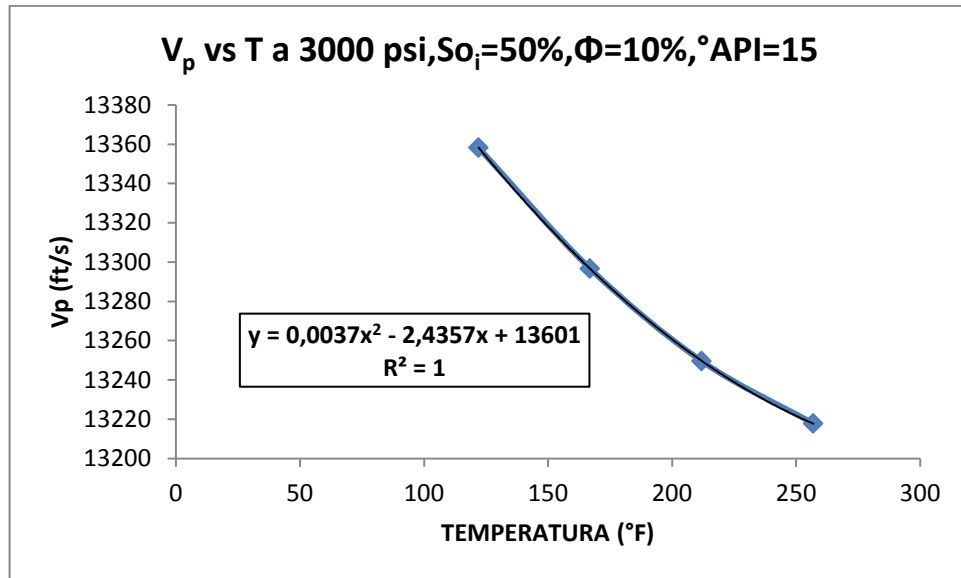
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 49. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=50\%$ , 2500 psi**



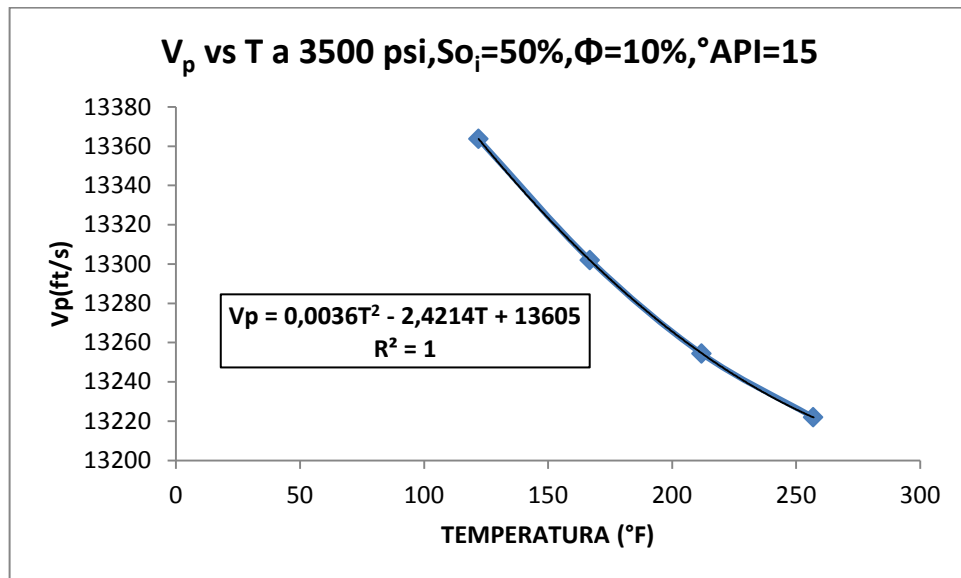
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 50. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o_i=50\%$ , 3000 psi**



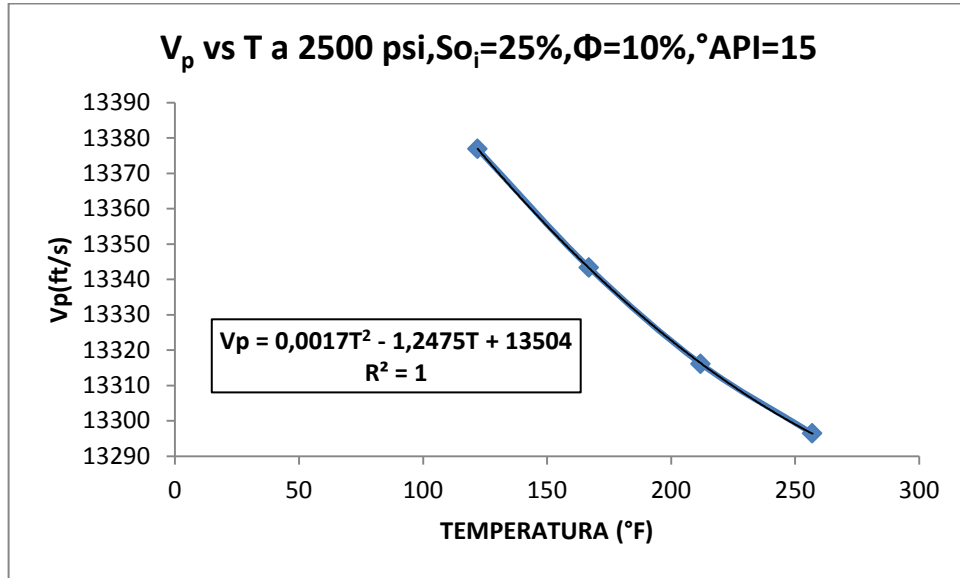
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 51. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o_i=50\%$ , 3500 psi**



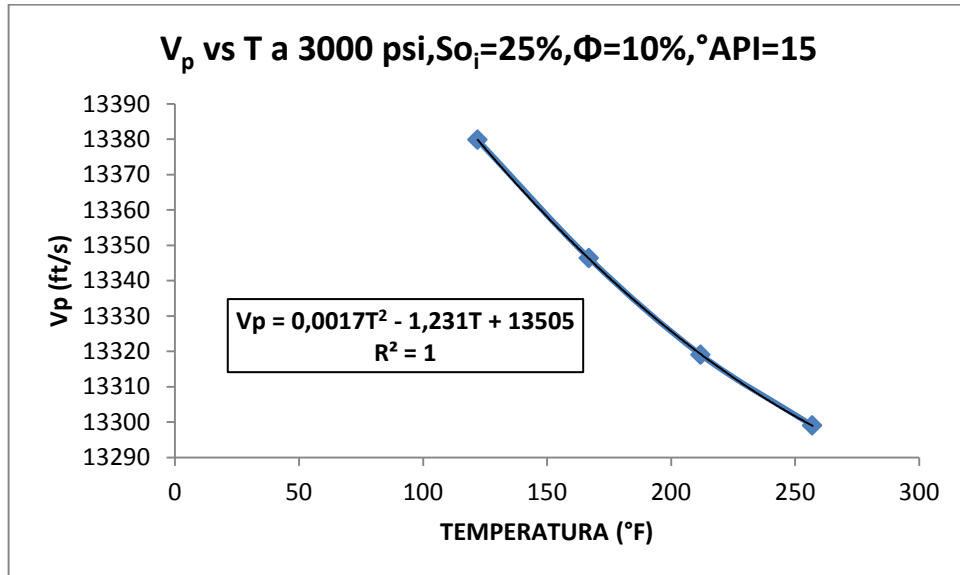
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 52. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=25\%$ , 2500 psi**



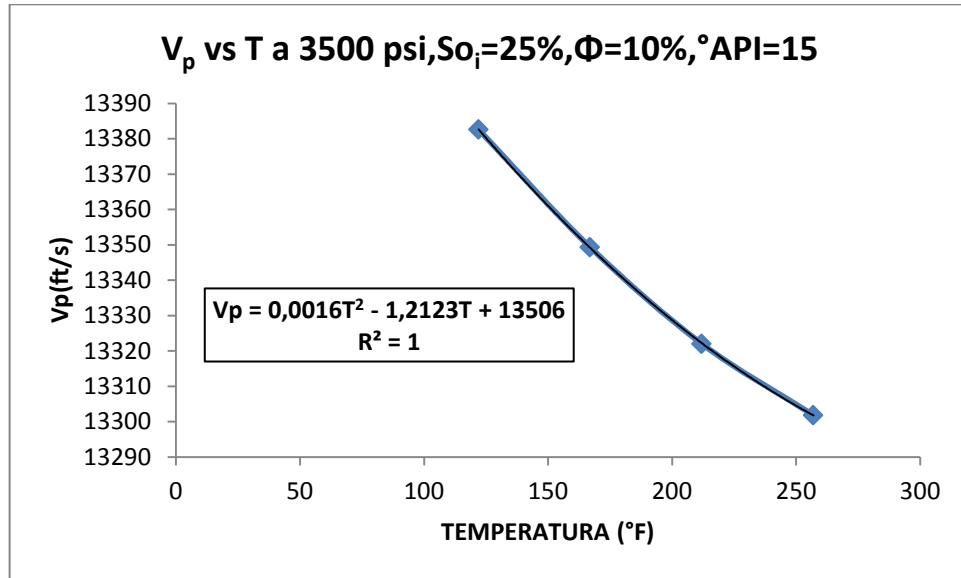
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 53. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=25\%$ , 3000 psi**



**FUENTE: Los Autores.**

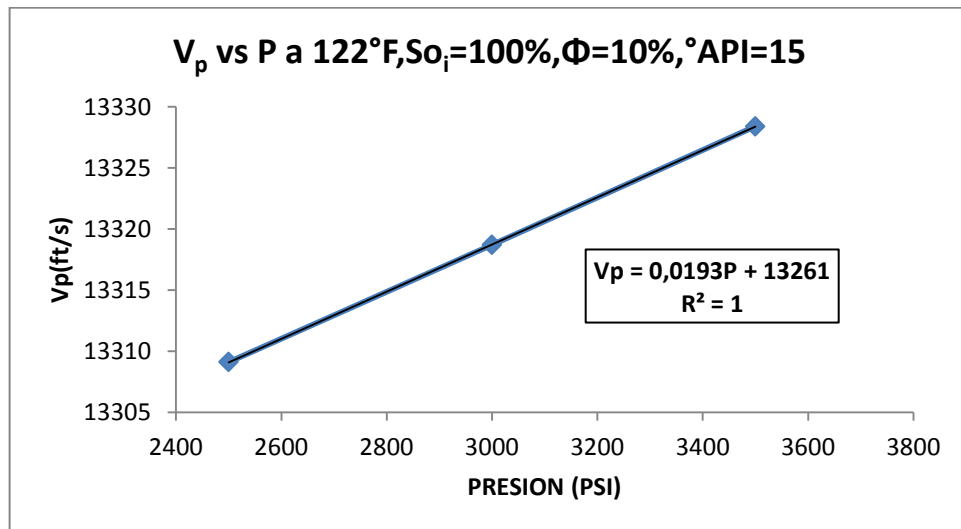
**Figura 54. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=25\%$ , 3500 psi**



**FUENTE: Los Autores.**

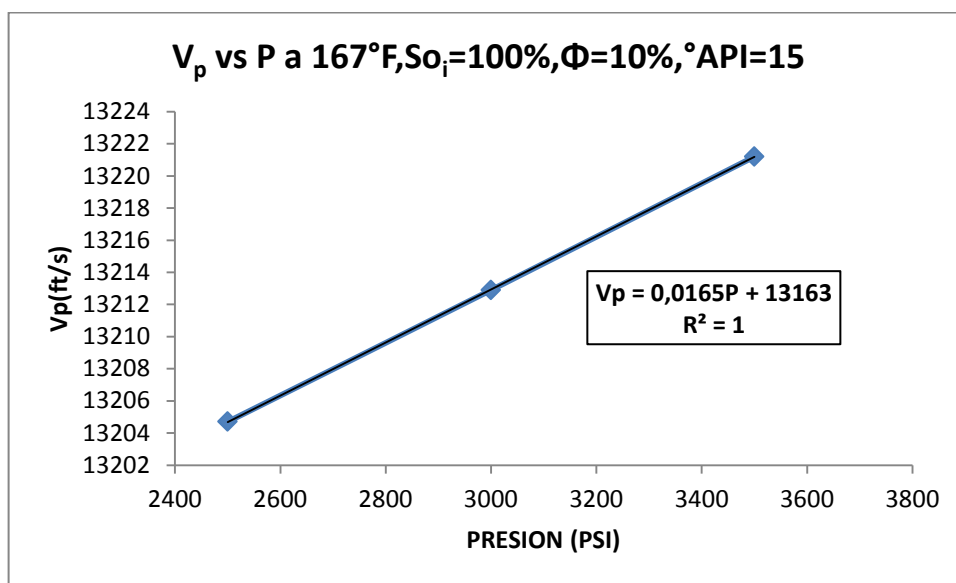
#### **4.2.2 ONDA COMPRESIONAL CONTRA PRESION A DISTINTAS TEMPERATURAS, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE PETROLEO**

**Figura 55. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=100\%$ ,  $122^{\circ}\text{F}$**



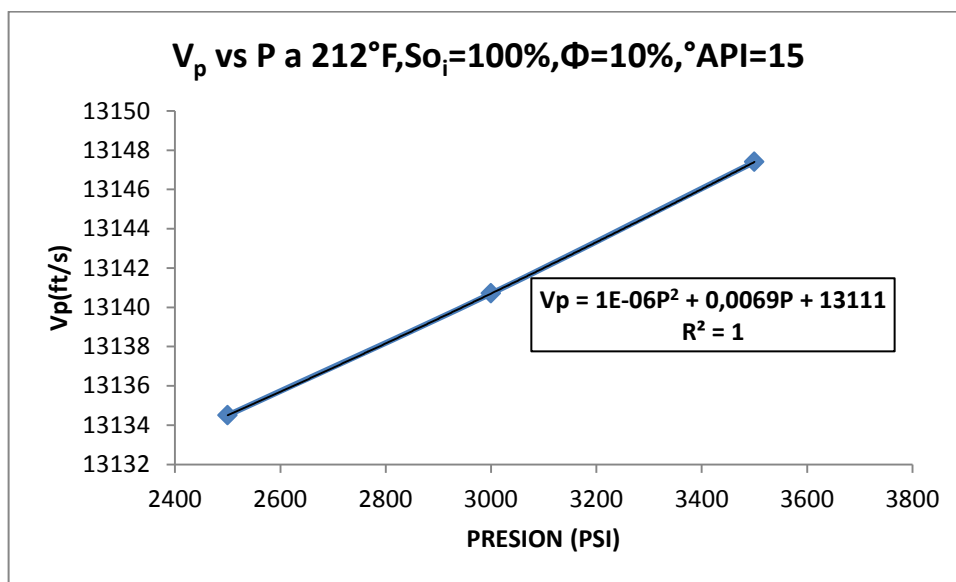
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 56. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=100\%$ ,  $167^\circ\text{F}$**



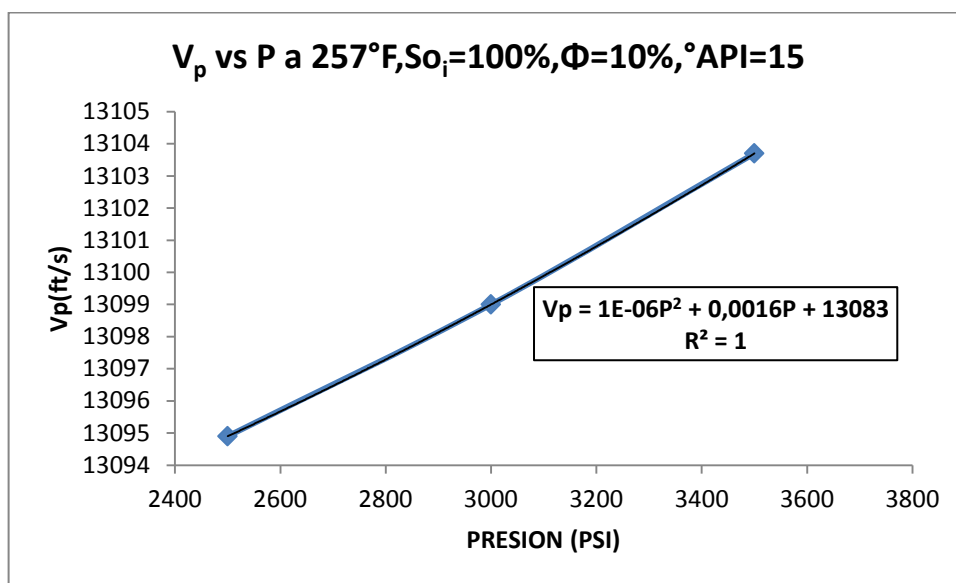
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 57. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=100\%$ ,  $212^\circ\text{F}$**



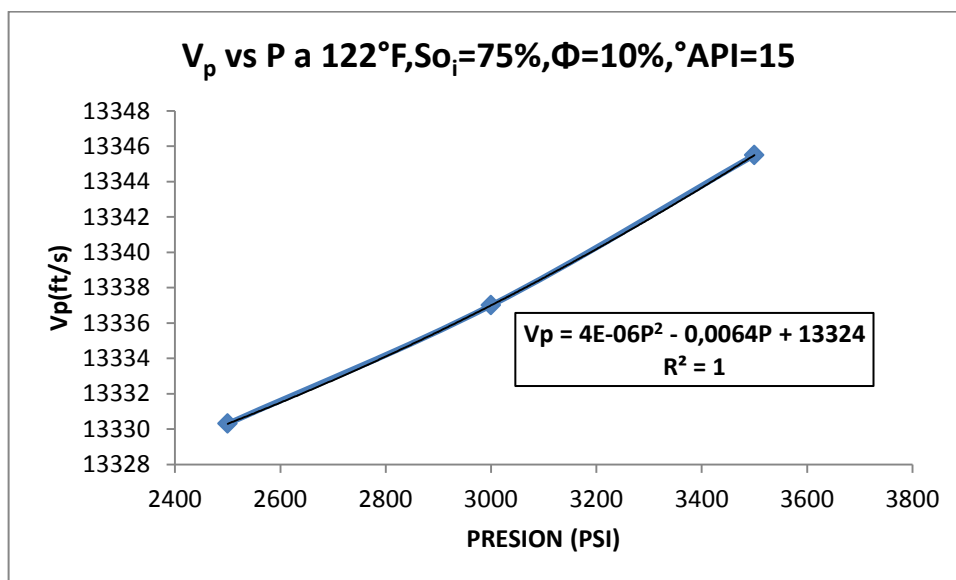
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 58. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=100\%$ ,  $257^\circ\text{F}$**



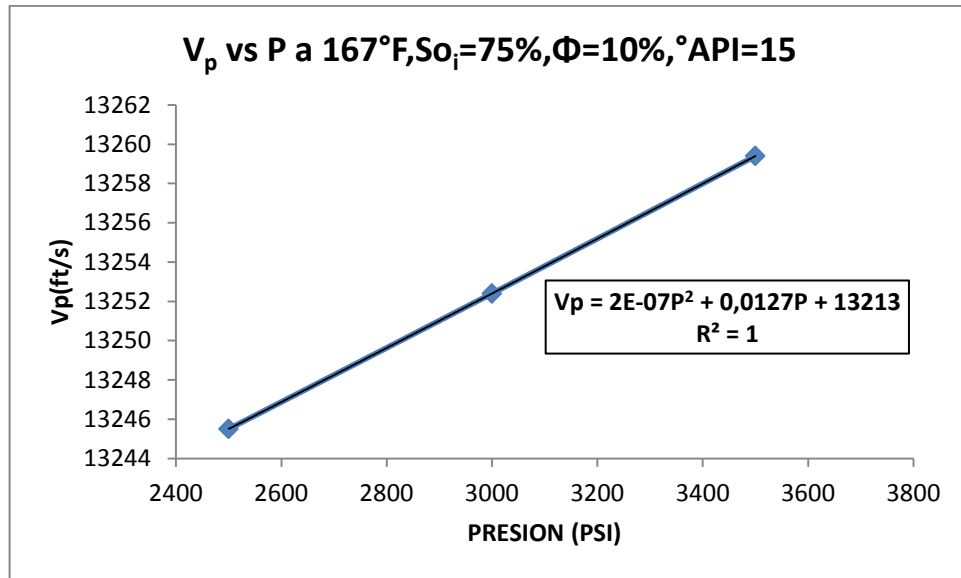
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 59. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=75\%$ ,  $122^\circ\text{F}$**



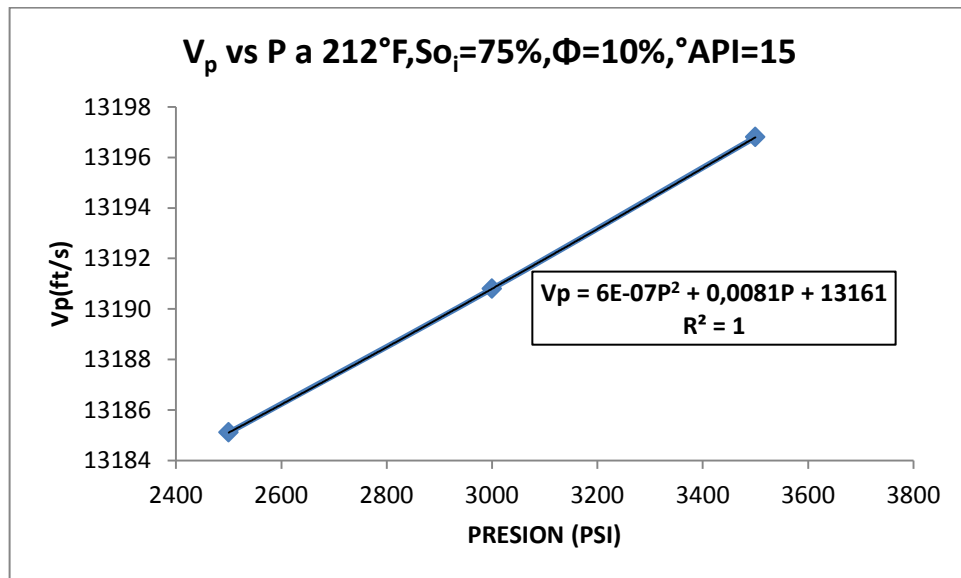
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 60. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $167^{\circ}\text{F}$**



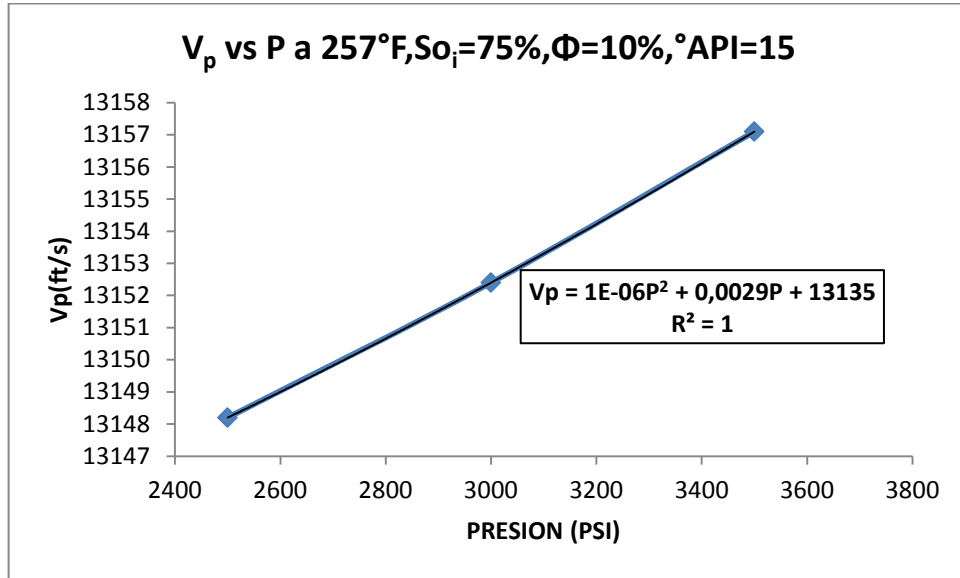
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 61. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $212^{\circ}\text{F}$**



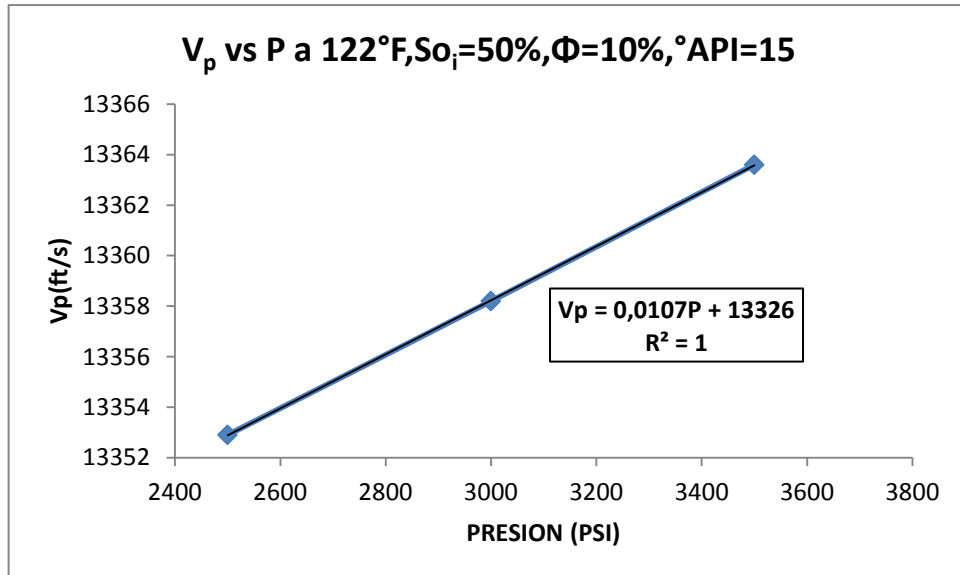
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 62. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $257^{\circ}F$**



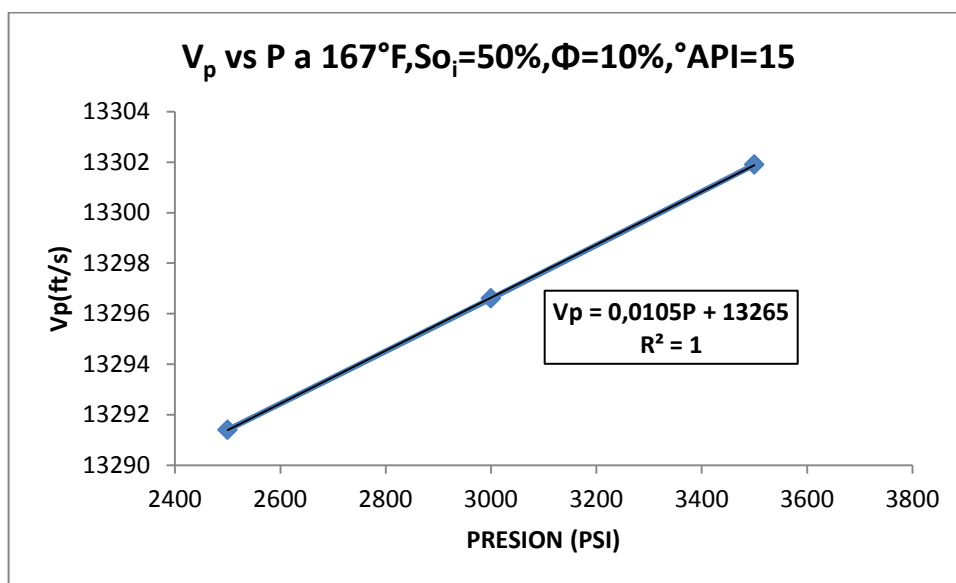
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 63. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $122^{\circ}F$**



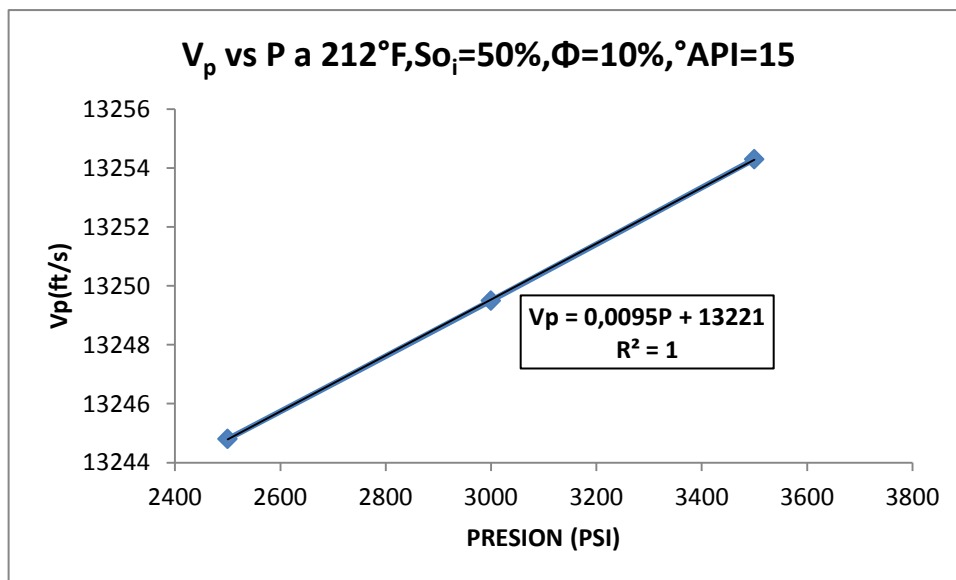
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 64. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $167^{\circ}F$**



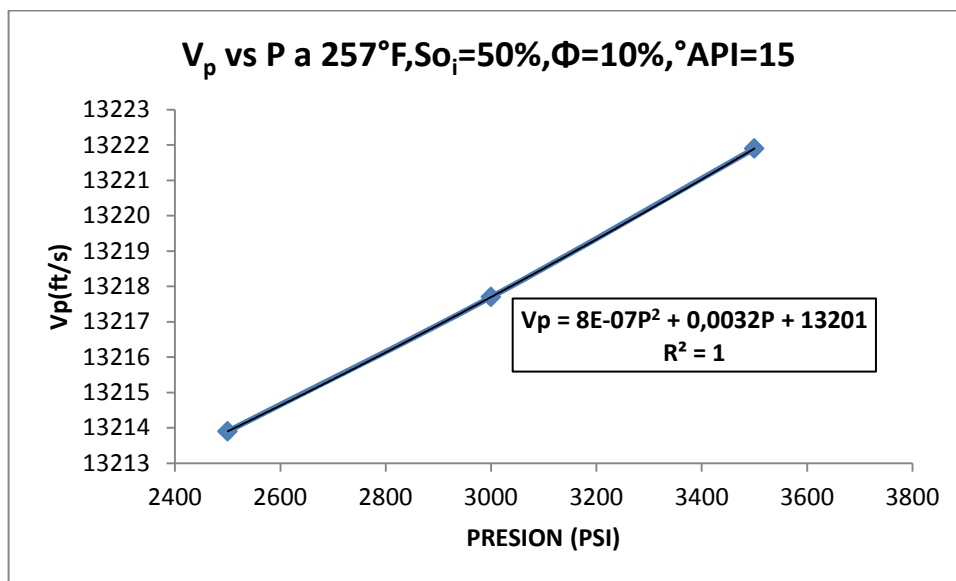
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 65. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $212^{\circ}F$**



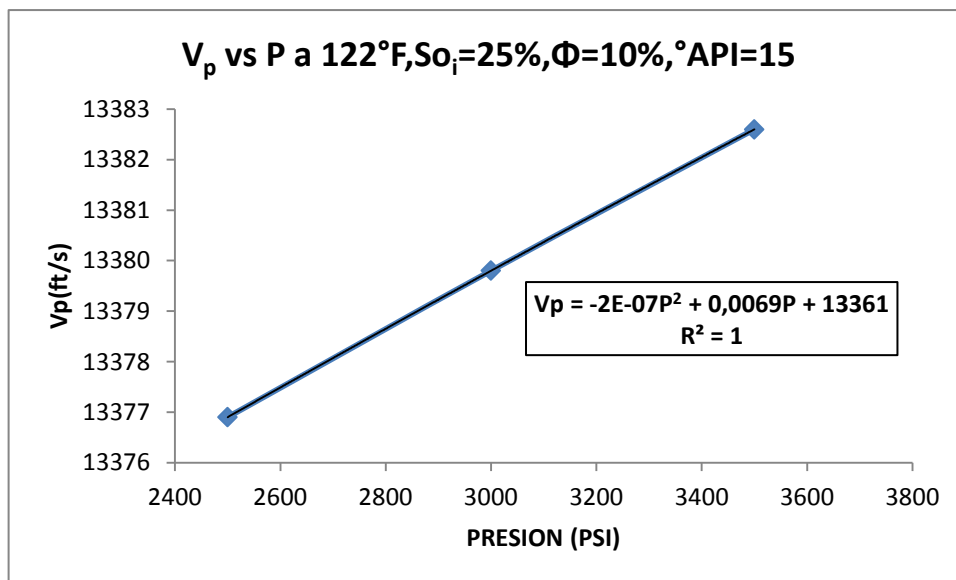
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 66. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $257^{\circ}F$**



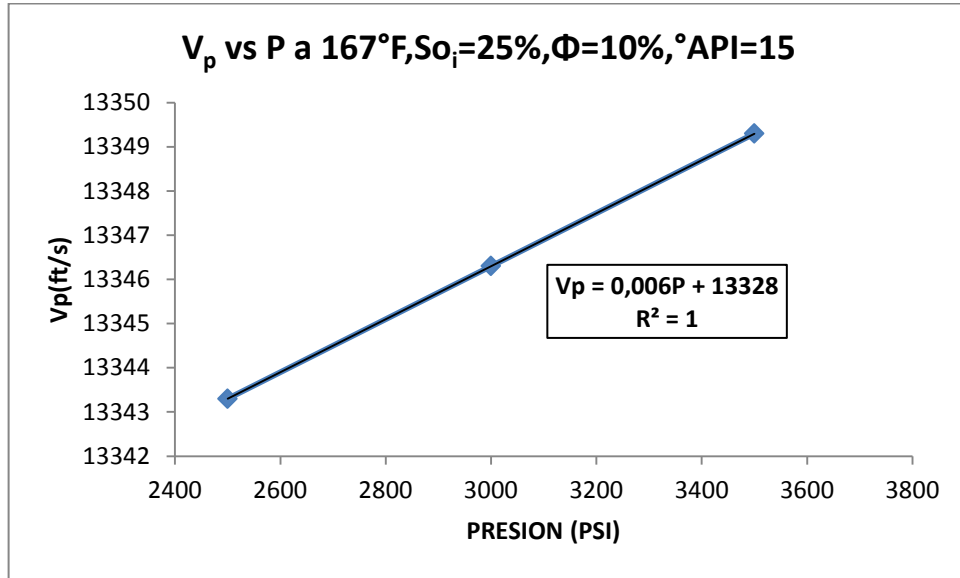
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 67. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $122^{\circ}F$**



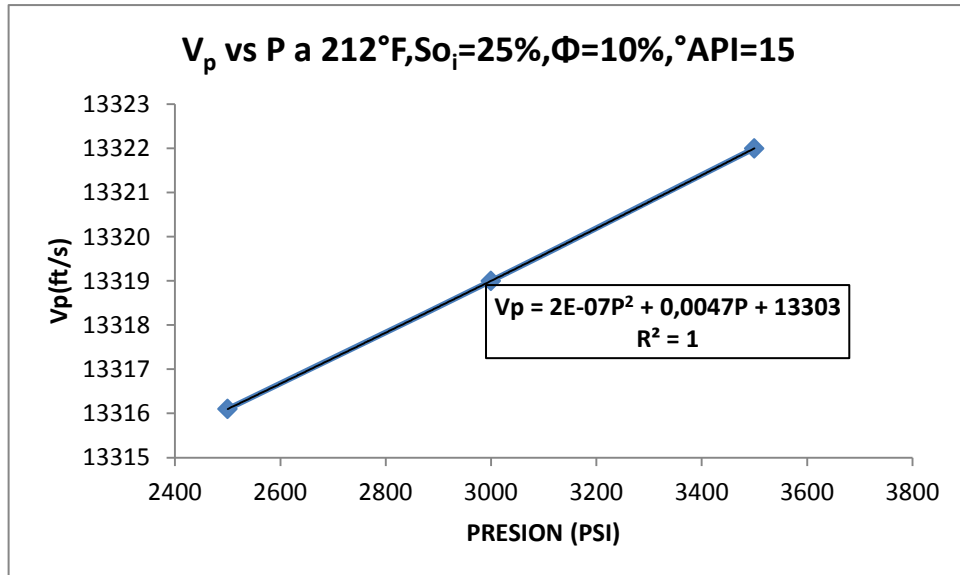
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 68. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_o_i=25\%$ ,  $167^\circ F$**



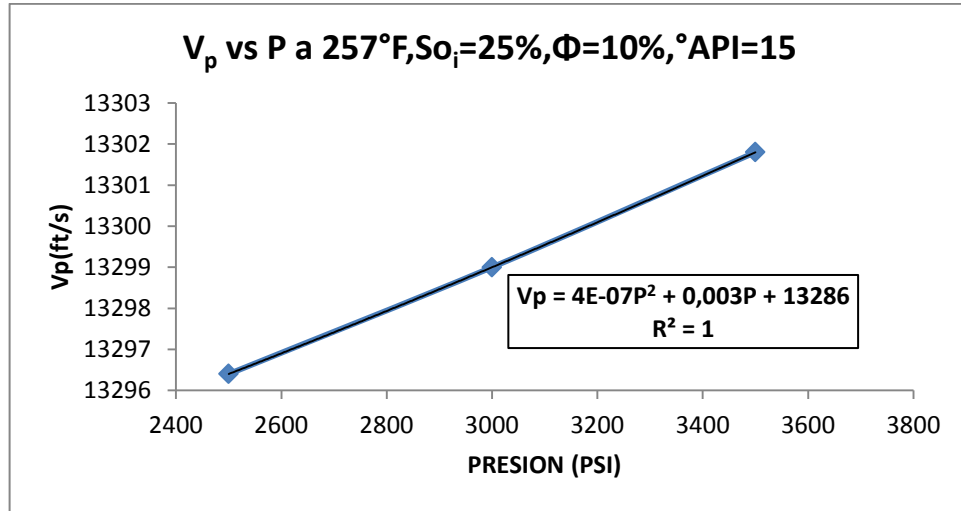
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 69. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_o_i=25\%$ ,  $212^\circ F$**



**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 70. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $257^{\circ}\text{F}$**

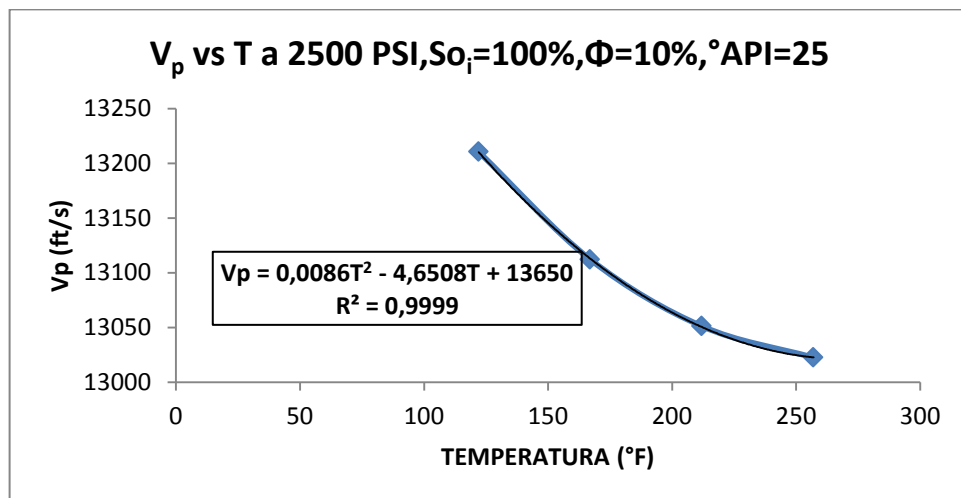


**FUENTE: Los Autores.**

### 4.3 CASO 3: POROSIDAD DEL 10% Y PETROLEO DE $25^{\circ}\text{API}$

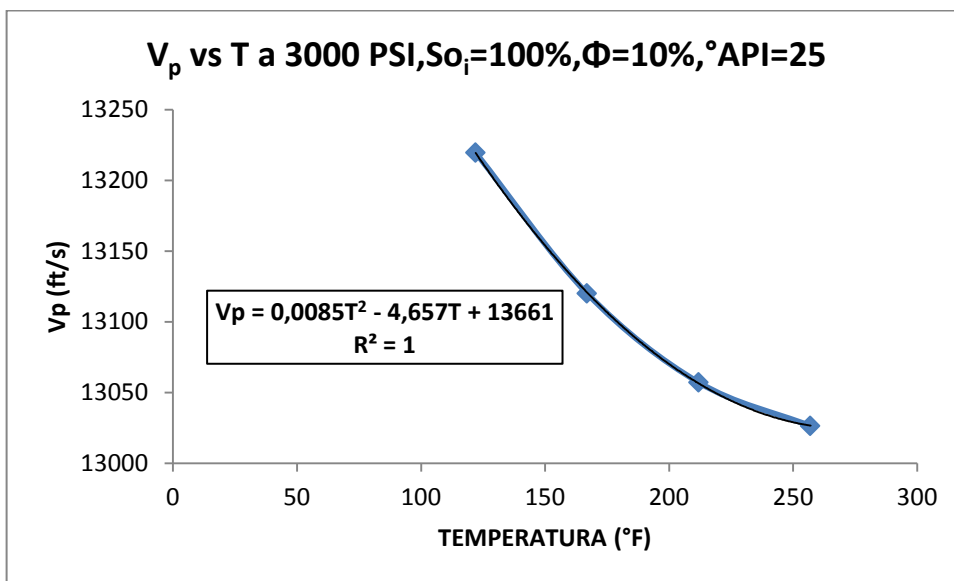
#### 4.3.1 ONDA COMPRESIONAL CONTRA TEMPERATURA A DISTINTAS PRESIONES, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE ACEITE

**Figura 71. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=100\%$ ,  $2500\text{ PSI}$**



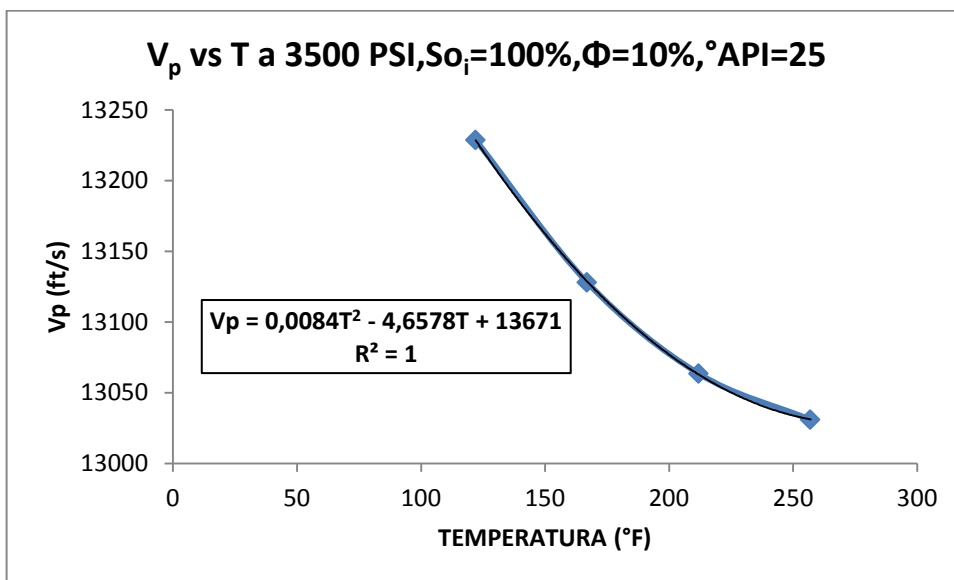
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 72. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=100\%$ , 3000 PSI**



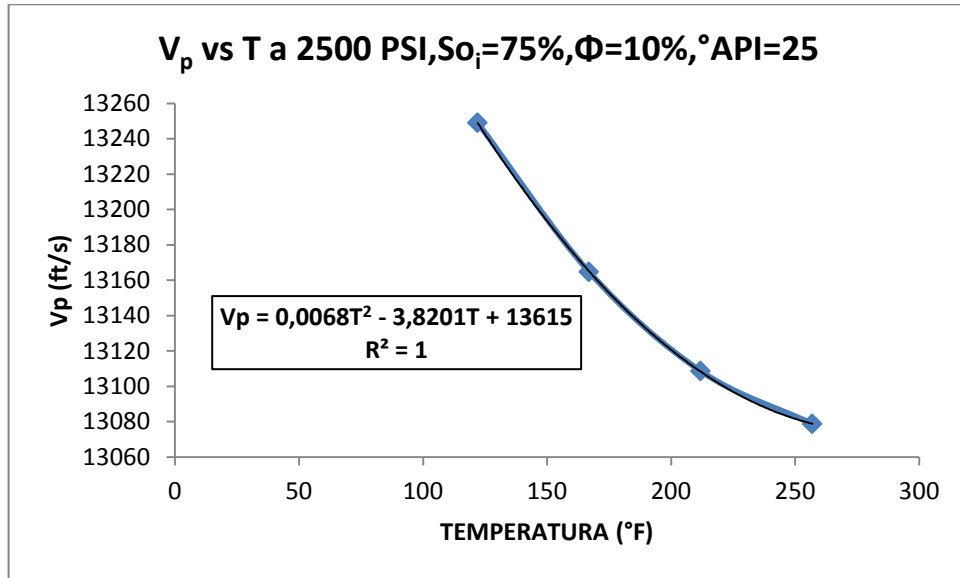
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 73. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=100\%$ , 3500 PSI**



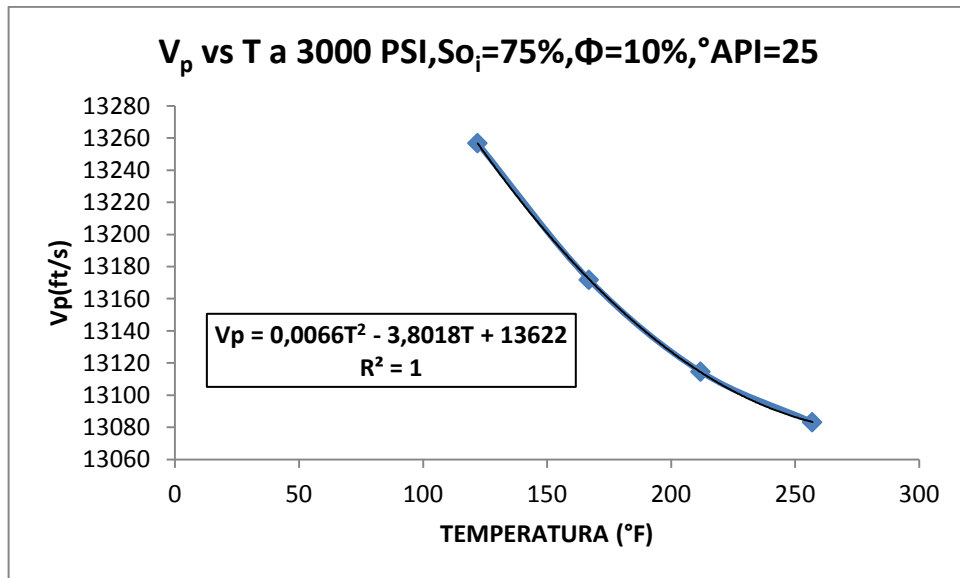
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 74. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=75\%$ , 2500 PSI**



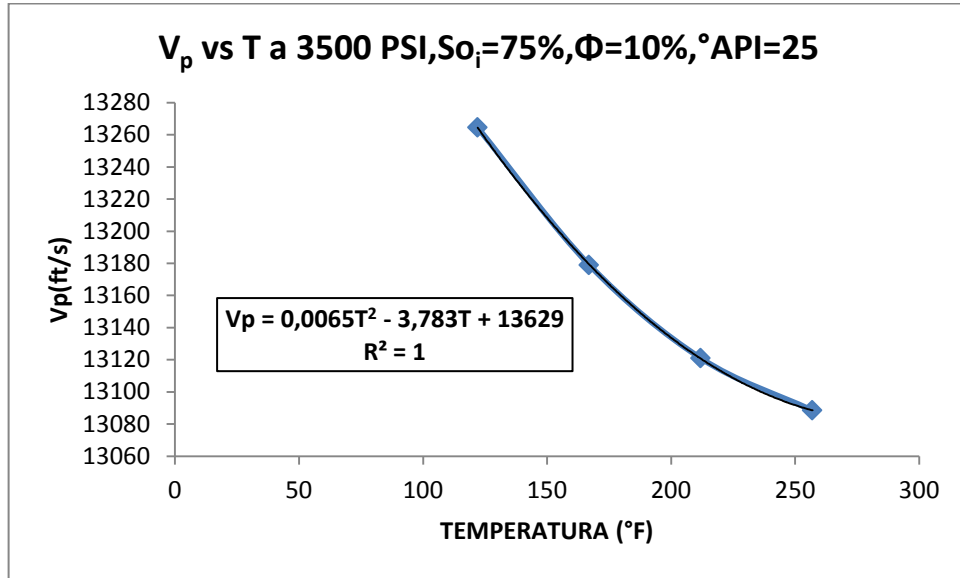
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 75. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=75\%$ , 3000 PSI**



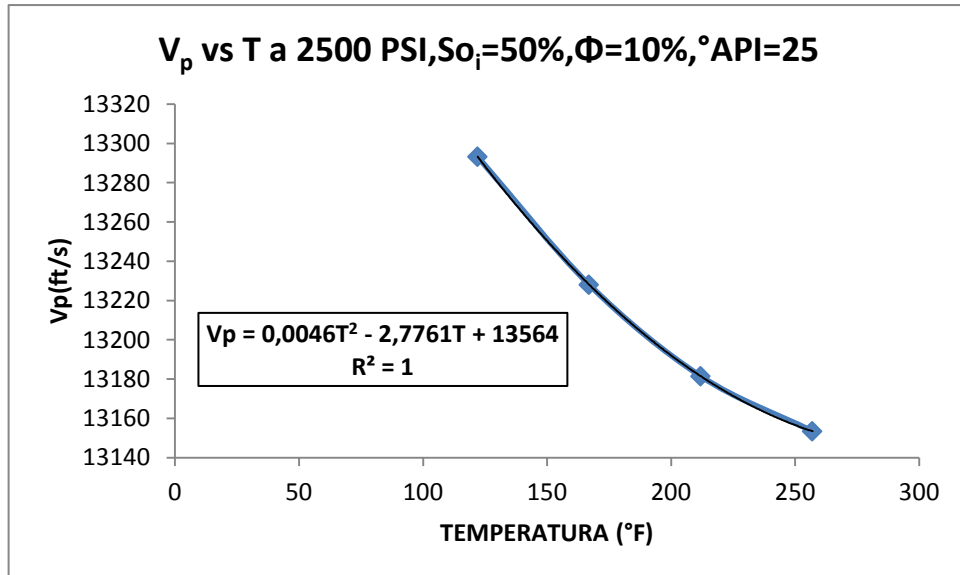
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 76. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=75\%$ , 3500 PSI**



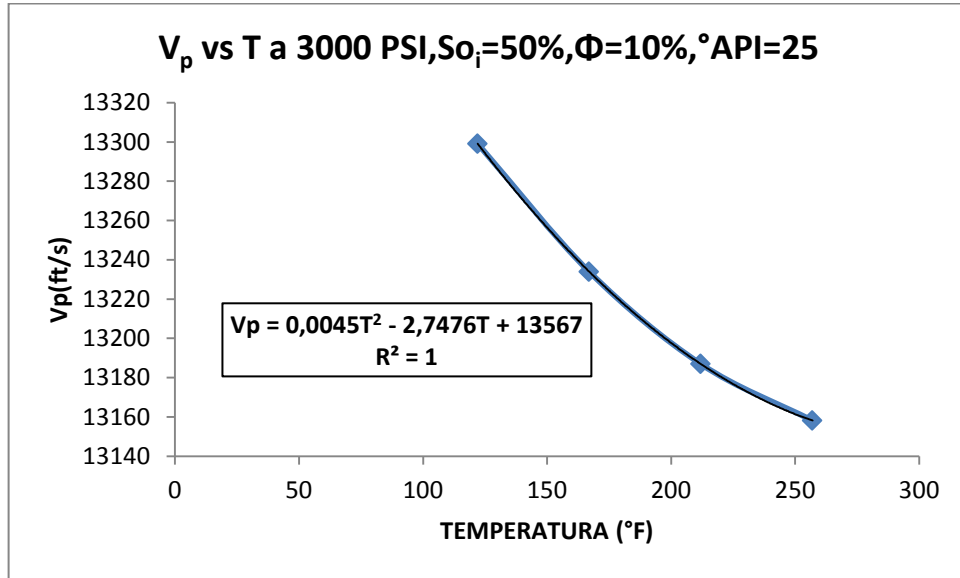
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 77. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=50\%$ , 2500 PSI**



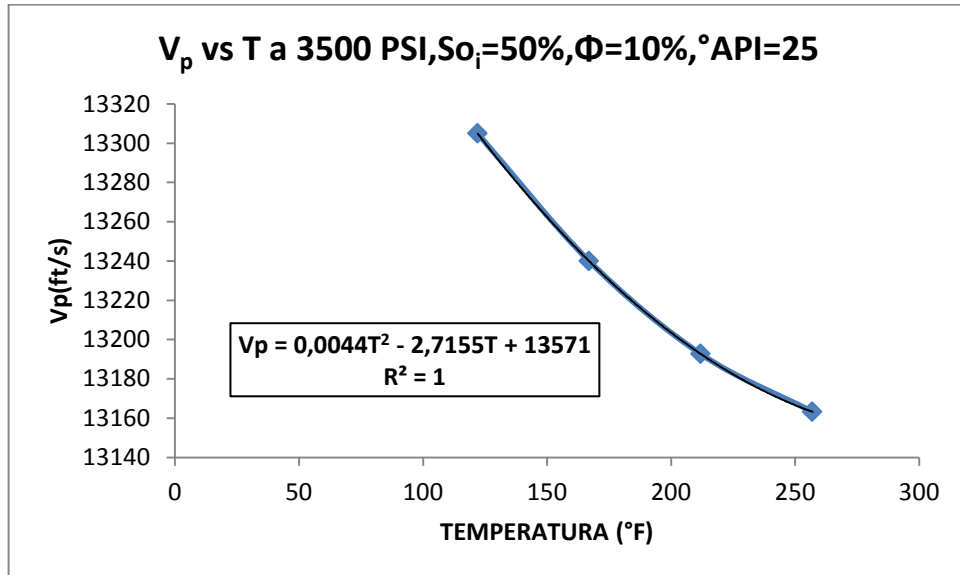
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 78. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=50\%$ , 3000 PSI**



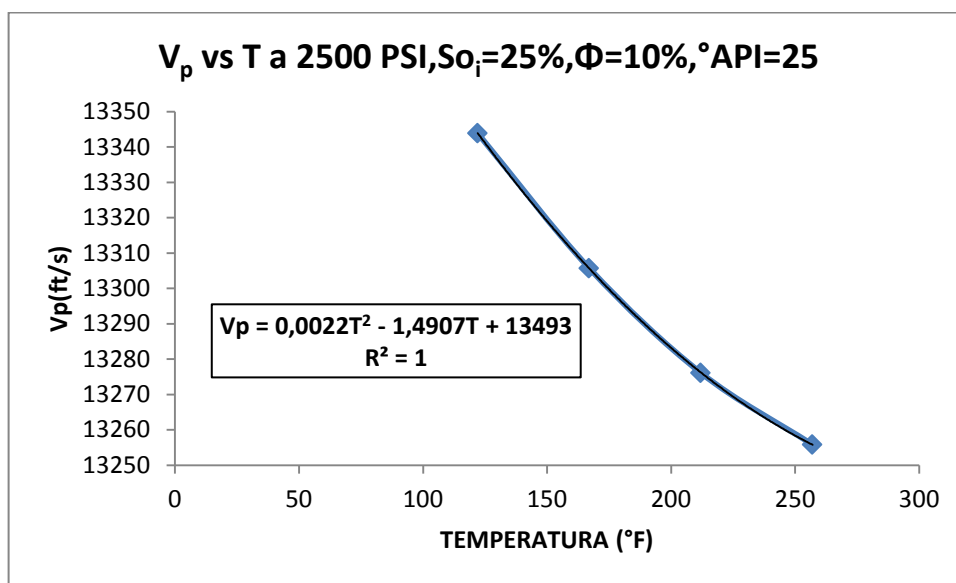
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 79. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=50\%$ , 3500 PSI**



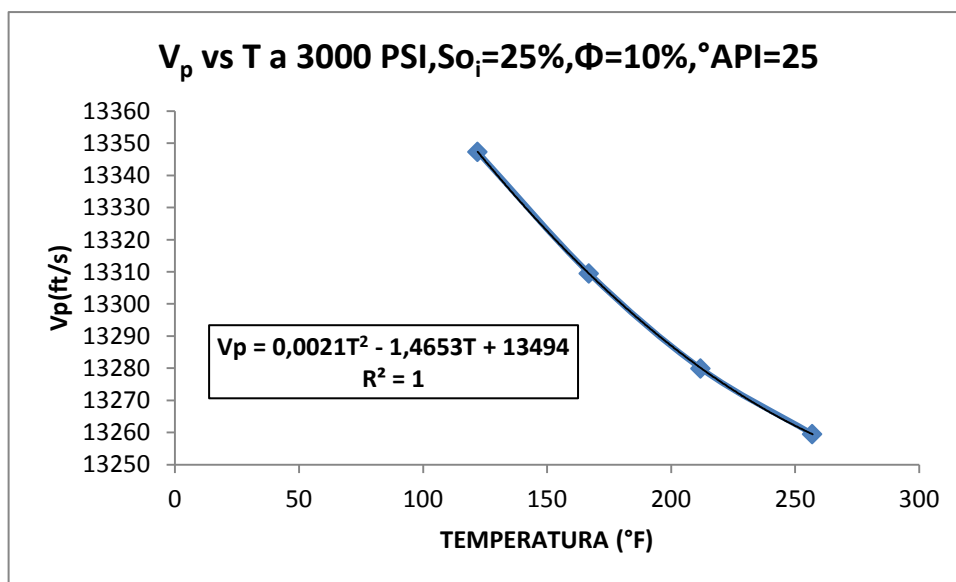
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 80. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o_i=25\%$ , 2500 PSI**



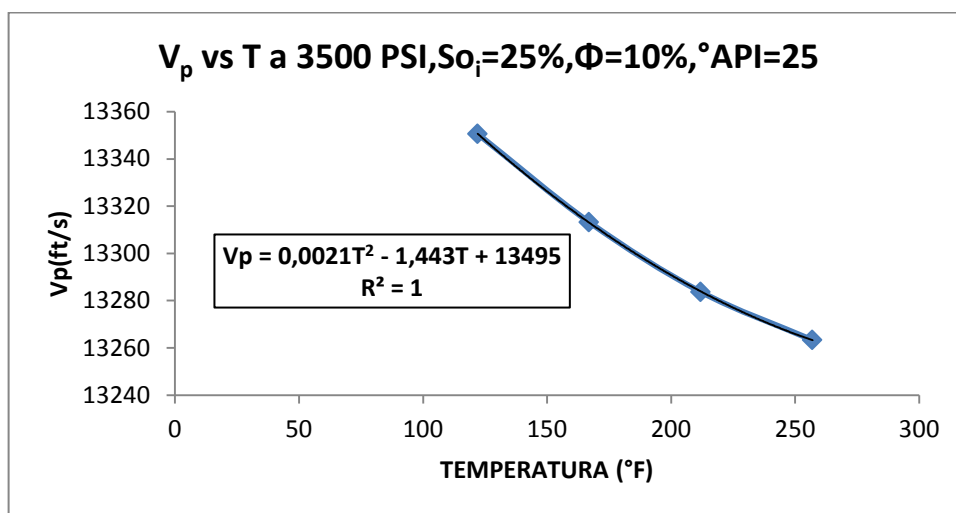
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 81. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o_i=25\%$ , 3000 PSI**



**FUENTE: Los Autores.**

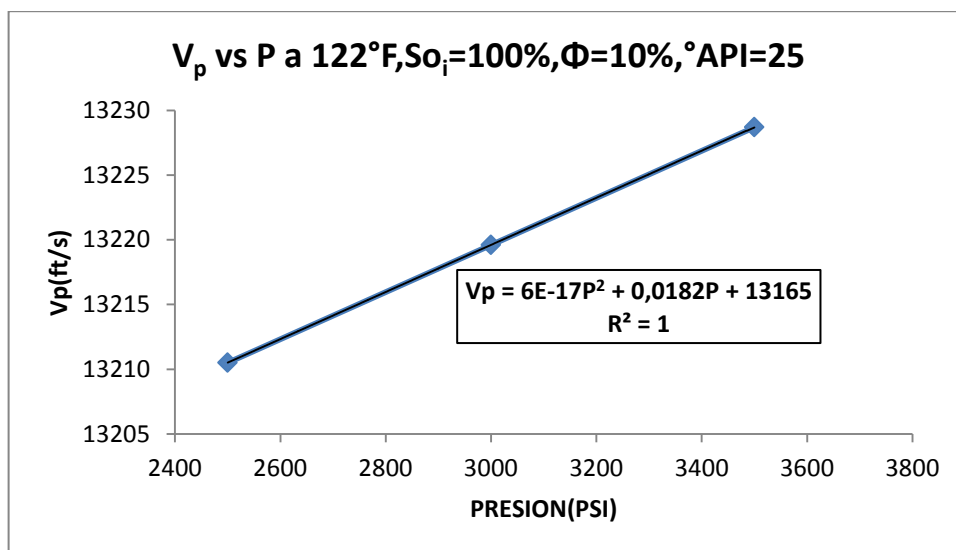
**Figura 82. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=25\%$ , 3500 PSI**



**FUENTE: Los Autores.**

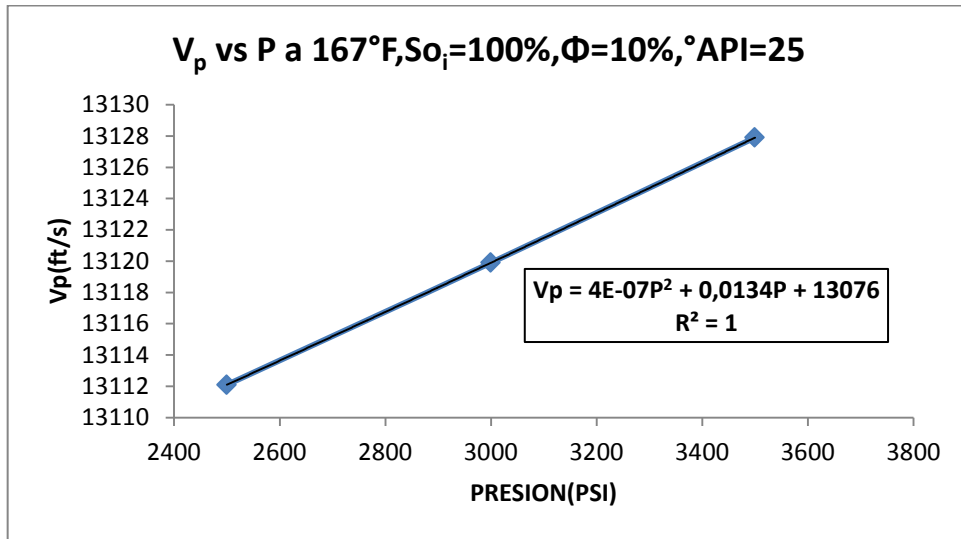
#### **4.3.2 ONDA COMPRESIONAL CONTRA PRESION A DISTINTAS TEMPERATURAS, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE PETROLEO**

**Figura 83. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=100\%$ , 122 $^{\circ}$ F**



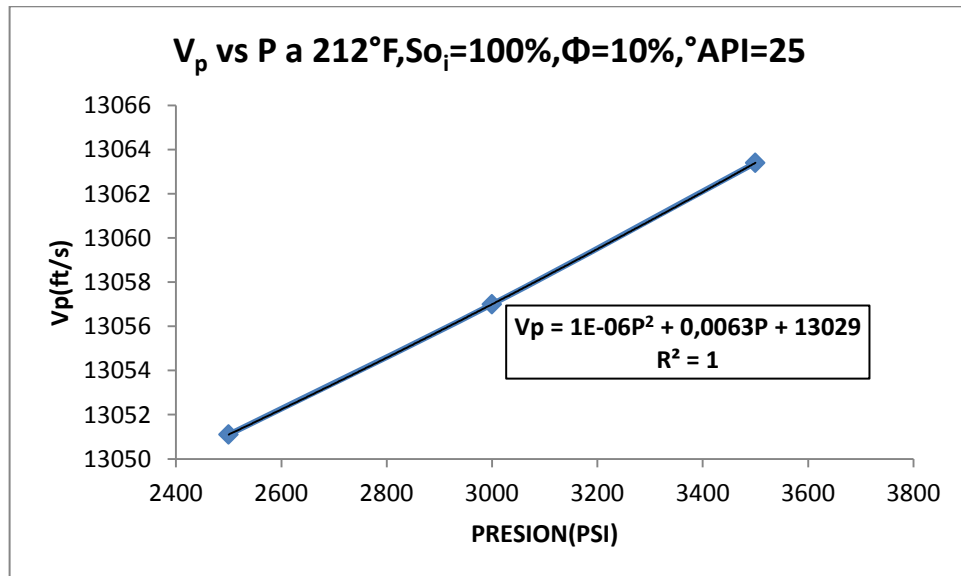
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 84. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=100\%$ ,  $167^\circ\text{F}$**



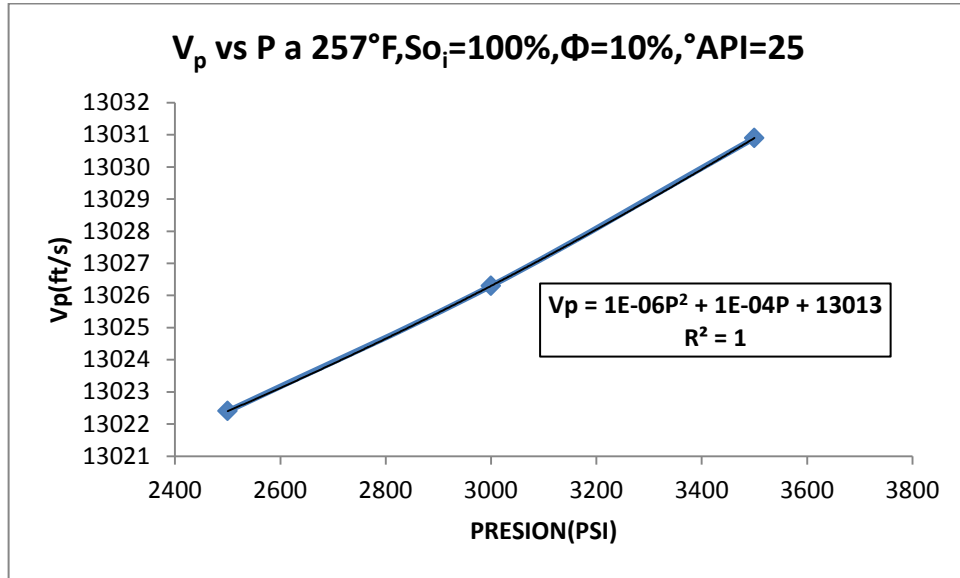
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 85. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=100\%$ ,  $212^\circ\text{F}$**



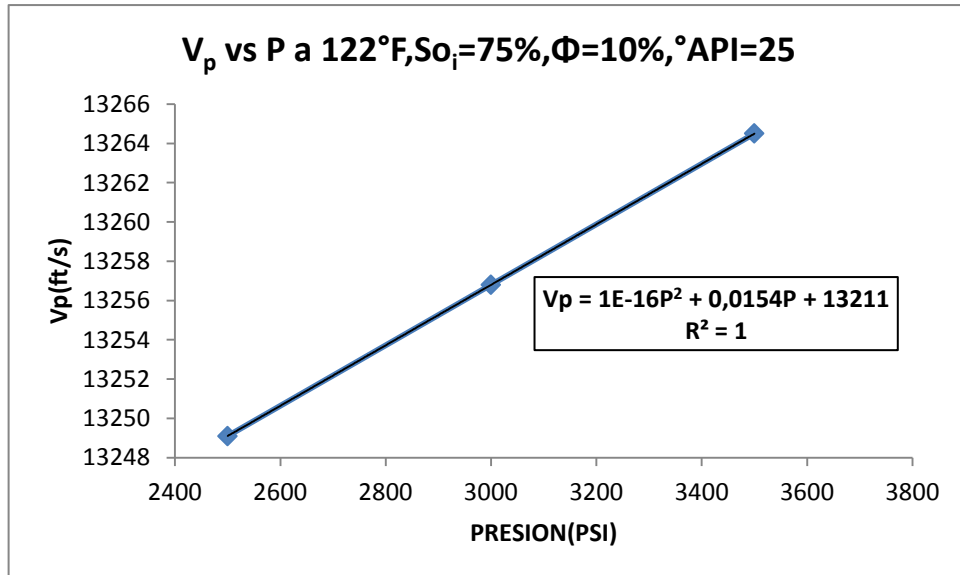
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 86. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=100\%$ ,  $257^\circ\text{F}$**



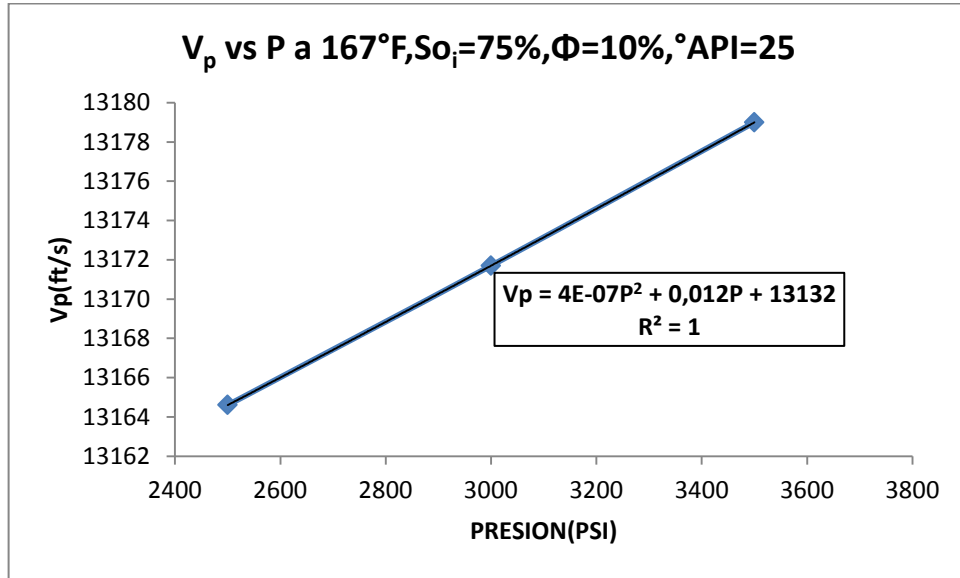
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 87. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=75\%$ ,  $122^\circ\text{F}$**



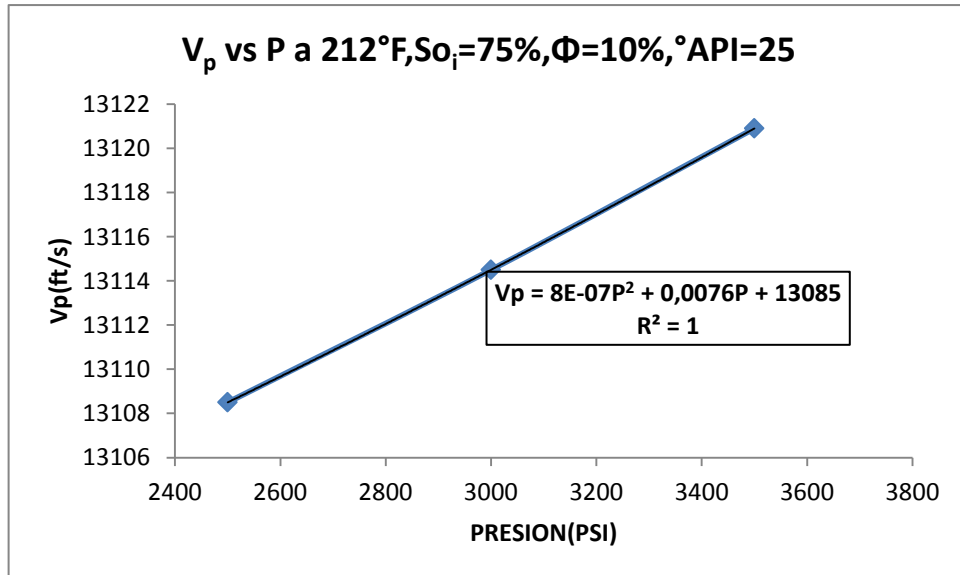
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 88. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $167^{\circ}F$**



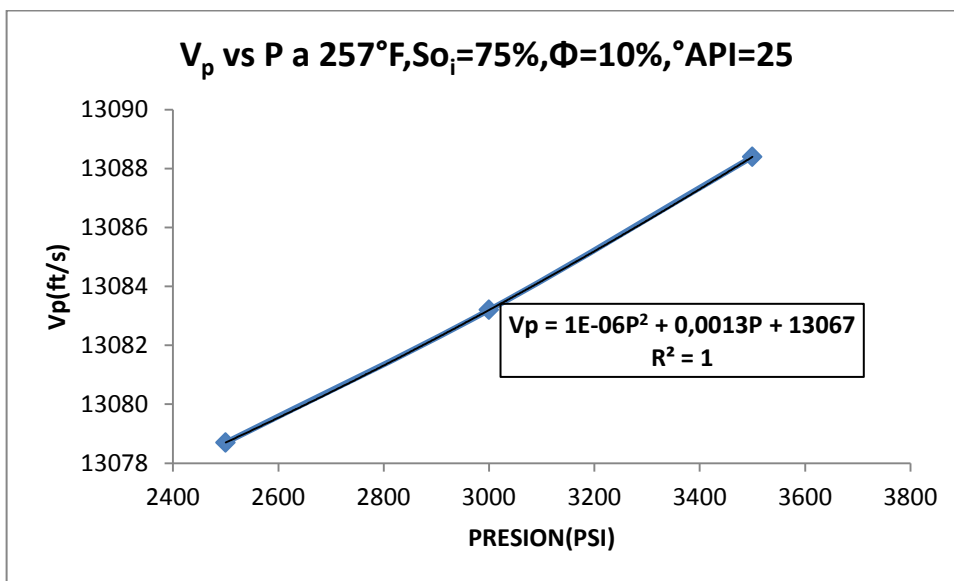
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 89. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $212^{\circ}F$**



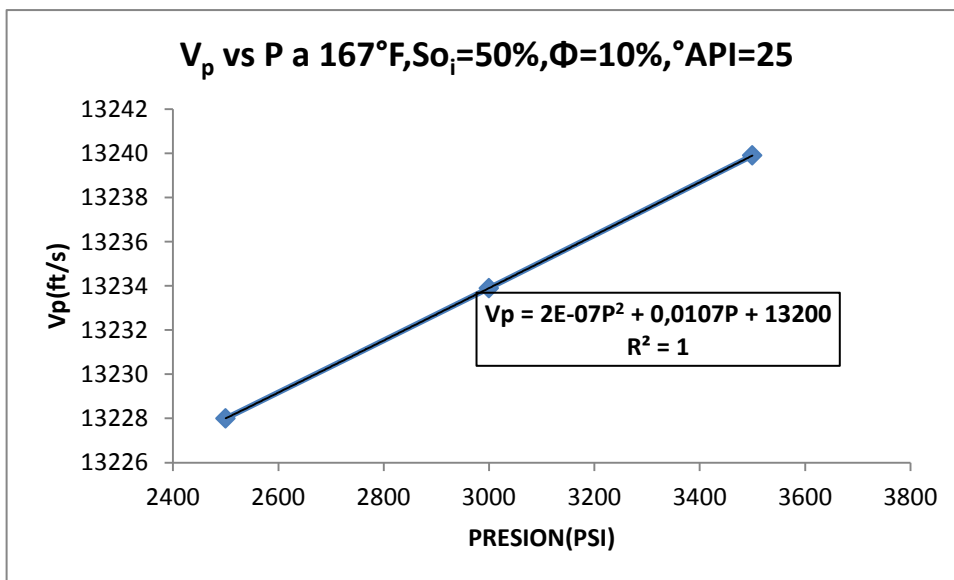
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 90. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=75\%$ ,  $257^\circ\text{F}$**



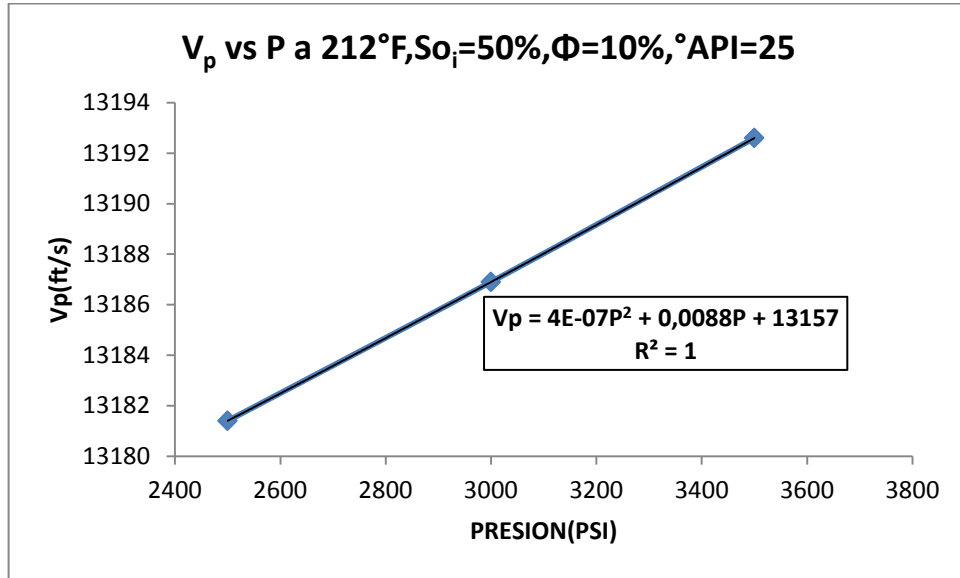
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 91. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=50\%$ ,  $167^\circ\text{F}$**



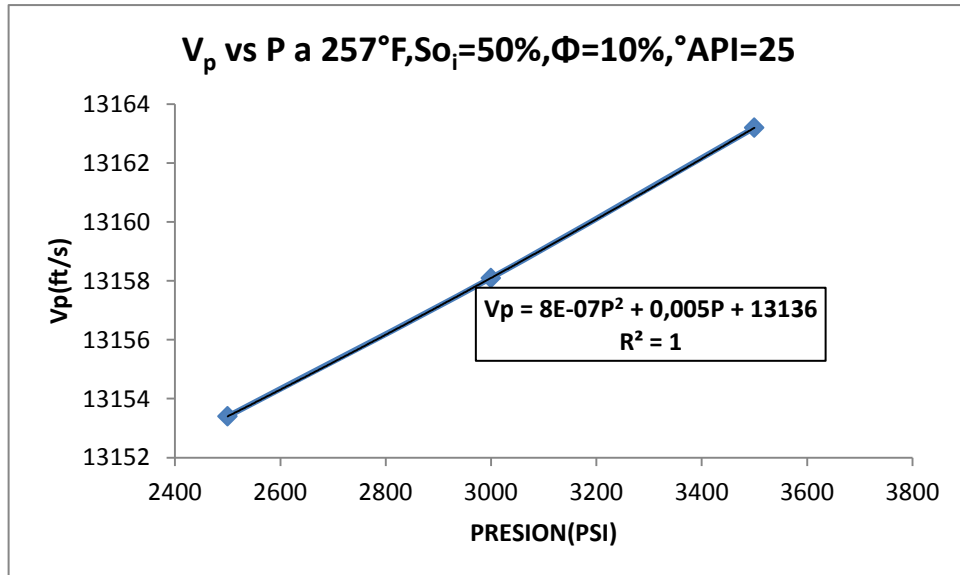
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 92. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=50\%$ ,  $212^\circ\text{F}$**



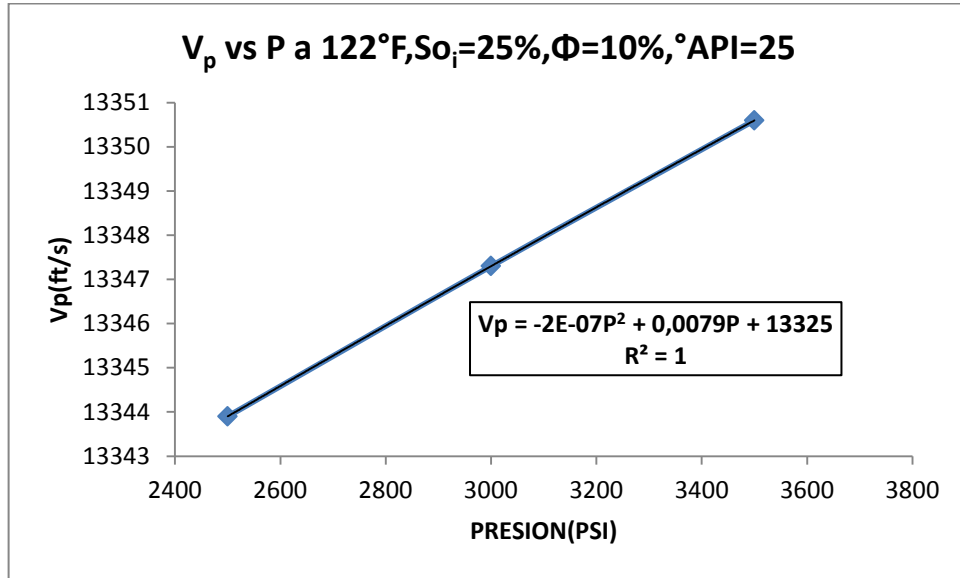
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 93. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=50\%$ ,  $257^\circ\text{F}$**



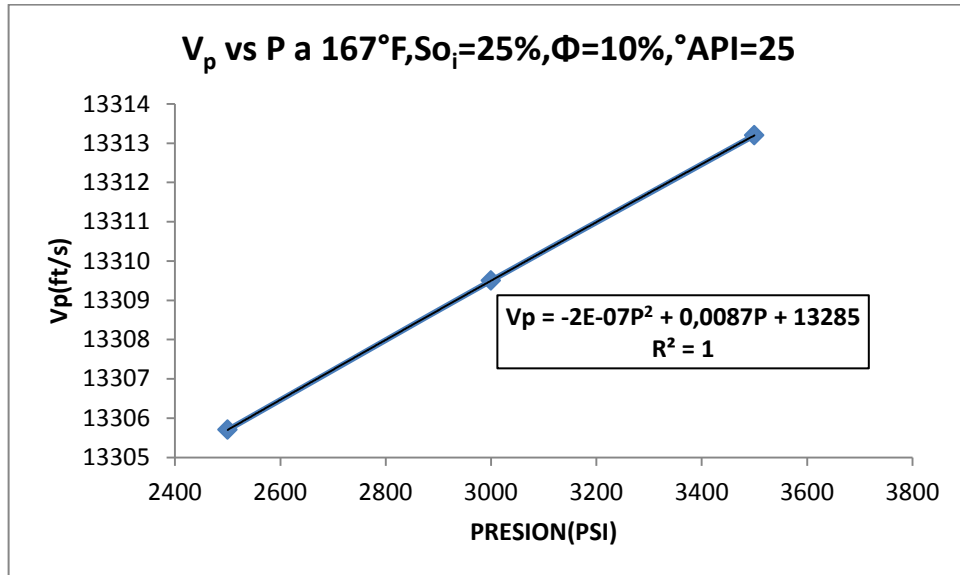
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 94. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=25\%$ ,  $122^\circ\text{F}$**



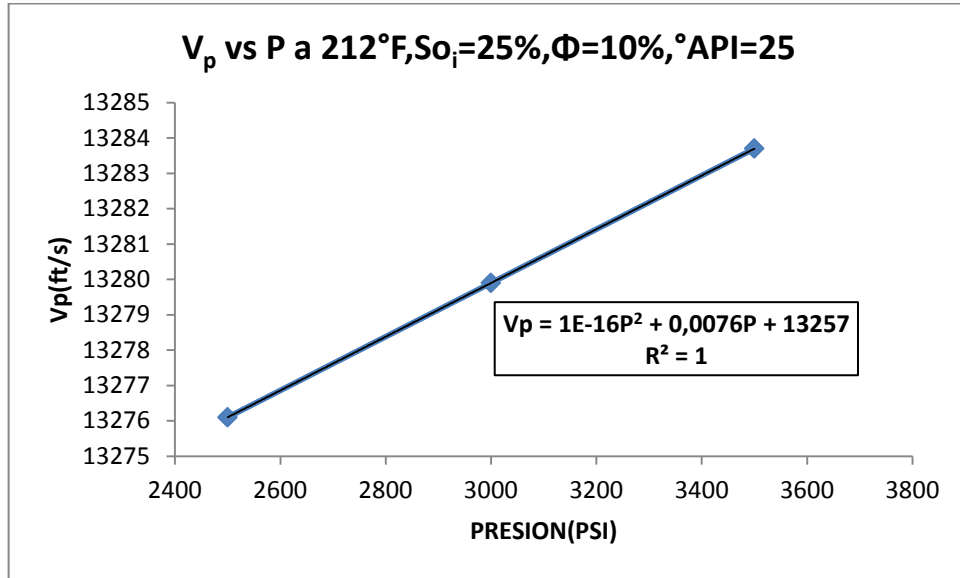
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 95. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=25\%$ ,  $167^\circ\text{F}$**



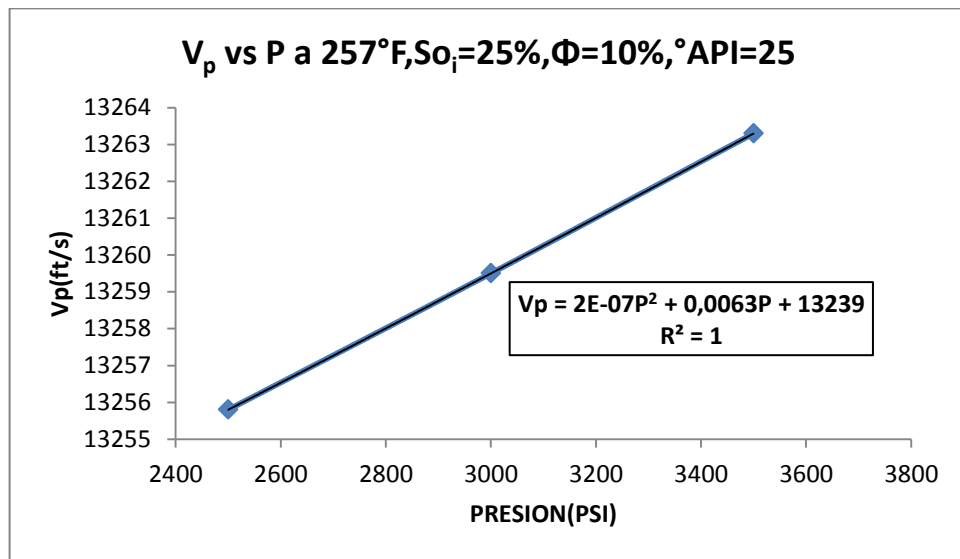
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 96. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $212^{\circ}\text{F}$**



**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 97. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $257^{\circ}\text{F}$**

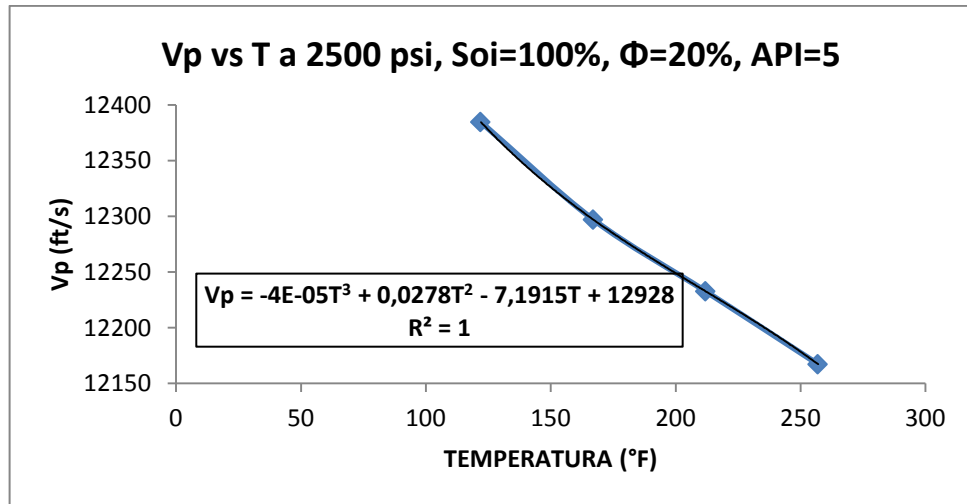


**FUENTE: Los Autores.**

#### 4.4 CASO 4: POROSIDAD DEL 20% Y PETROLEO DE 5° API

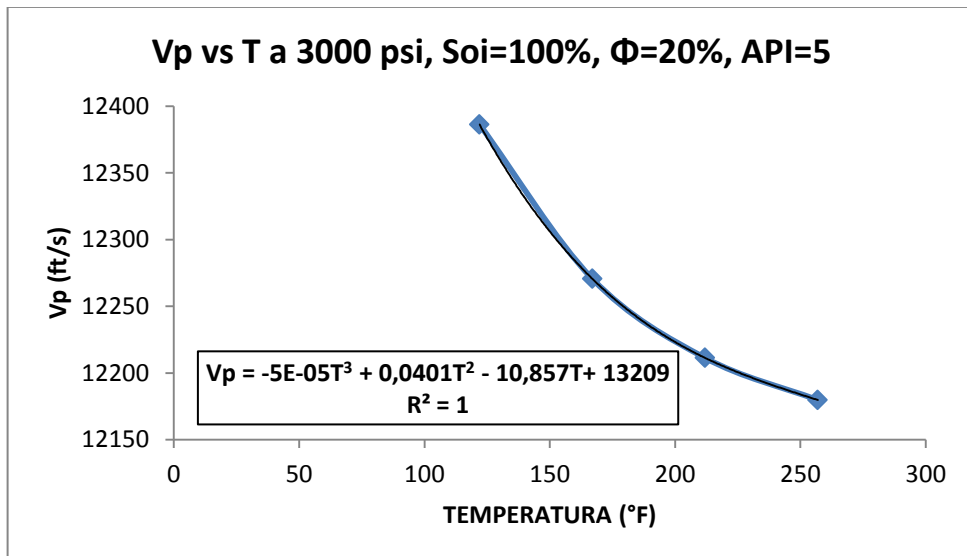
##### 4.4.1 ONDA COMPRESIONAL CONTRA TEMPERATURA A DISTINTAS PRESIONES, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE ACEITE

Figura 98. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=100\%$ , 2500 PSI



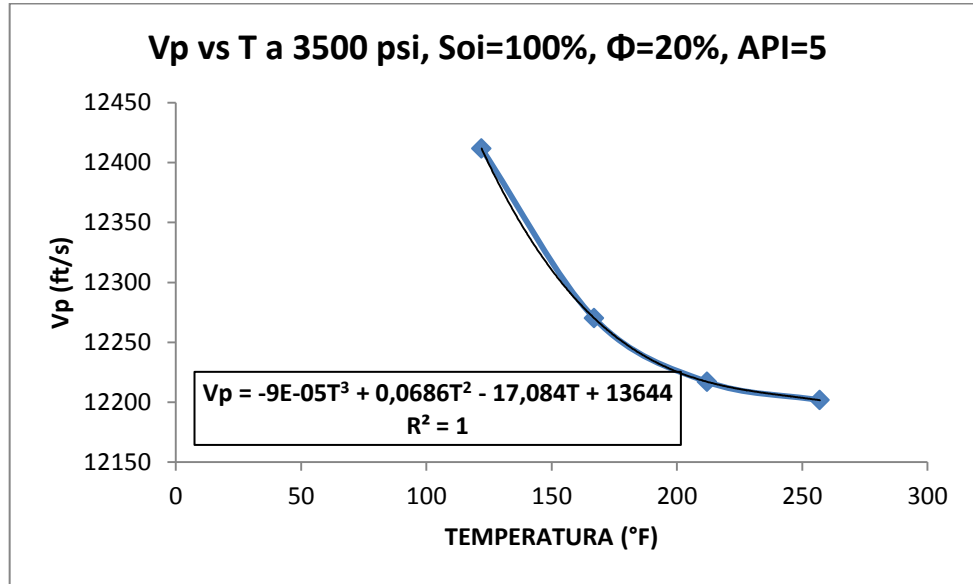
FUENTE: Los Autores.

Figura 99. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=100\%$ , 3000 PSI



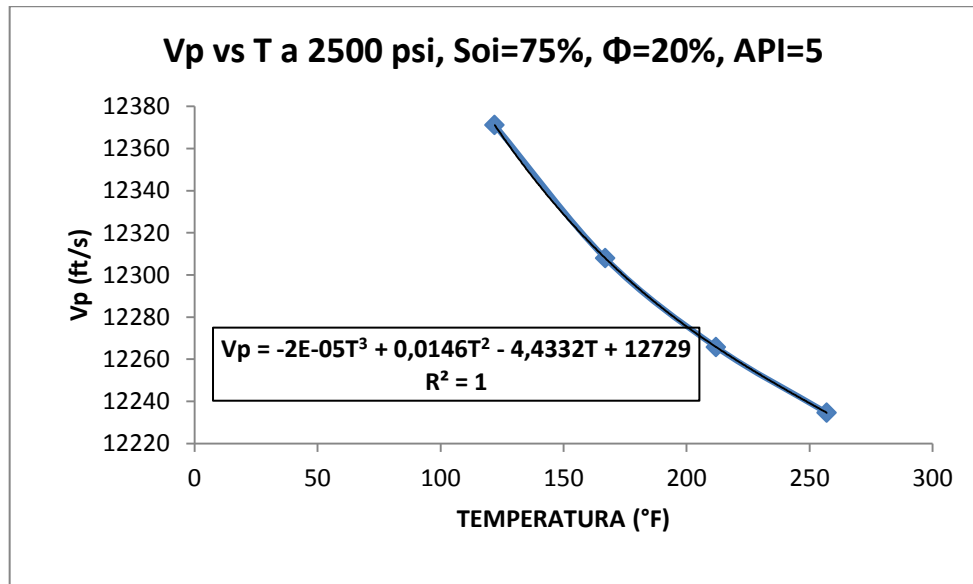
FUENTE: Los Autores.

**Figura 100. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=100\%$ , 3500 PSI**



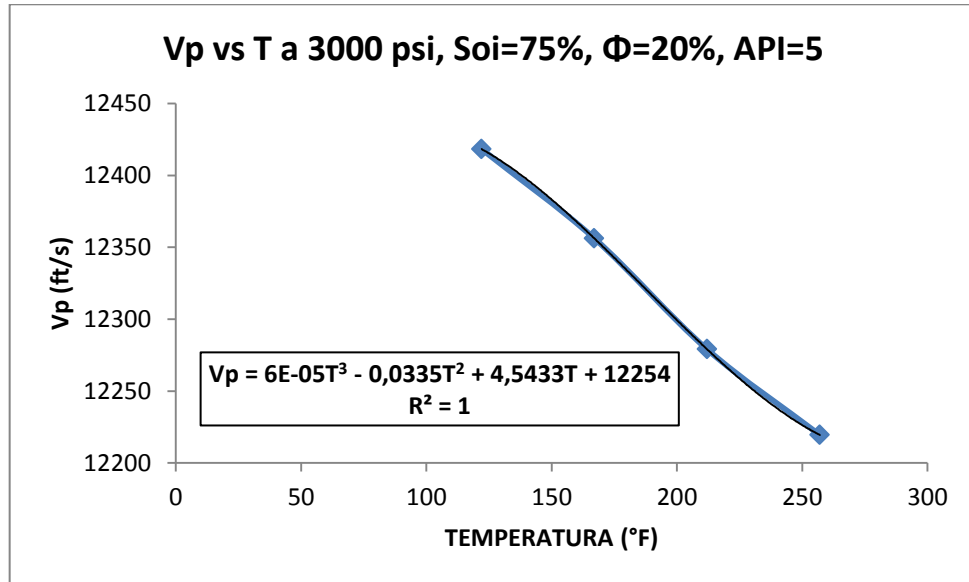
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 101. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=75\%$ , 2500 PSI**



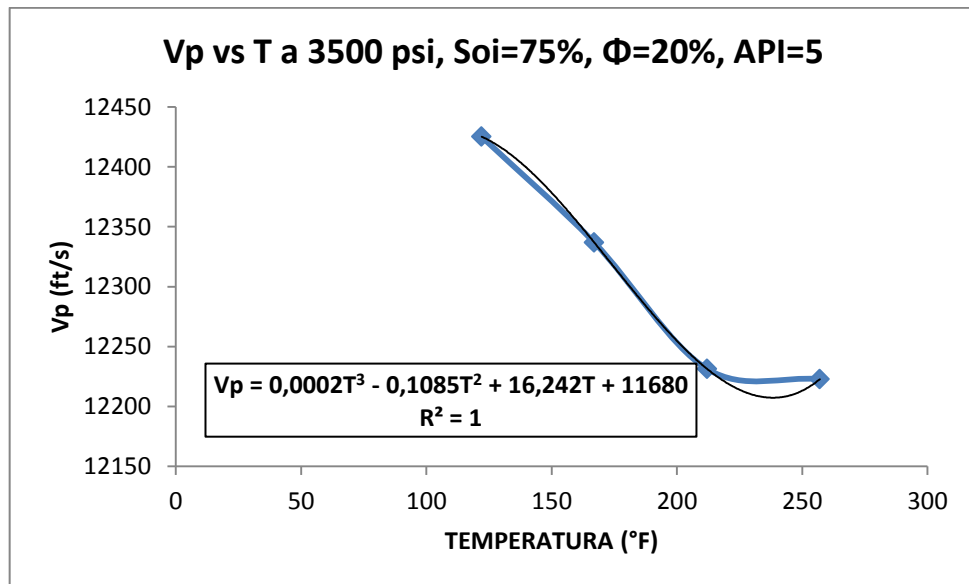
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 102. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=75\%$ , 3000 PSI**



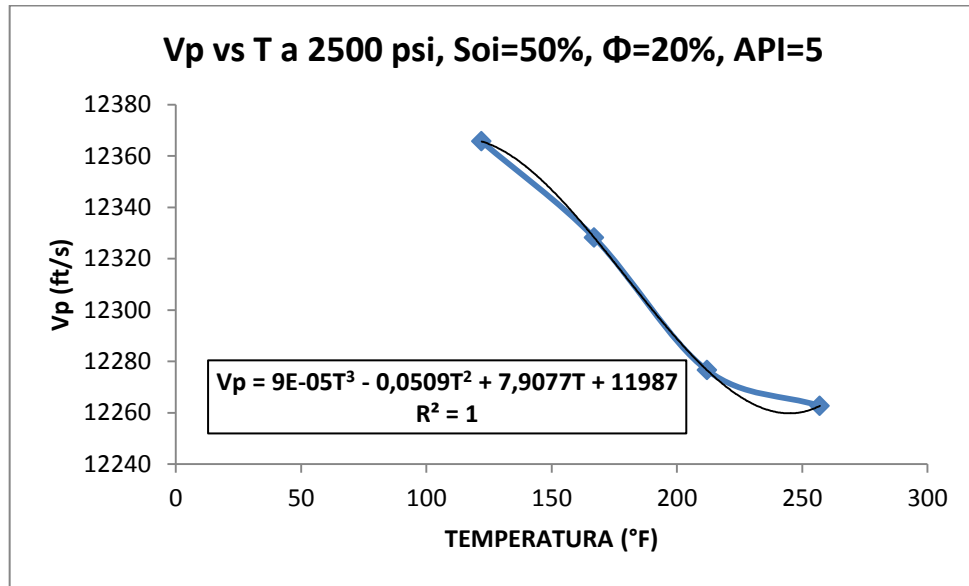
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 103. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=75\%$ , 3500 PSI**



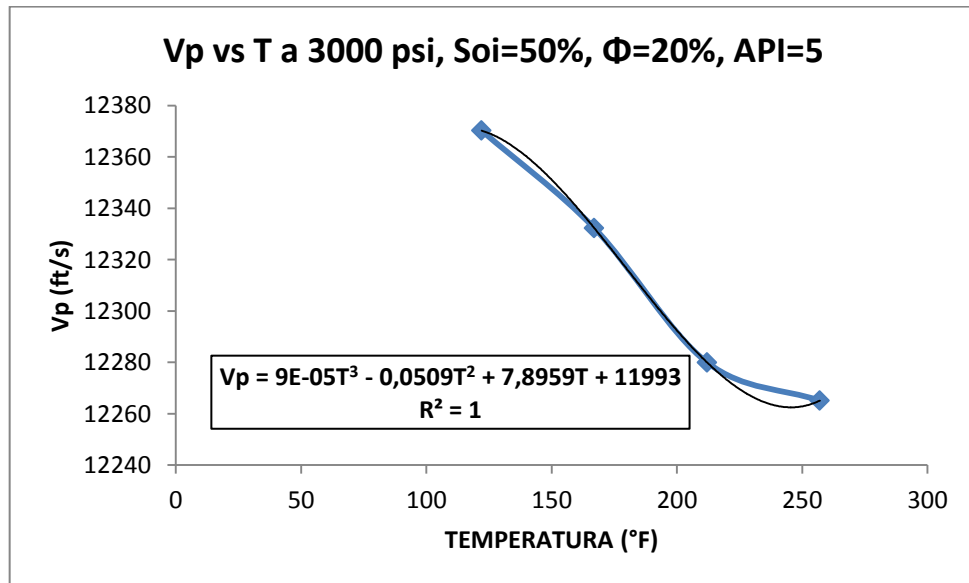
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 104. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=50\%$ , 2500 PSI**



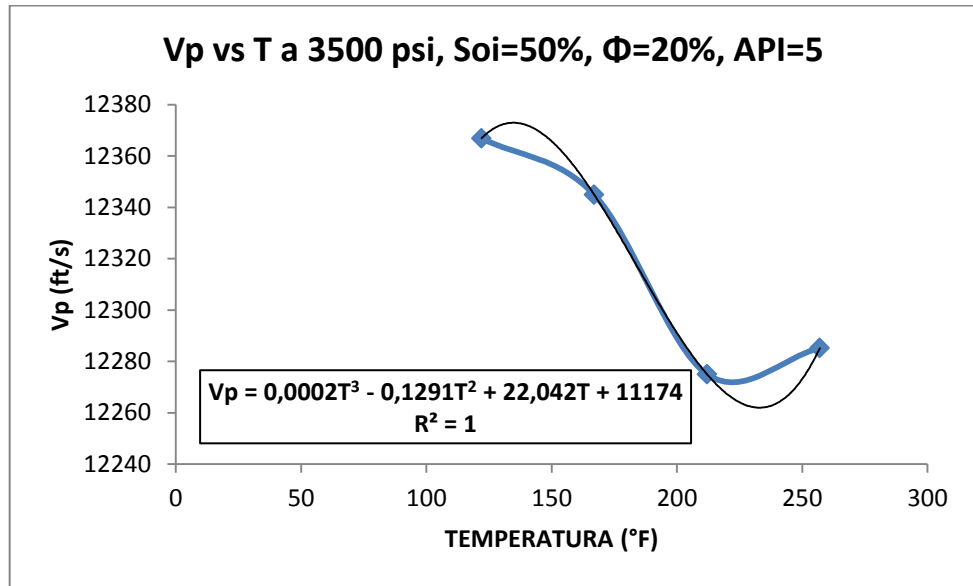
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 105. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=50\%$ , 3000 PSI**



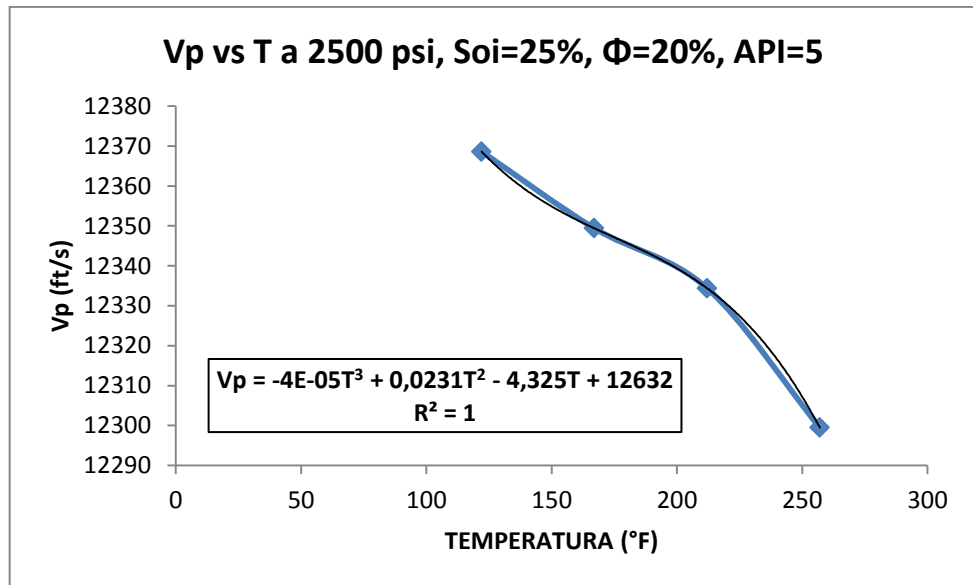
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 106. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=50\%$ , 2500 PSI**



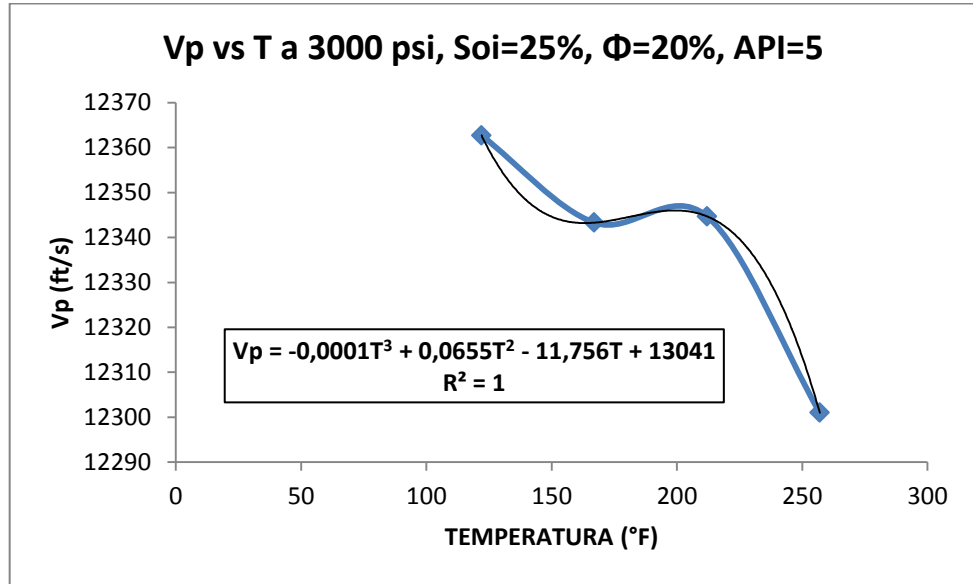
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 107. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=25\%$ , 2500 PSI**



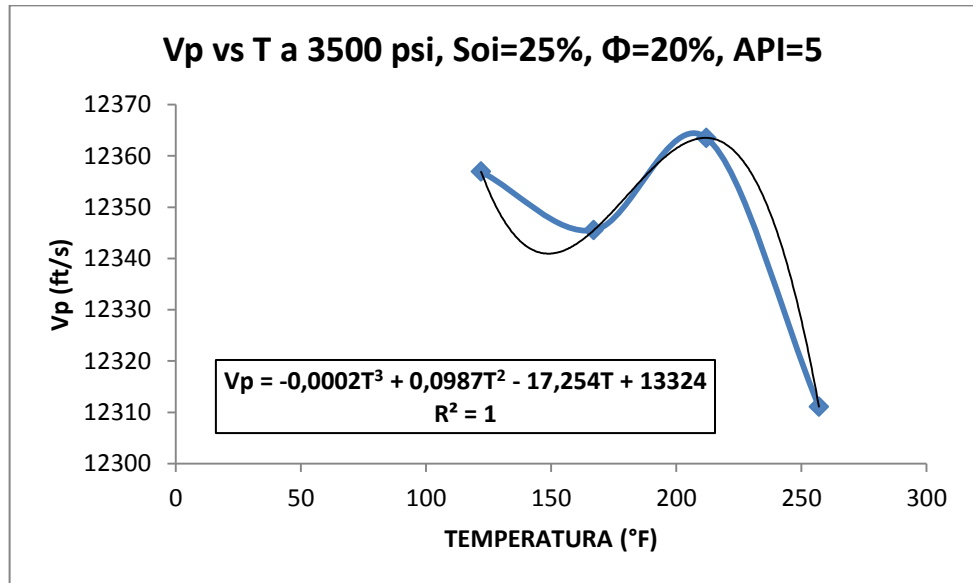
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 108. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=25\%$ , 3000 PSI**



**FUENTE: Los Autores.**

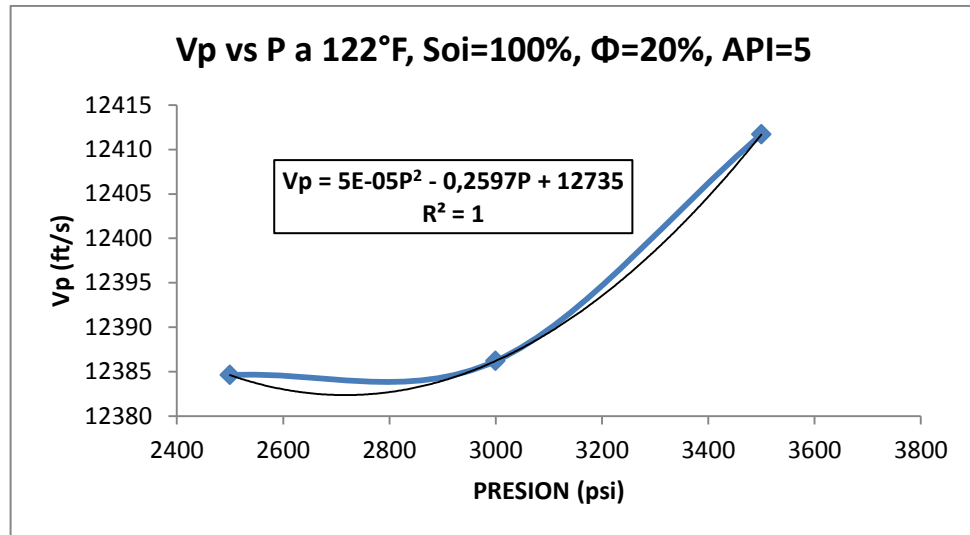
**Figura 109. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=25\%$ , 3500 PSI**



**FUENTE: Los Autores.**

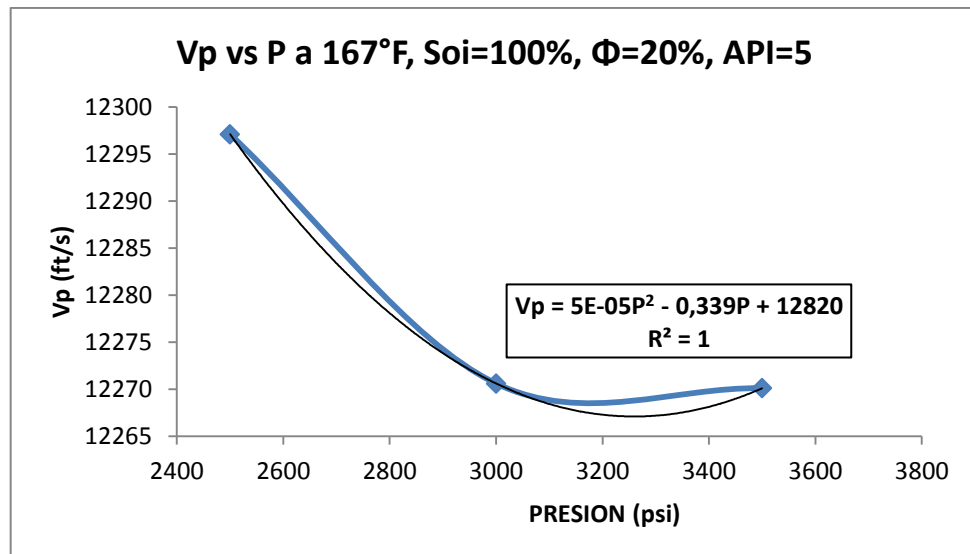
#### 4.4.2 ONDA COMPRESIONAL CONTRA PRESION A DISTINTAS TEMPERATURAS, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE PETROLEO

Figura 110. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $So_i=100\%$ ,  $122^\circ F$



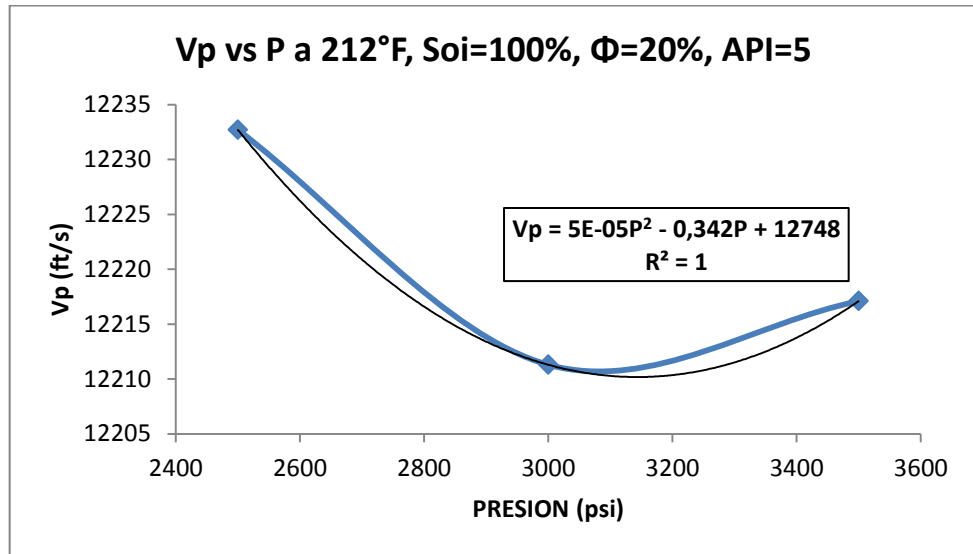
FUENTE: Los Autores.

Figura 111. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $So_i=100\%$ ,  $167^\circ F$



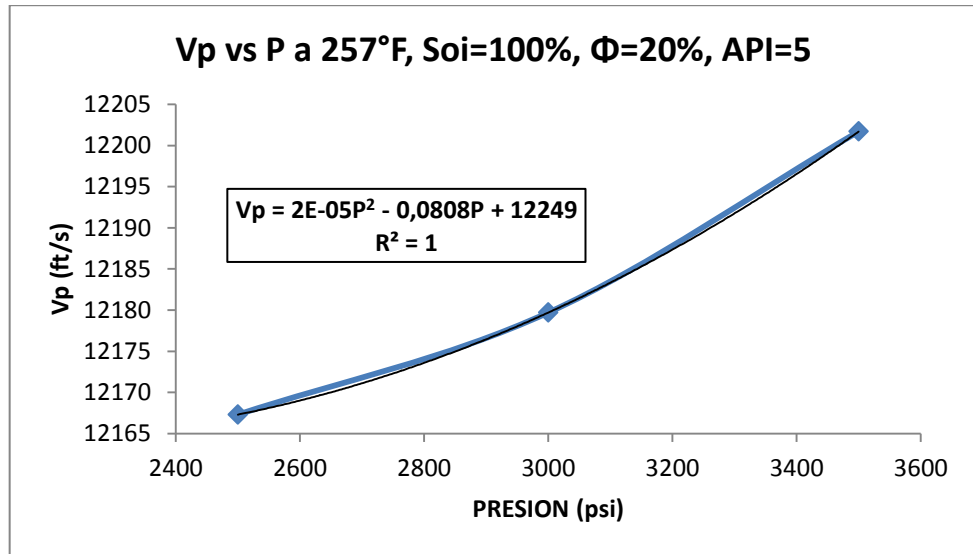
FUENTE: Los Autores.

**Figura 112. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=100\%$ ,  $212^{\circ}F$**



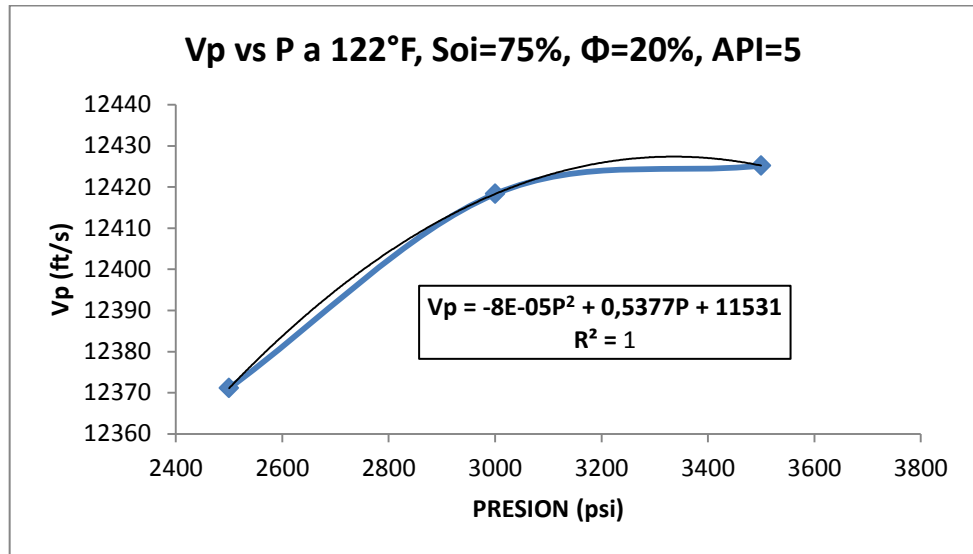
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 113. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=100\%$ ,  $257^{\circ}F$**



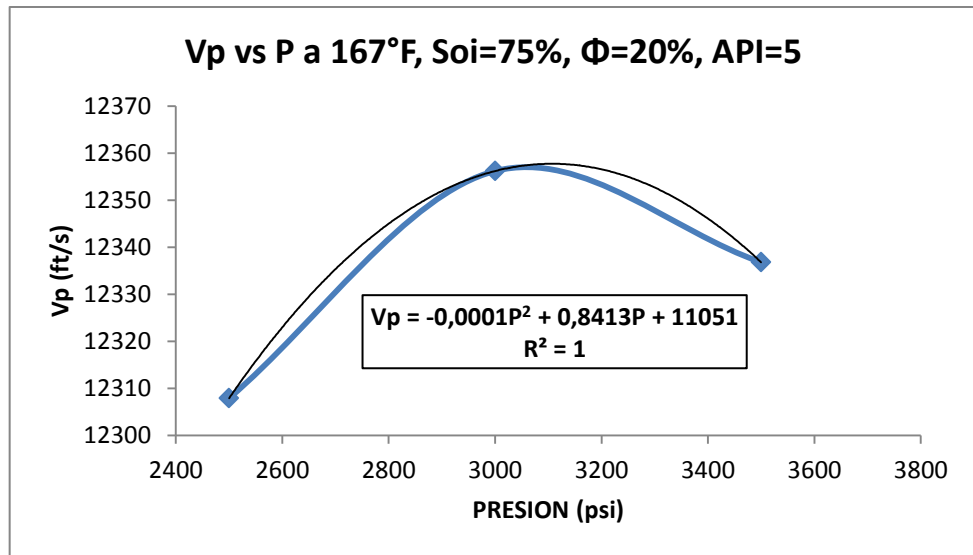
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 114. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $122^{\circ}\text{F}$**



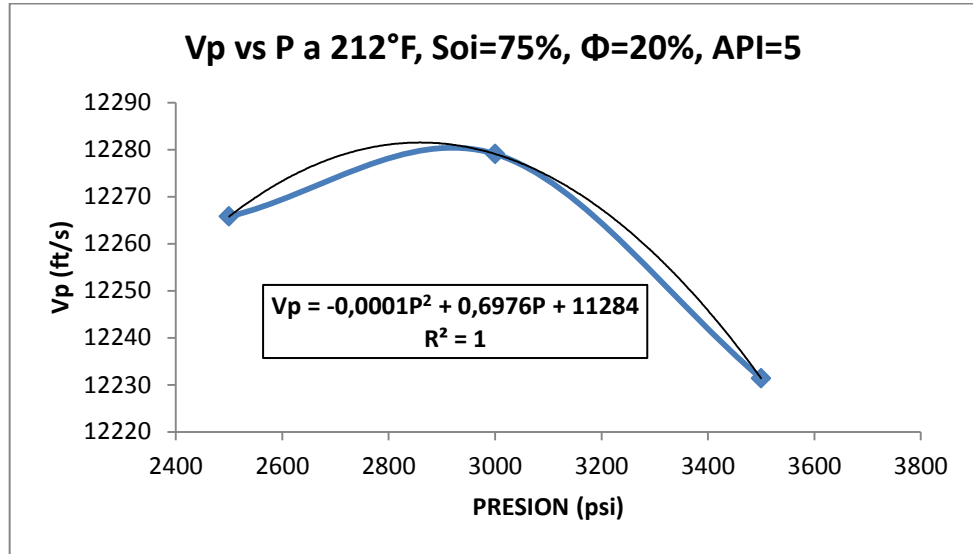
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 115. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $167^{\circ}\text{F}$**



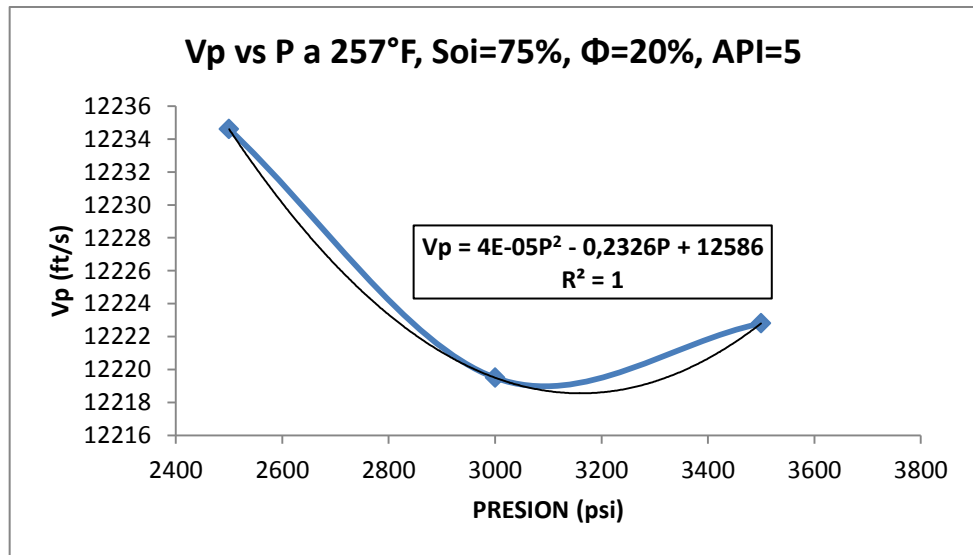
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 116. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_o=75\%$ ,  $212^\circ\text{F}$**



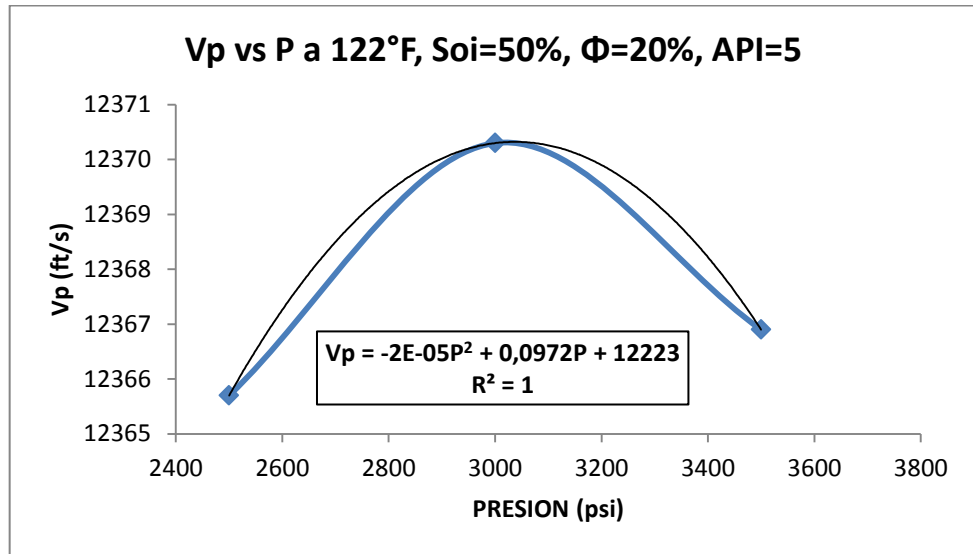
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 117. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_o=75\%$ ,  $257^\circ\text{F}$**



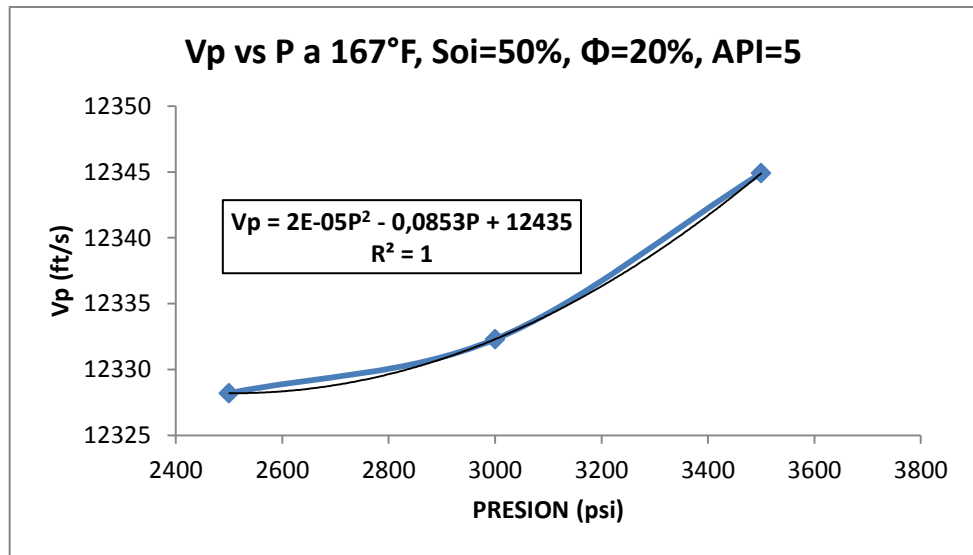
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 118. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $122^{\circ}\text{F}$**



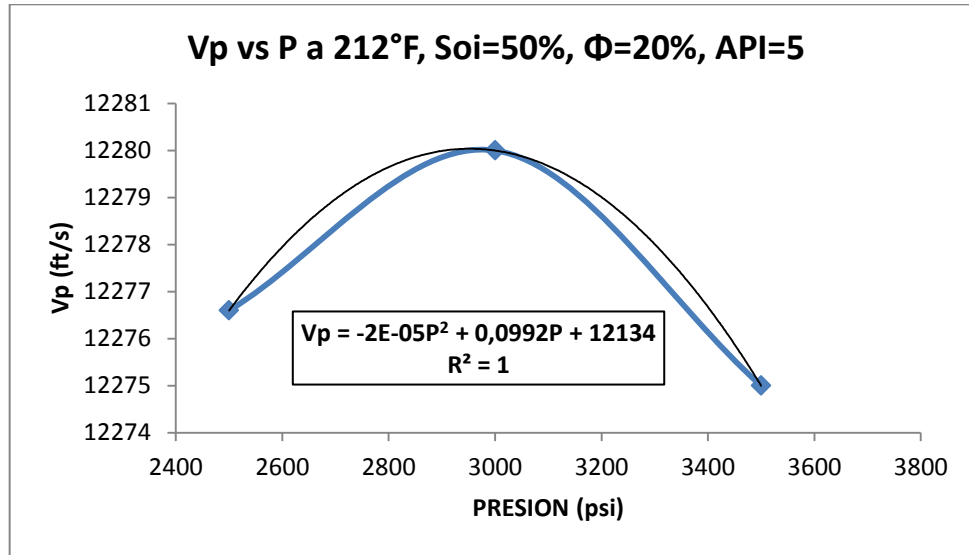
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 119. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $167^{\circ}\text{F}$**



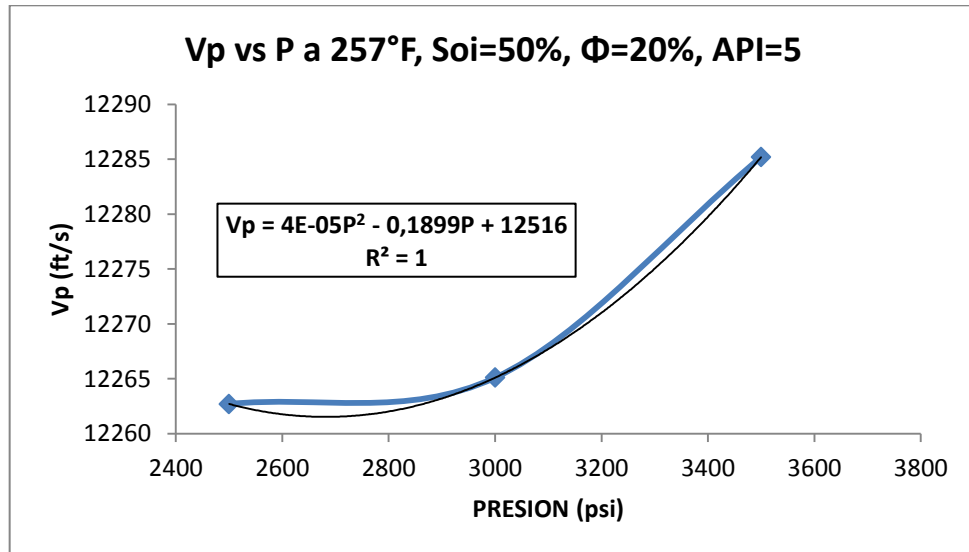
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 120. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $212^{\circ}\text{F}$**



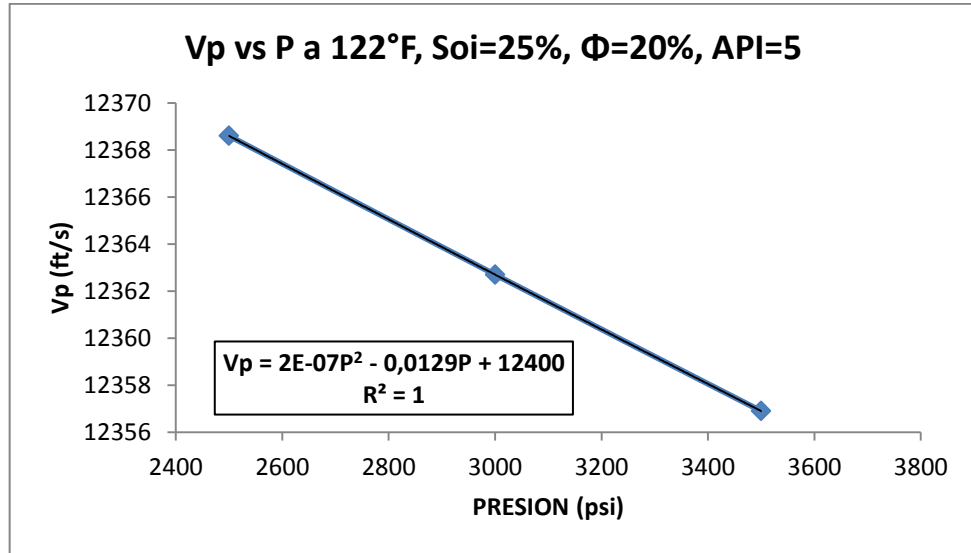
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 121. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $257^{\circ}\text{F}$**



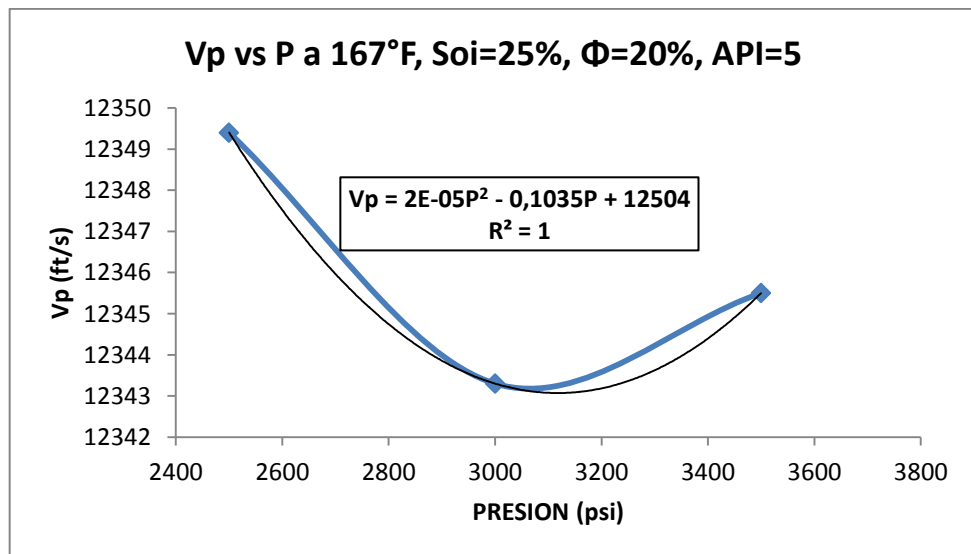
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 122. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $122^{\circ}F$**



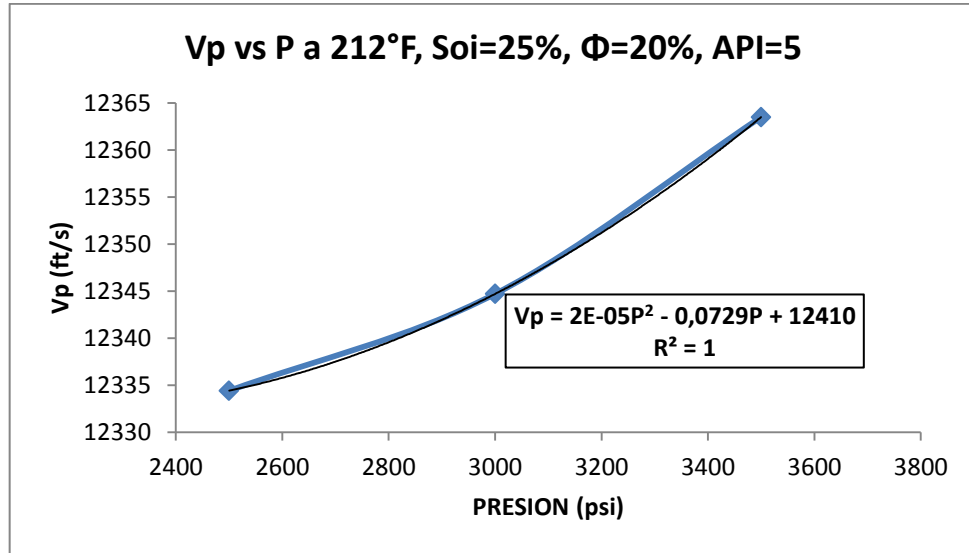
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 123. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $167^{\circ}F$**



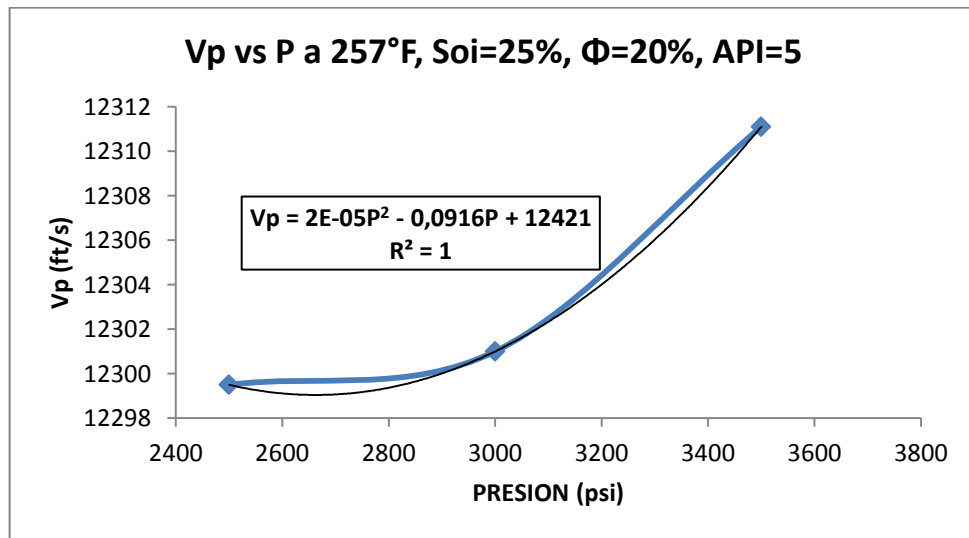
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 124. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $212^{\circ}F$**



**FUENTE: Los Autores**

**Figura 125. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $257^{\circ}F$**

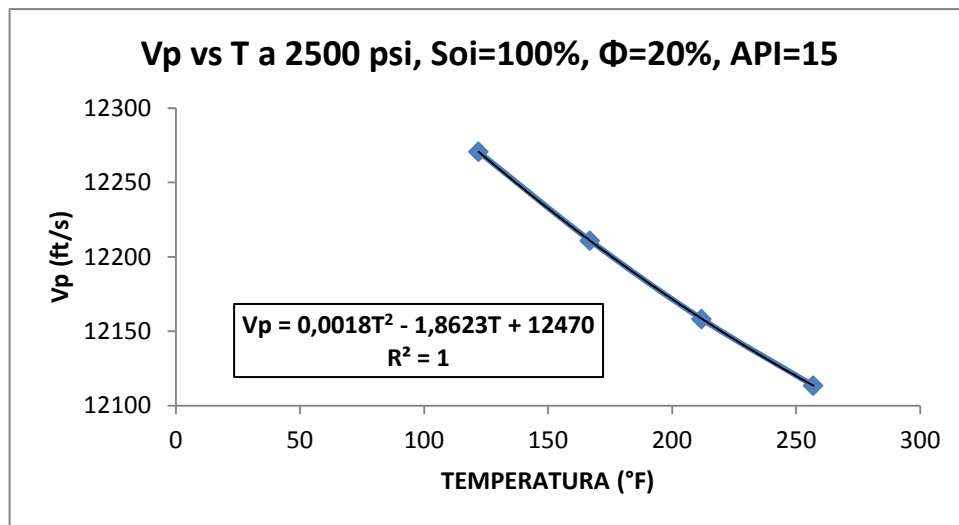


**FUENTE: Los Autores**

#### 4.5 CASO 5: POROSIDAD DEL 20% Y PETROLEO DE 15°API

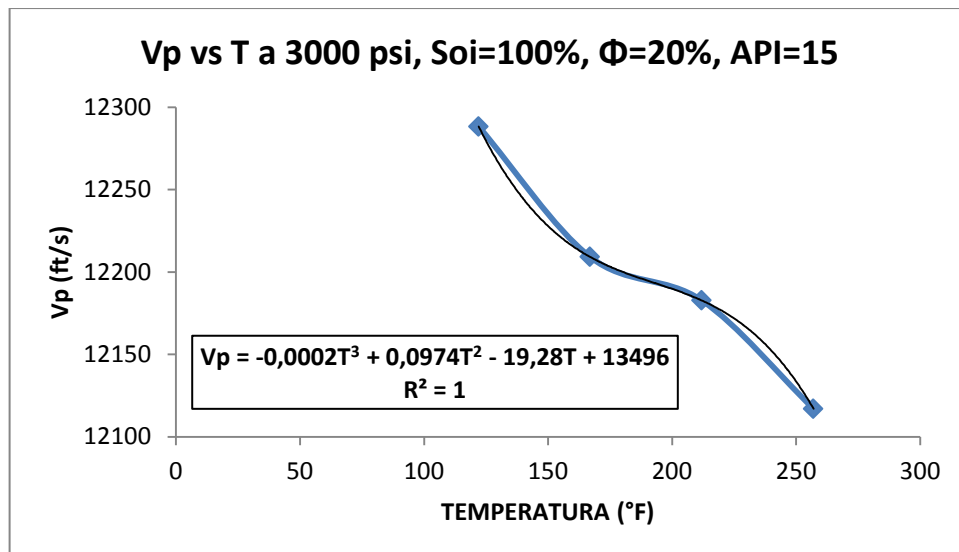
##### 4.5.1 ONDA COMPRESIONAL CONTRA TEMPERATURA A DISTINTAS PRESIONES, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE ACEITE

Figura 126. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=100\%$ , 2500 PSI



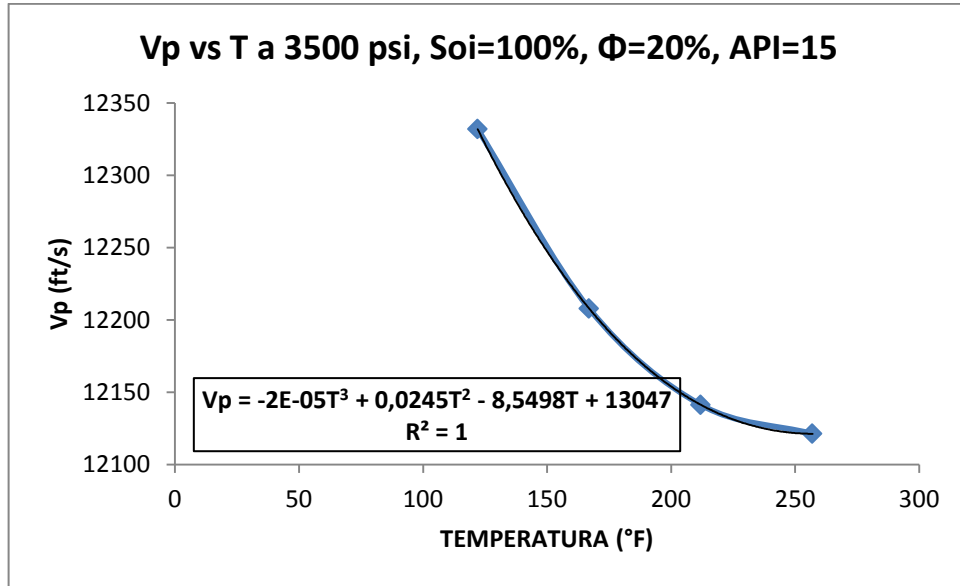
FUENTE: Los Autores

Figura 127. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=100\%$ , 3000 PSI



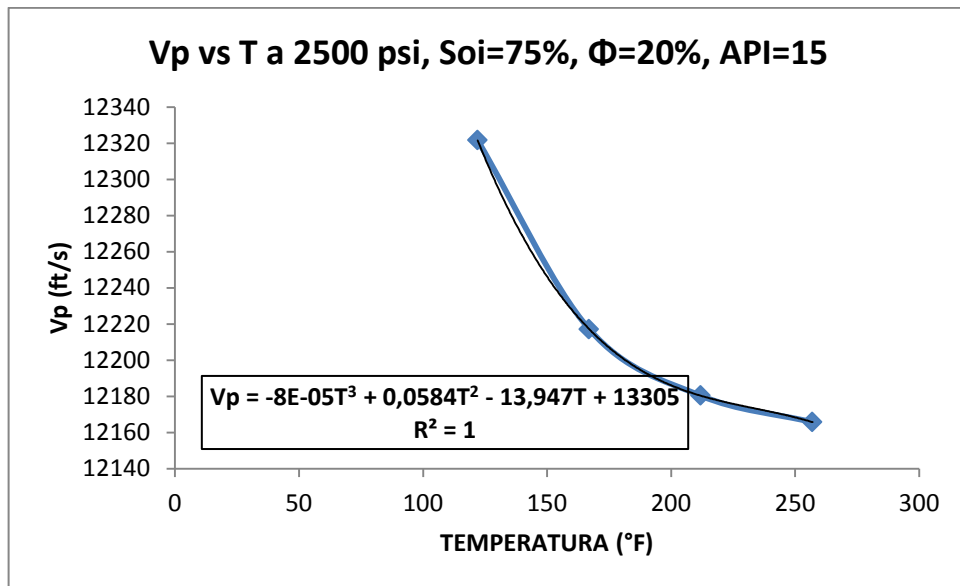
FUENTE: Los Autores

**Figura 128. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=100\%$ , 3500 PSI**



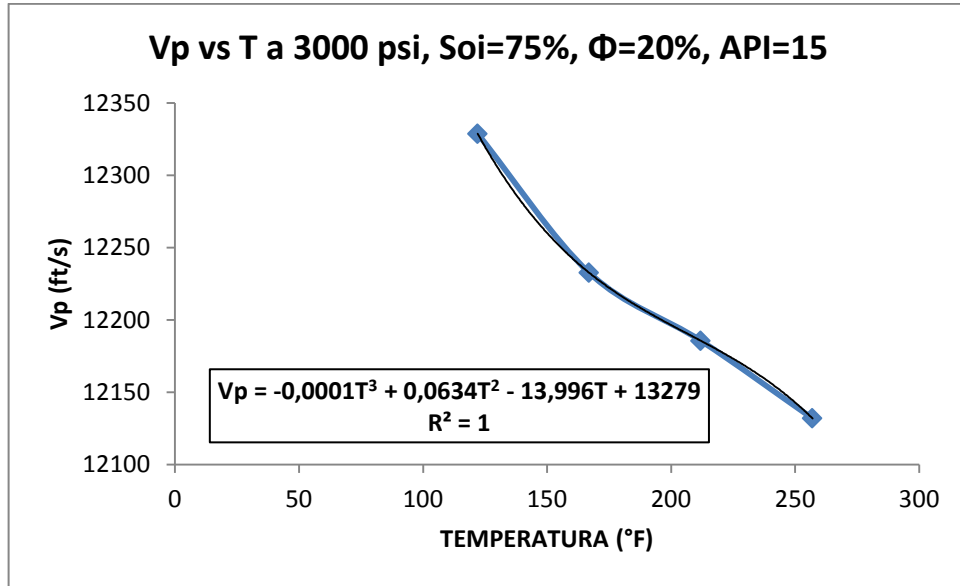
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 129. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=75\%$ , 2500 PSI**



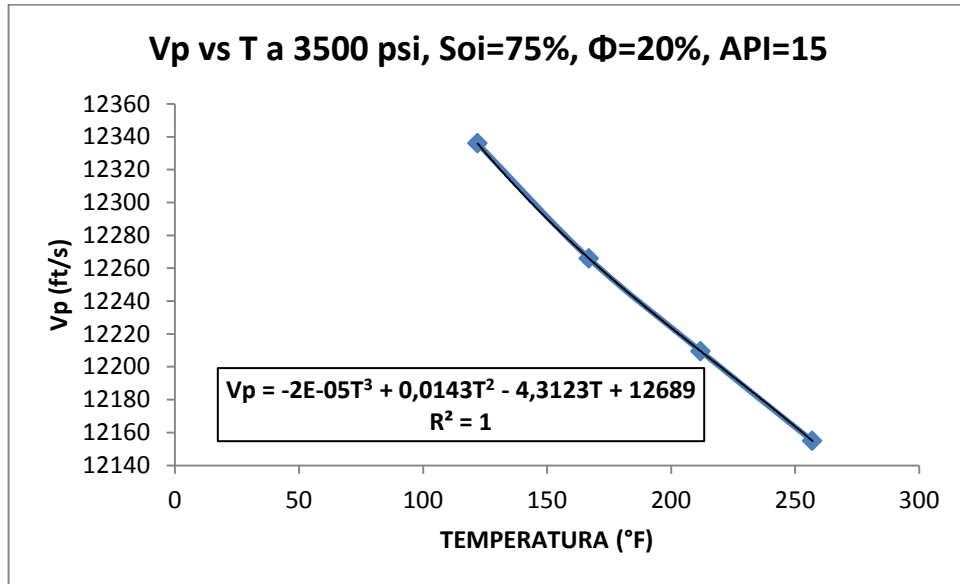
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 130. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=75\%$ , 3000 PSI**



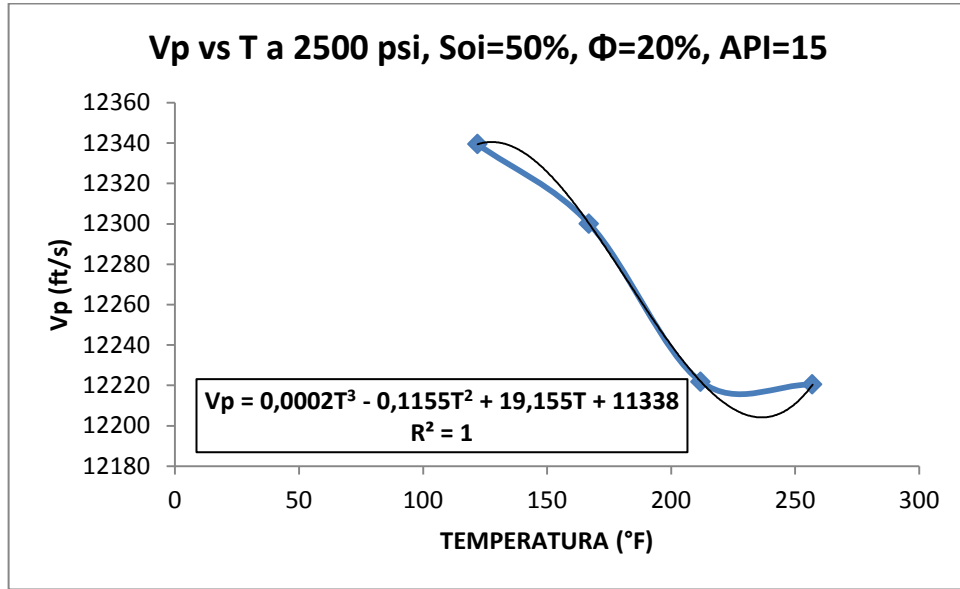
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 131. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=75\%$ , 3500 PSI**



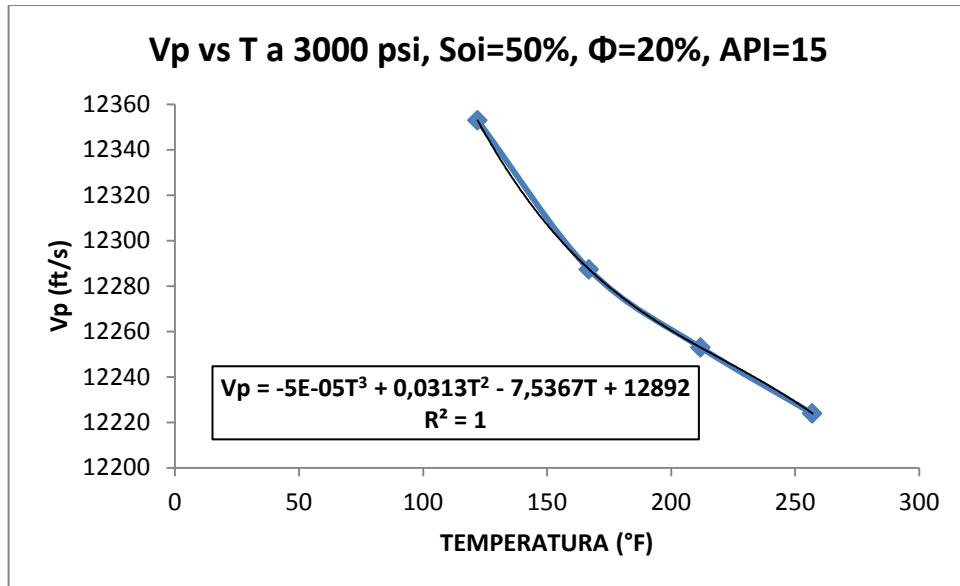
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 132. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=50\%$ , 2500 PSI**



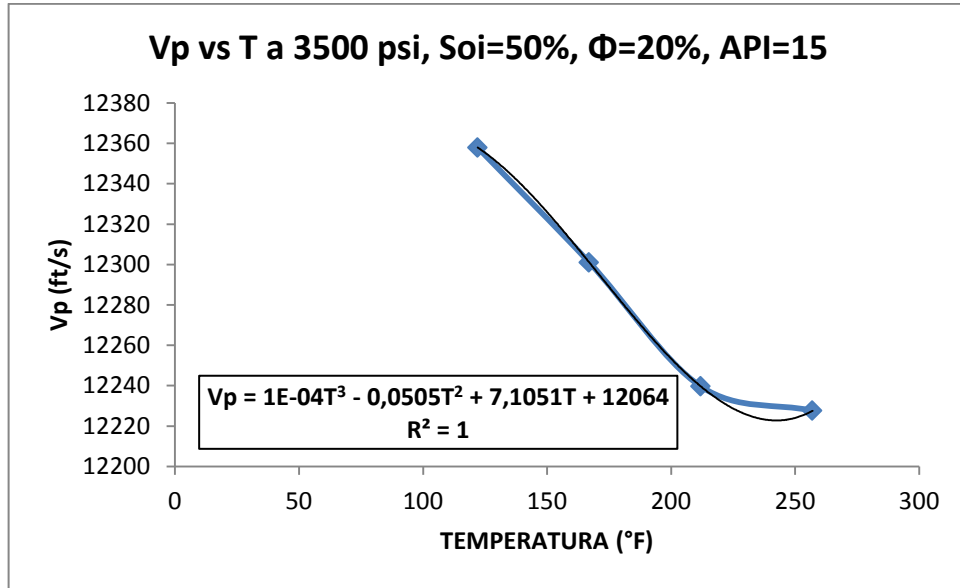
FUENTE: Los Autores

**Figura 133. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=50\%$ , 3000 PSI**



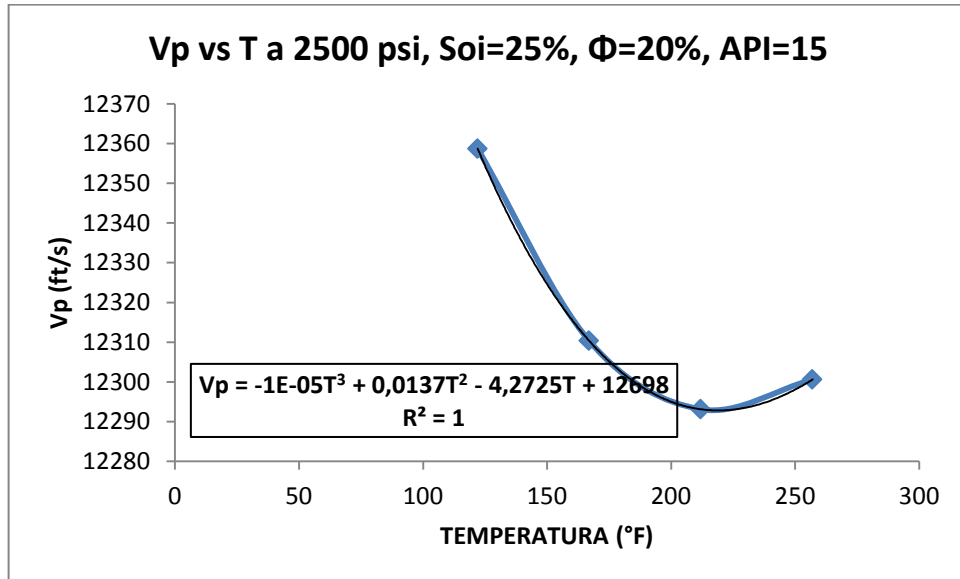
FUENTE: Los Autores

**Figura 134. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $So_i=50\%$ , 3500 PSI**



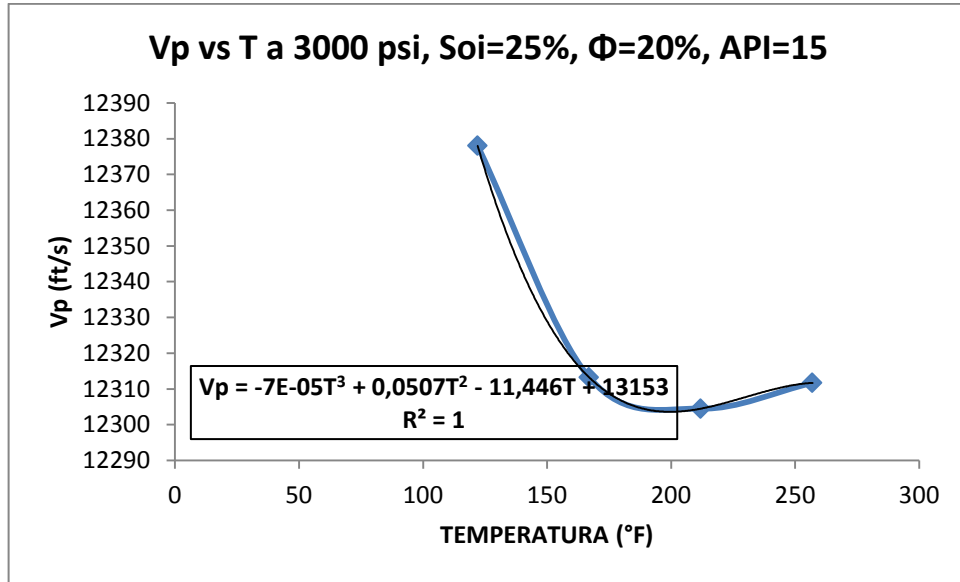
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 135. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $So_i=25\%$ , 2500 PSI**



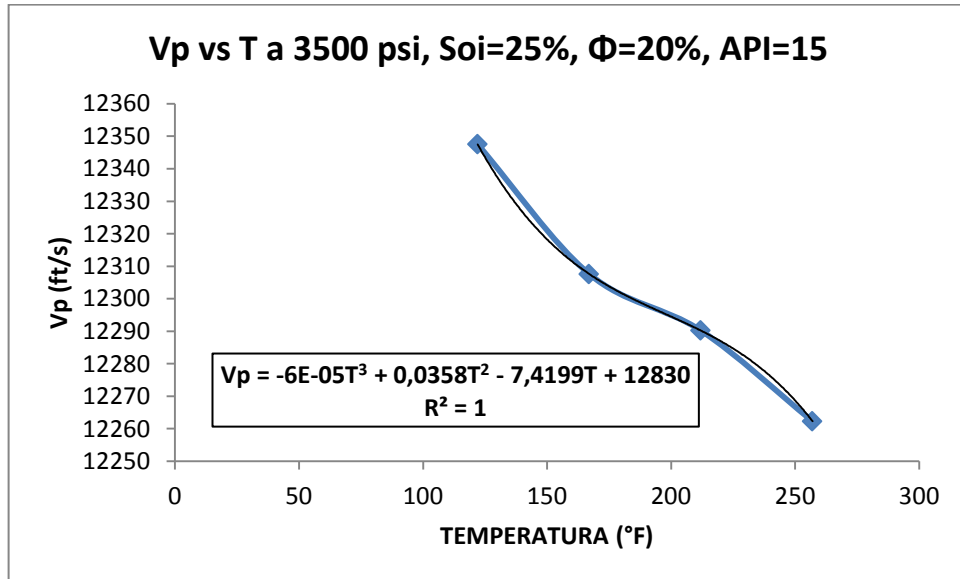
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 136. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=25\%$ , 3000 PSI**



**FUENTE: Los Autores**

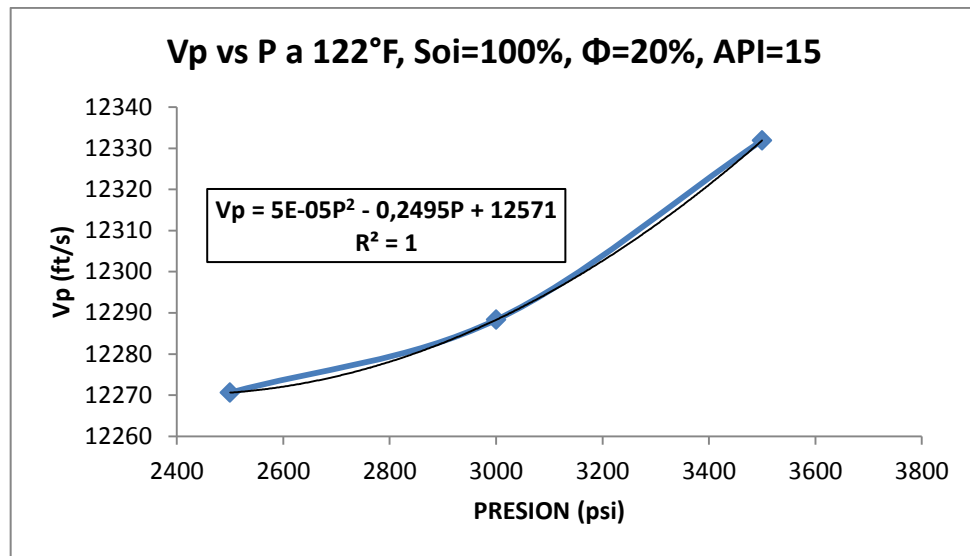
**Figura 137. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=25\%$ , 3500 PSI**



**FUENTE: Los Autores**

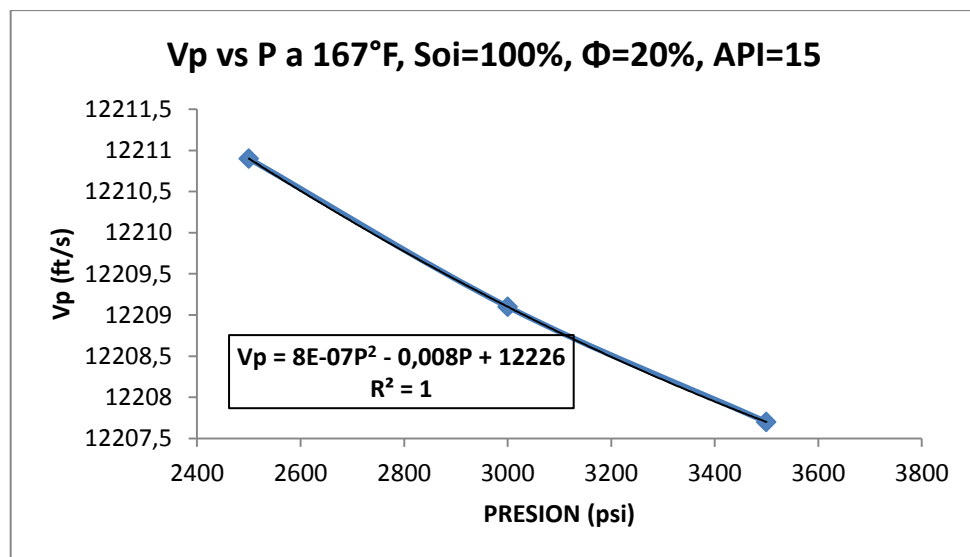
#### 4.5.2 ONDA COMPRESIONAL CONTRA PRESION A DISTINTAS TEMPERATURAS, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE PETROLEO

Figura 138. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=100\%$ ,  $122^\circ F$



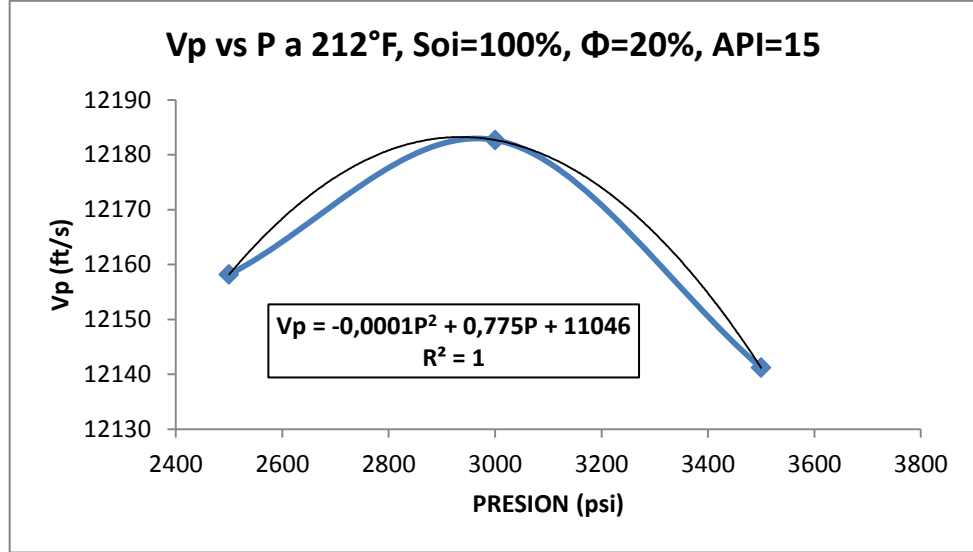
FUENTE: Los Autores

Figura 139. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=100\%$ ,  $167^\circ F$



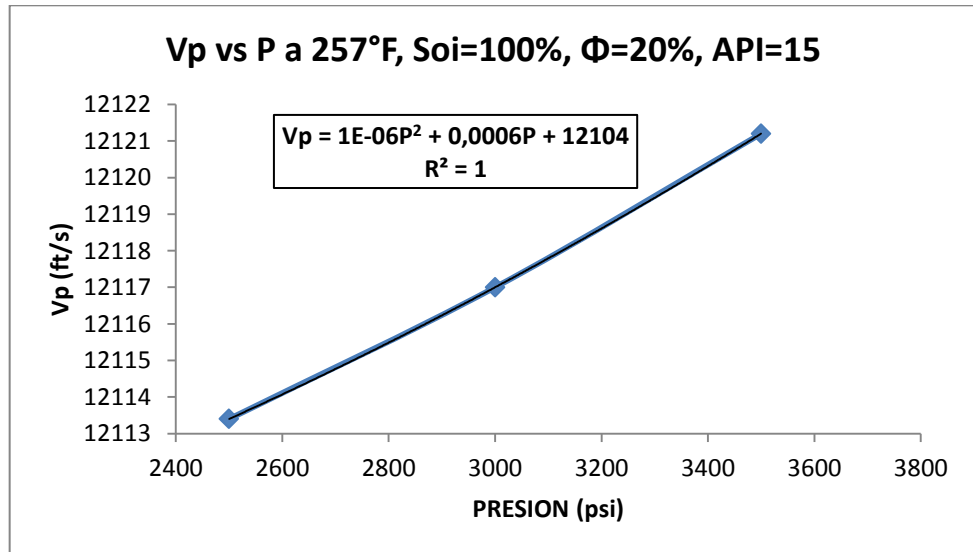
FUENTE: Los Autores

**Figura 140. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=100\%$ ,  $212^{\circ}F$**



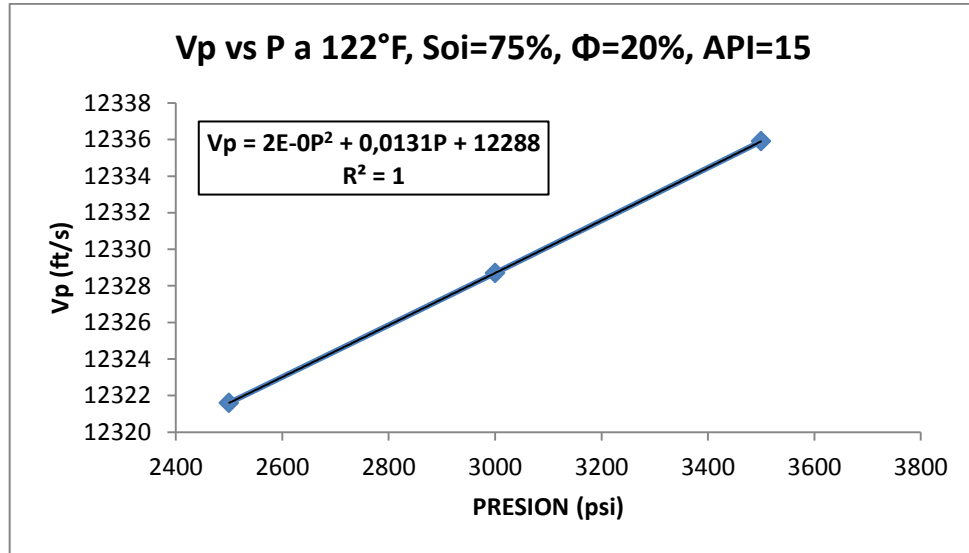
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 141. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=100\%$ ,  $257^{\circ}F$**



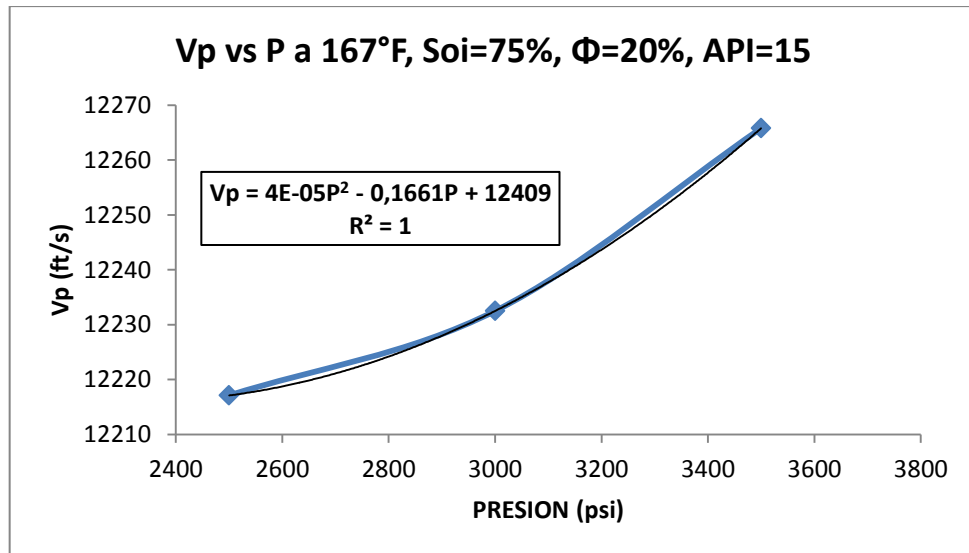
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 142. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_o_i=75\%$ ,  $122^\circ F$**



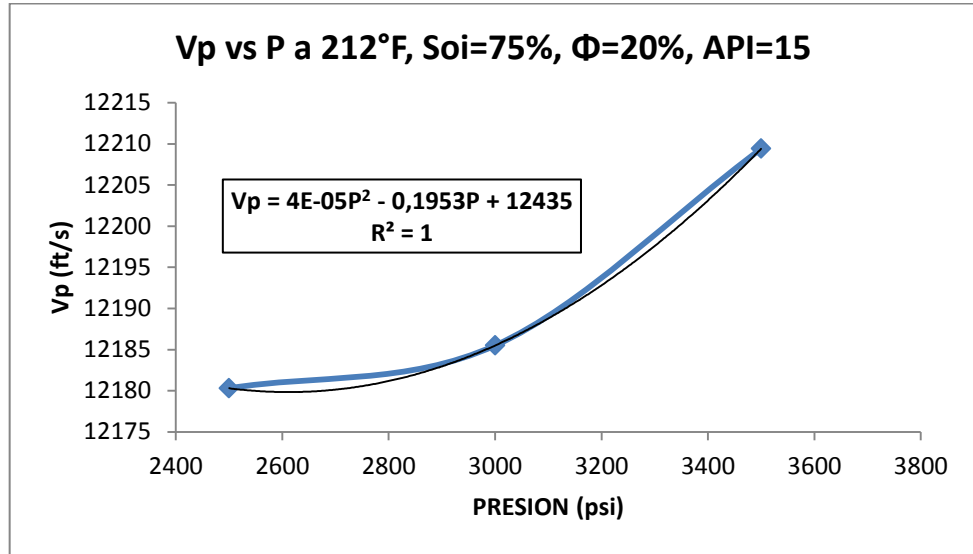
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 143. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_o_i=75\%$ ,  $167^\circ F$**



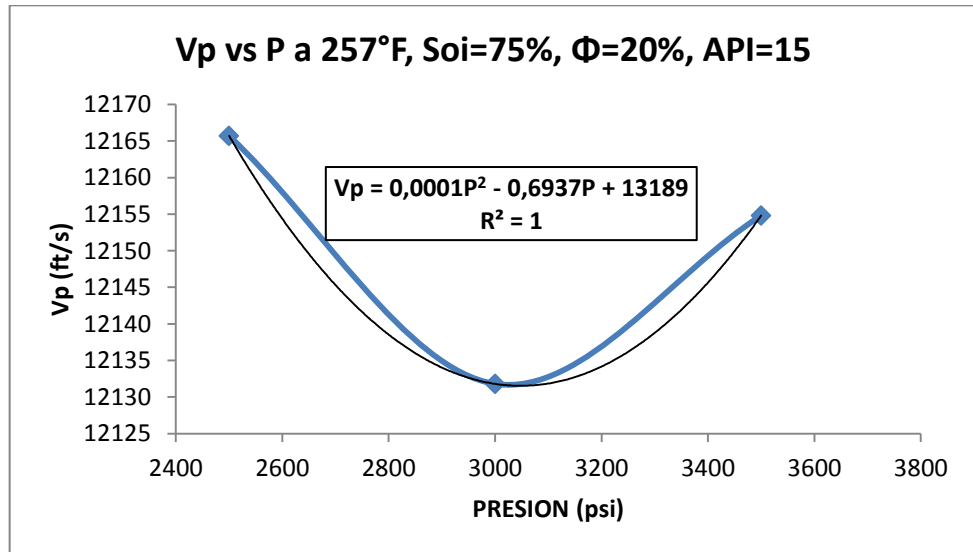
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 144. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $212^{\circ}F$**



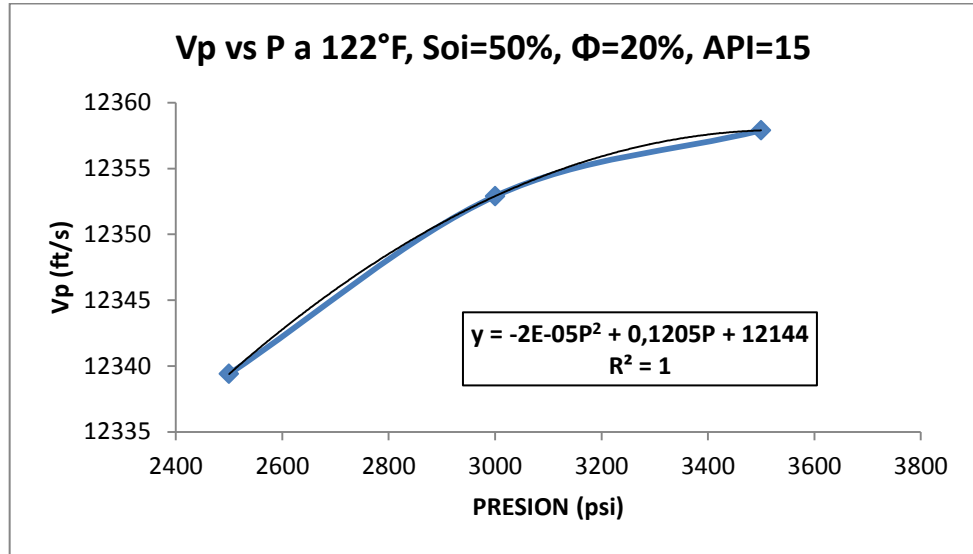
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 145. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $257^{\circ}F$**



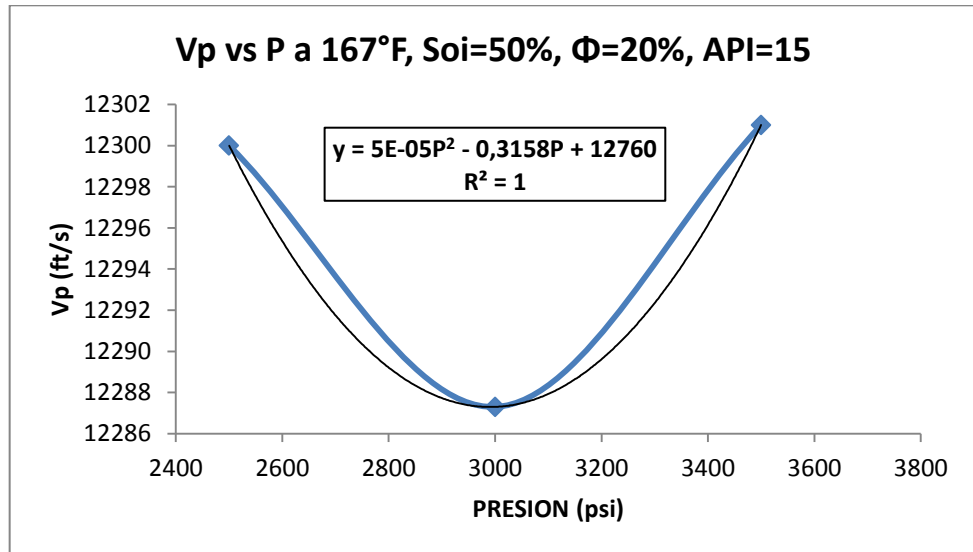
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 146. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $122^\circ F$**



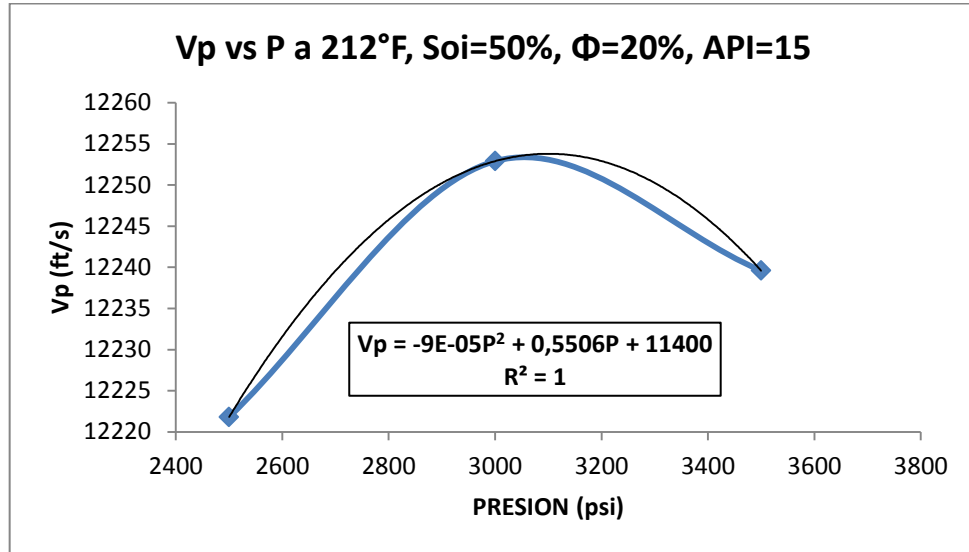
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 147. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $167^\circ F$**



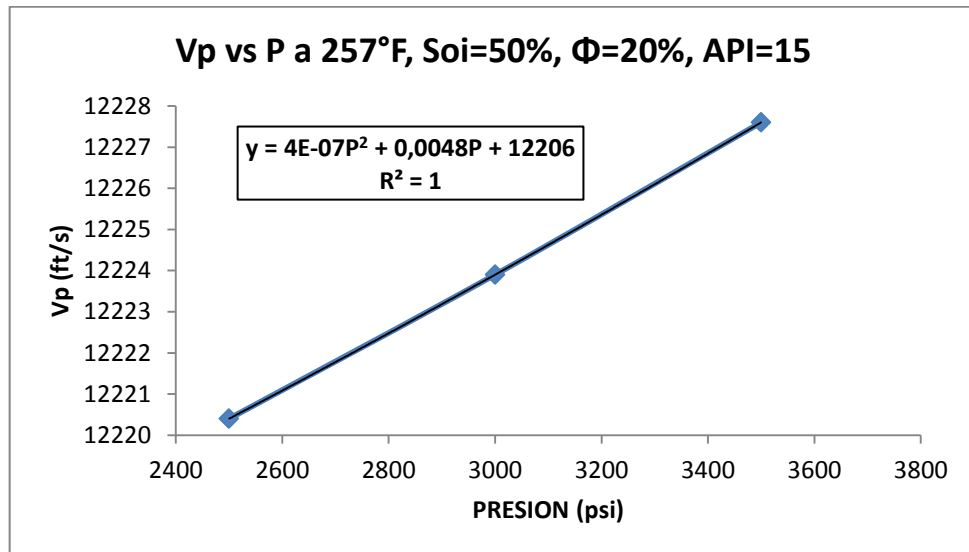
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 148. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $212^{\circ}F$**



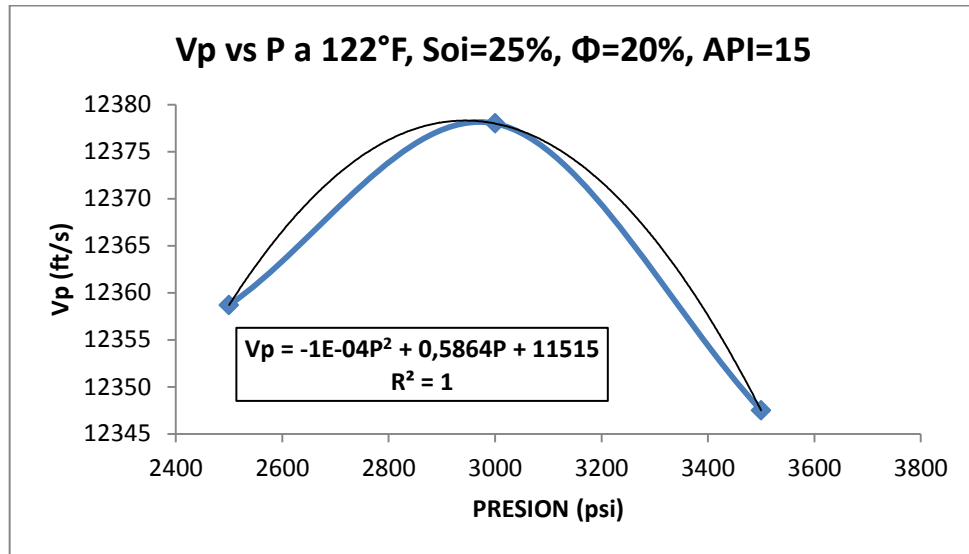
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 149. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $257^{\circ}F$**



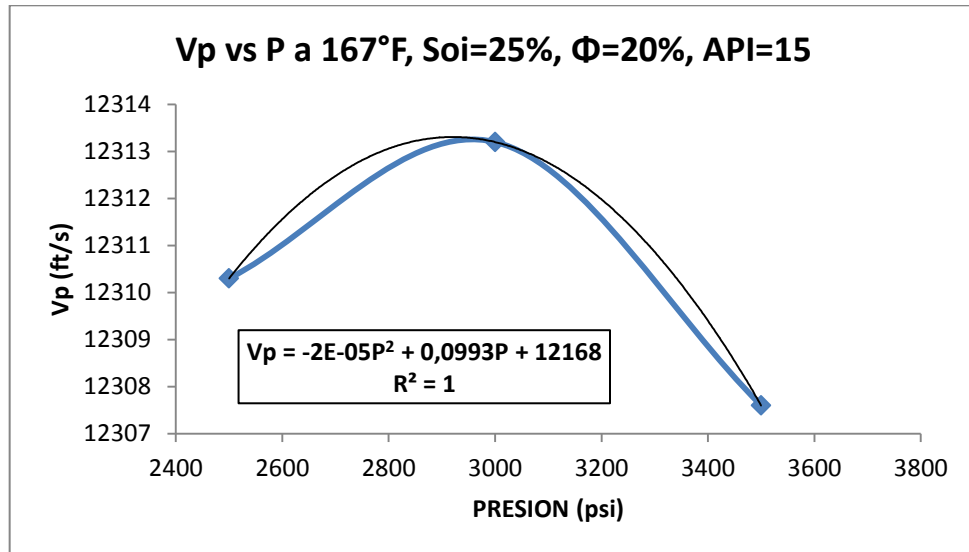
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 150. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $122^\circ F$**



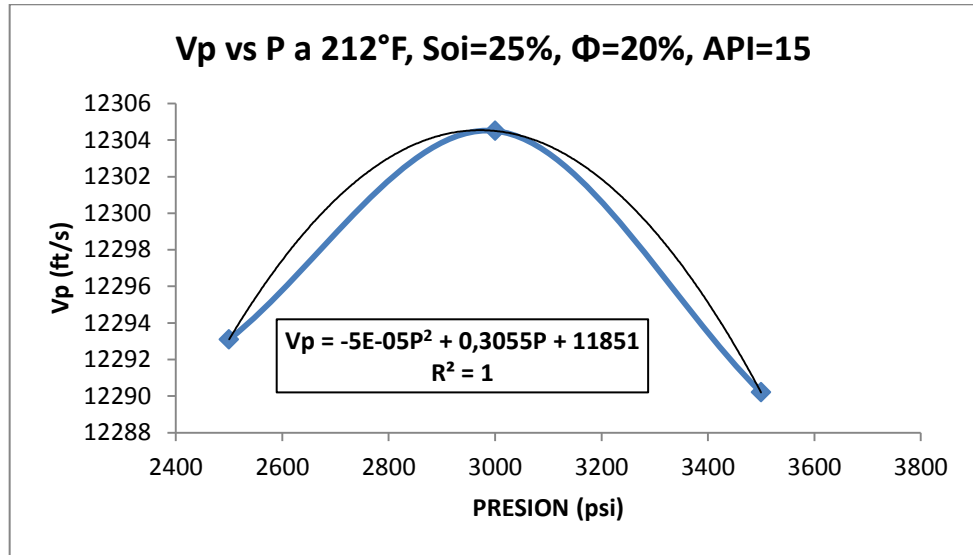
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 151. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $167^\circ F$**



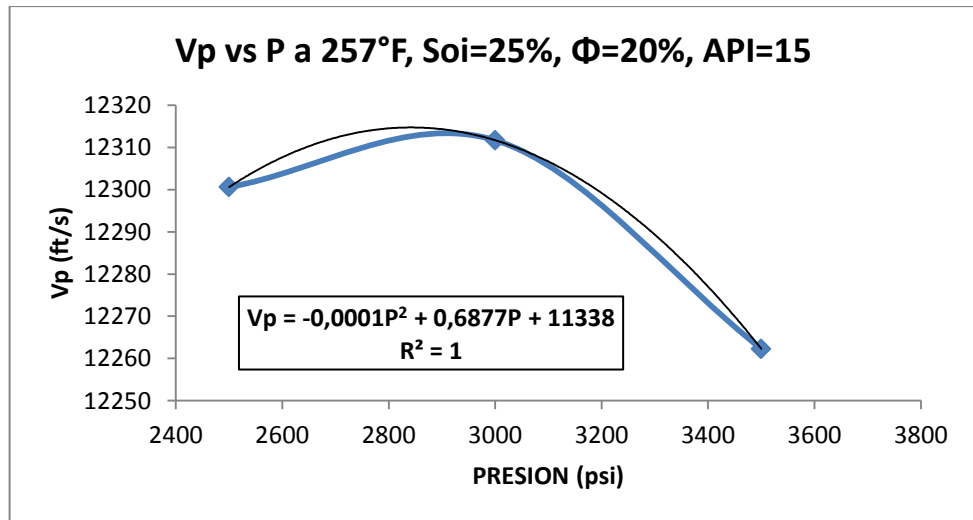
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 152. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $212^{\circ}F$**



**FUENTE: Los Autores**

**Figura 153. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $257^{\circ}F$**

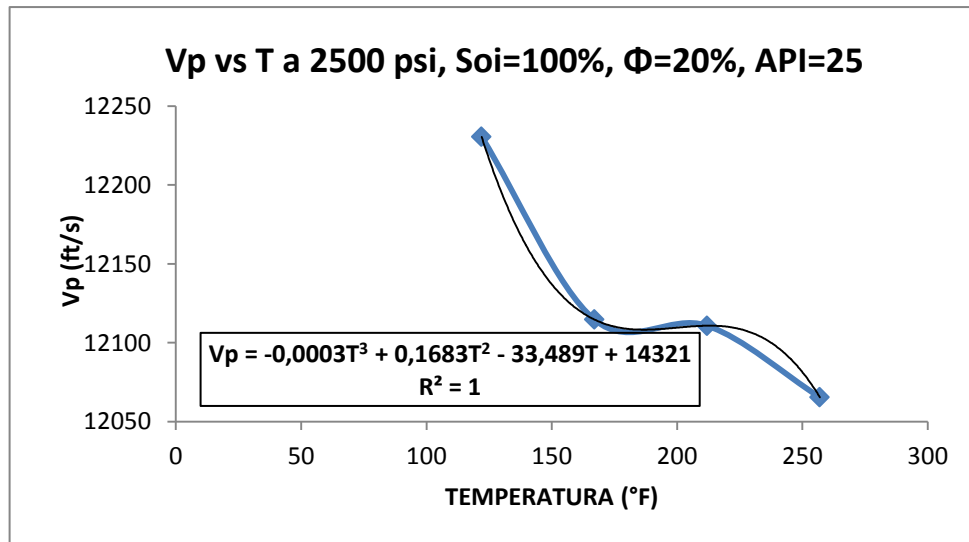


**FUENTE: Los Autores**

#### 4.6 CASO 6: POROSIDAD DEL 20% Y PETROLEO DE 25°API

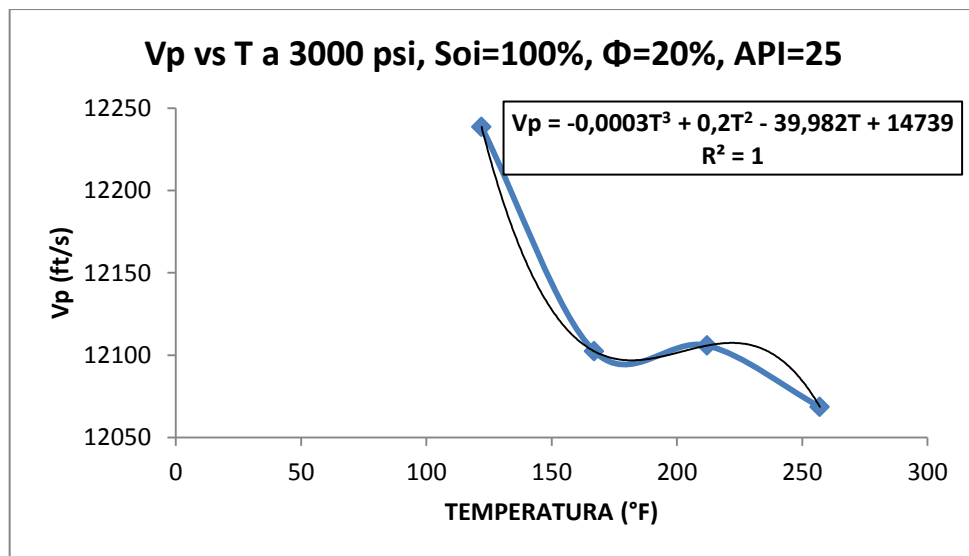
##### 4.6.1 ONDA COMPRESIONAL CONTRA TEMPERATURA A DISTINTAS PRESIONES, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE ACEITE

Figura 154. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=100\%$ , 2500 PSI



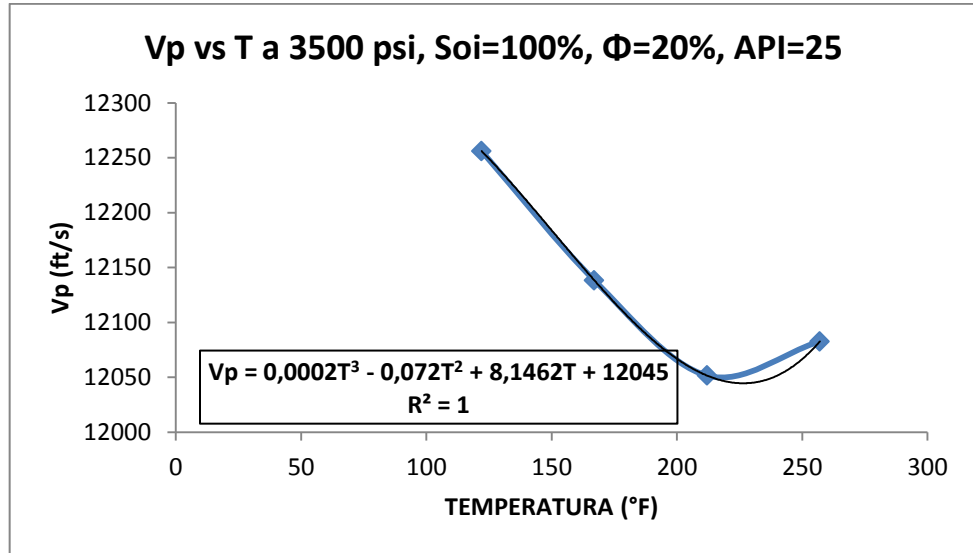
FUENTE: Los Autores

Figura 155. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=100\%$ , 3000 PSI



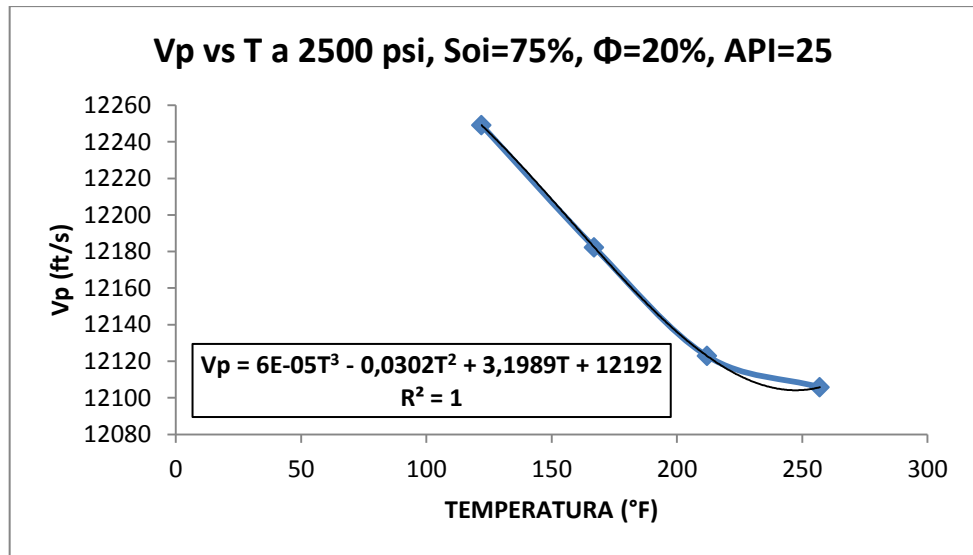
FUENTE: Los Autores

**Figura 156. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=100\%$ , 3500 PSI**



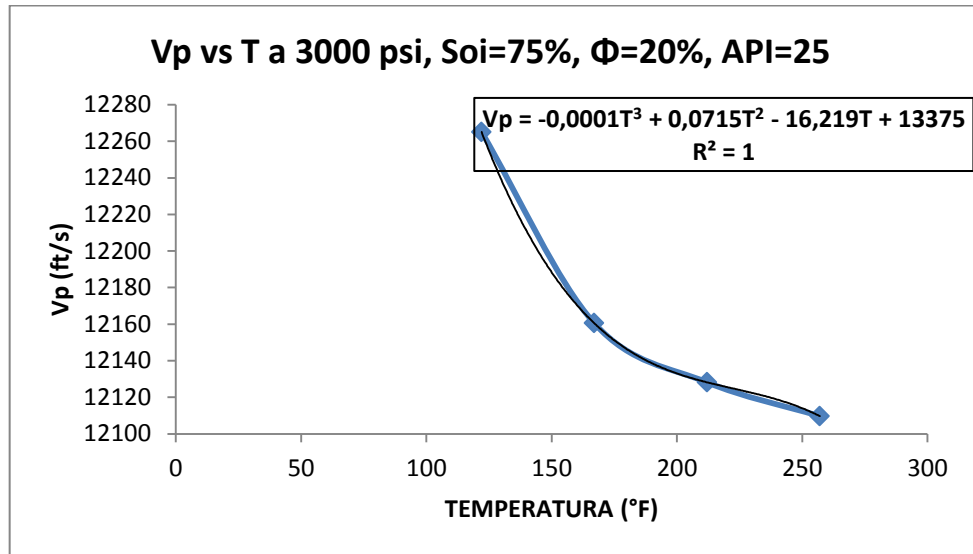
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 157. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=75\%$ , 2500 PSI**



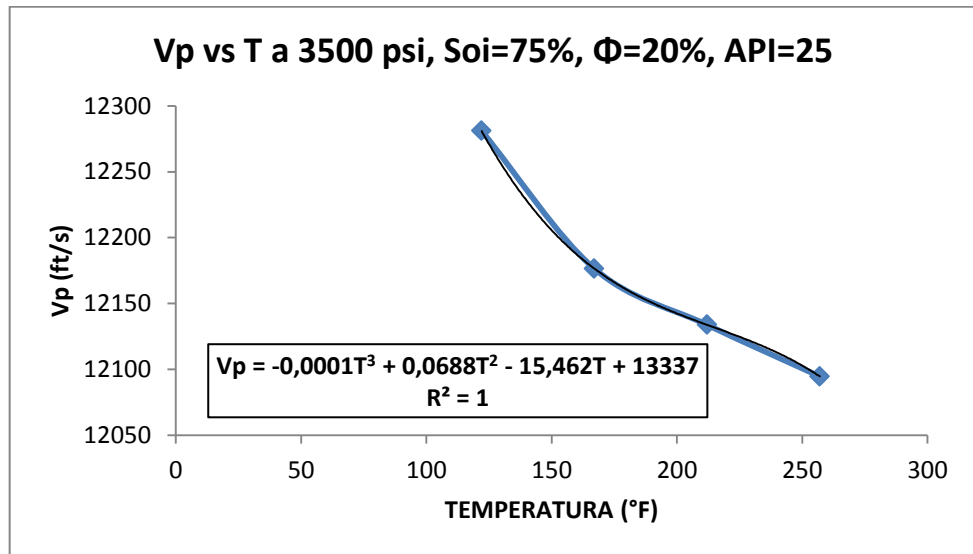
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 158. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=75\%$ , 3000 PSI**



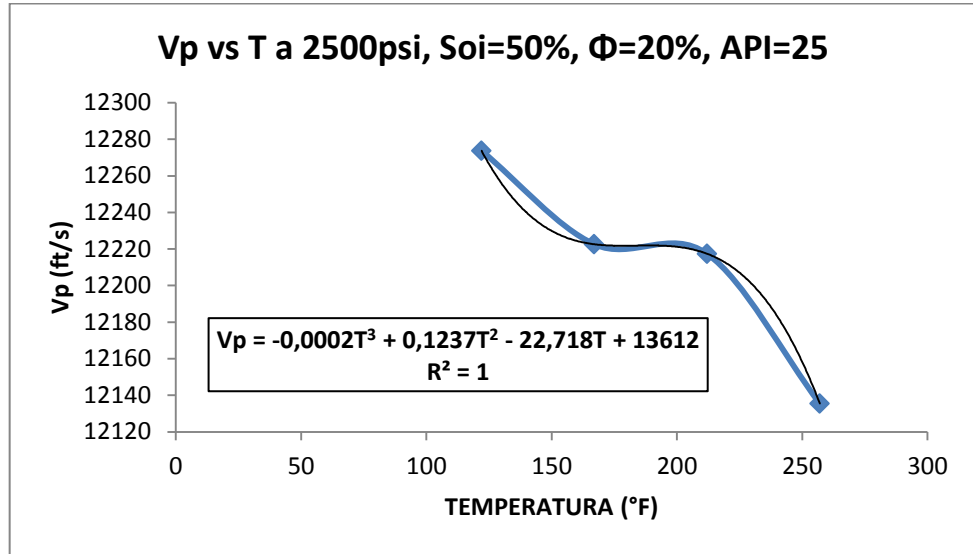
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 159. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=75\%$ , 3500 PSI**



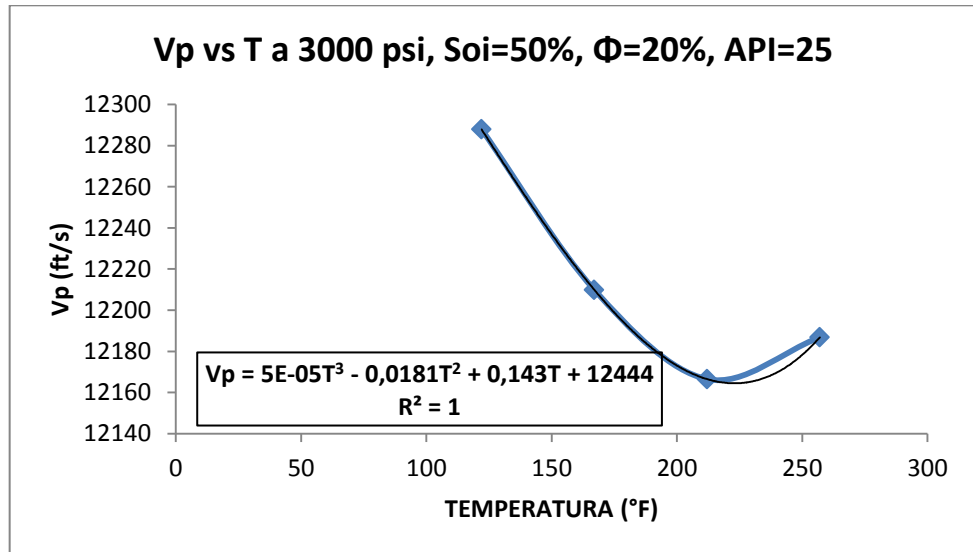
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 160. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=50\%$ , 2500 PSI**



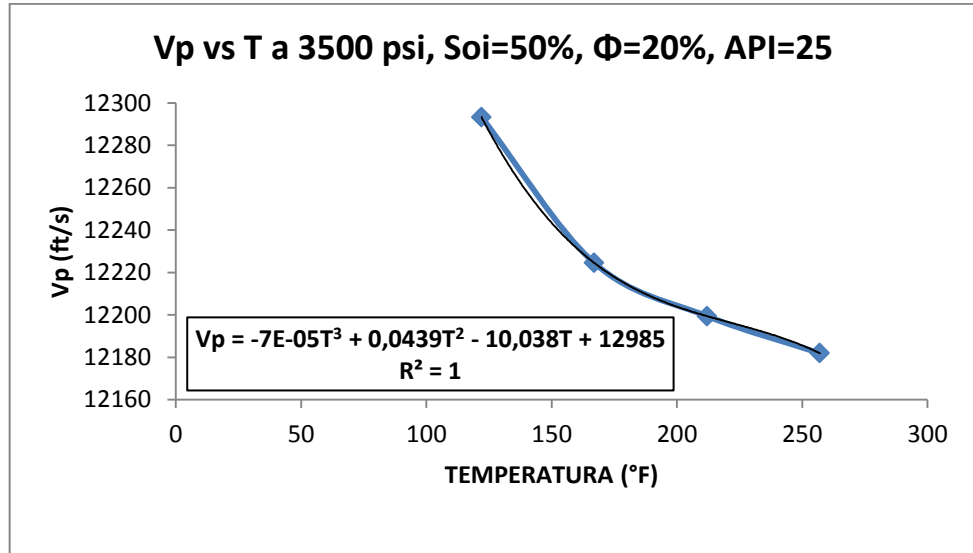
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 161. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=50\%$ , 3000 PSI**



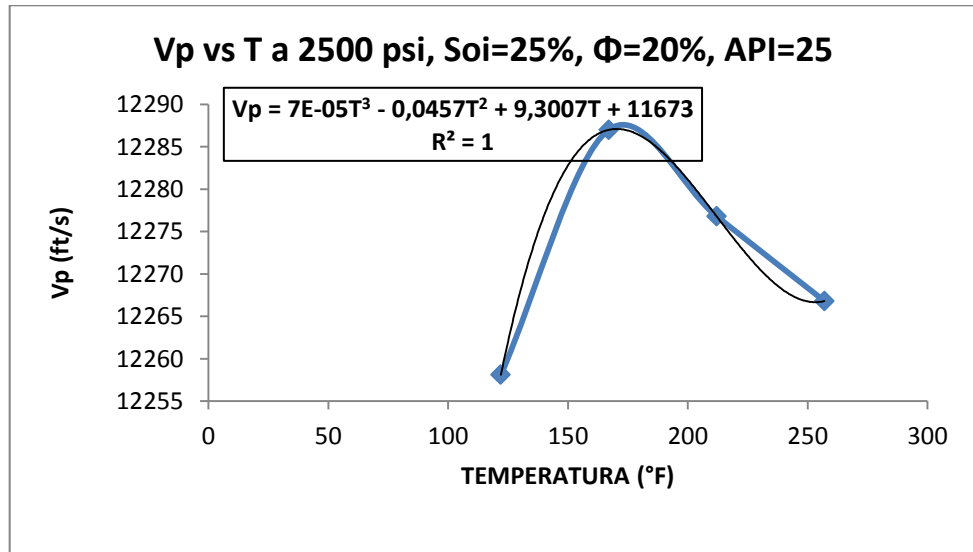
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 162. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=50\%$ , 3500 PSI**



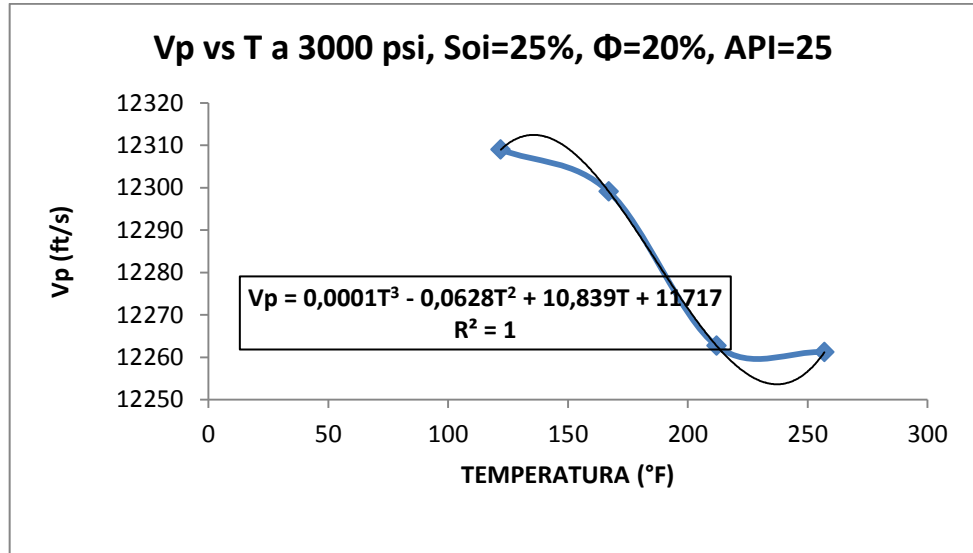
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 163. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=25\%$ , 2500 PSI**



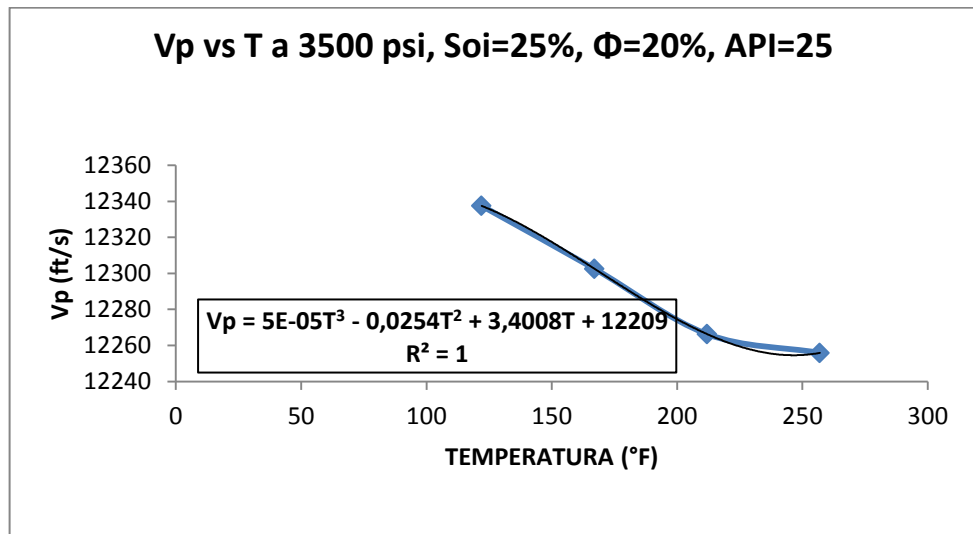
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 164. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=25\%$ , 3000 PSI**



**FUENTE: Los Autores**

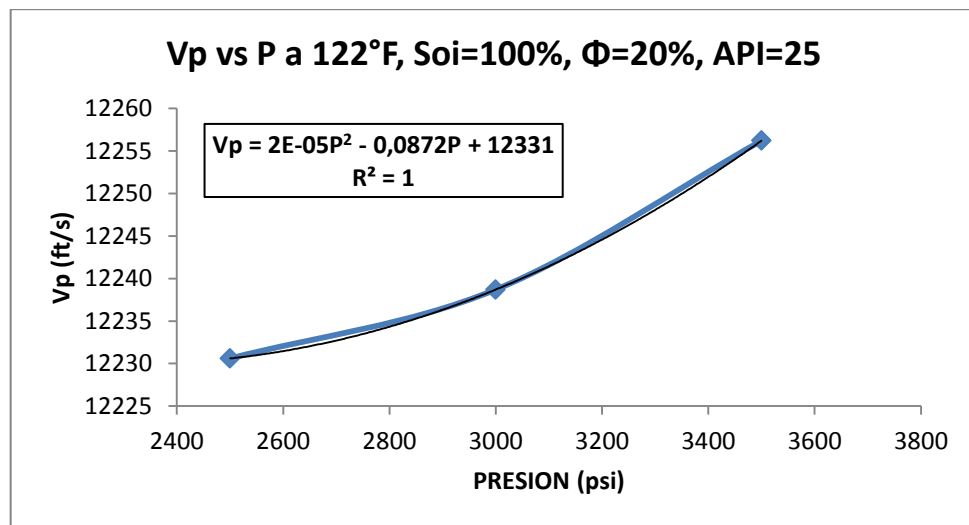
**Figura 165. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=25\%$ , 3500 PSI**



**FUENTE: Los Autores**

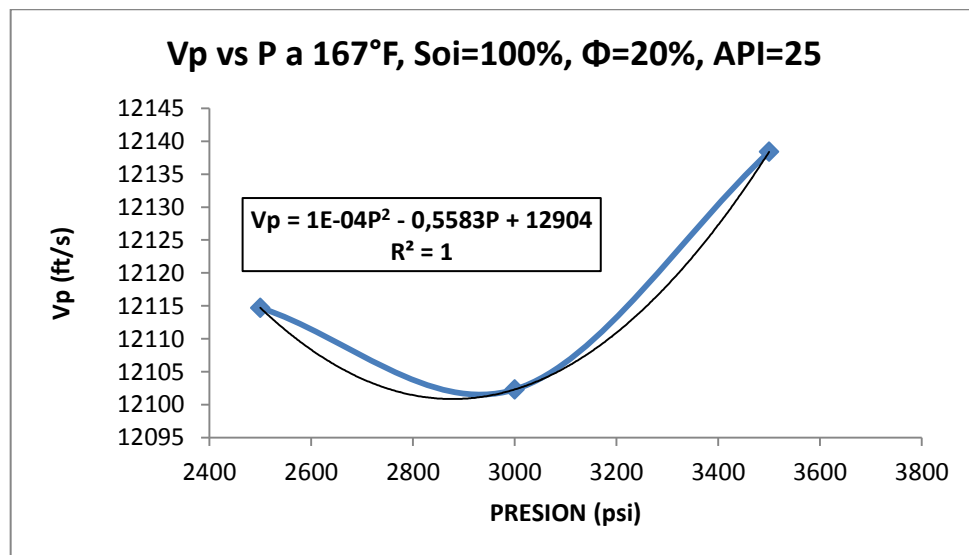
#### 4.6.2 ONDA COMPRESIONAL CONTRA PRESION A DISTINTAS TEMPERATURAS, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE PETROLEO

Figura 166. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=100\%$ ,  $122^\circ\text{F}$



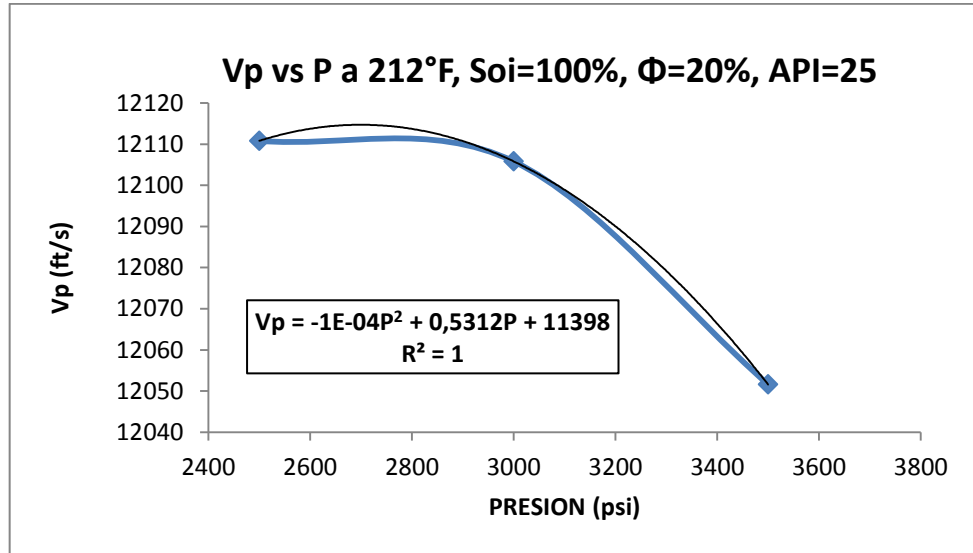
FUENTE: Los Autores

Figura 167. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=100\%$ ,  $167^\circ\text{F}$



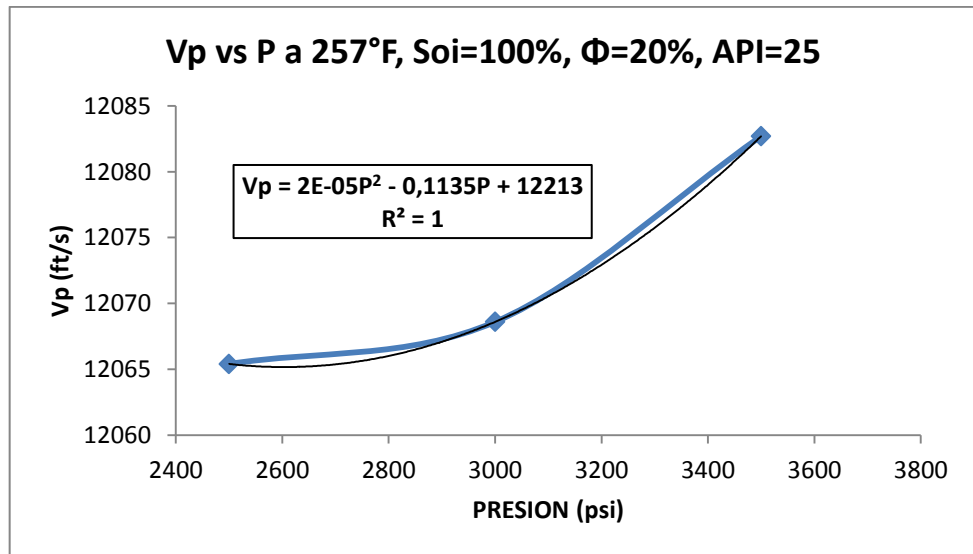
FUENTE: Los Autores

**Figura 168. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=100\%$ ,  $212^{\circ}F$**



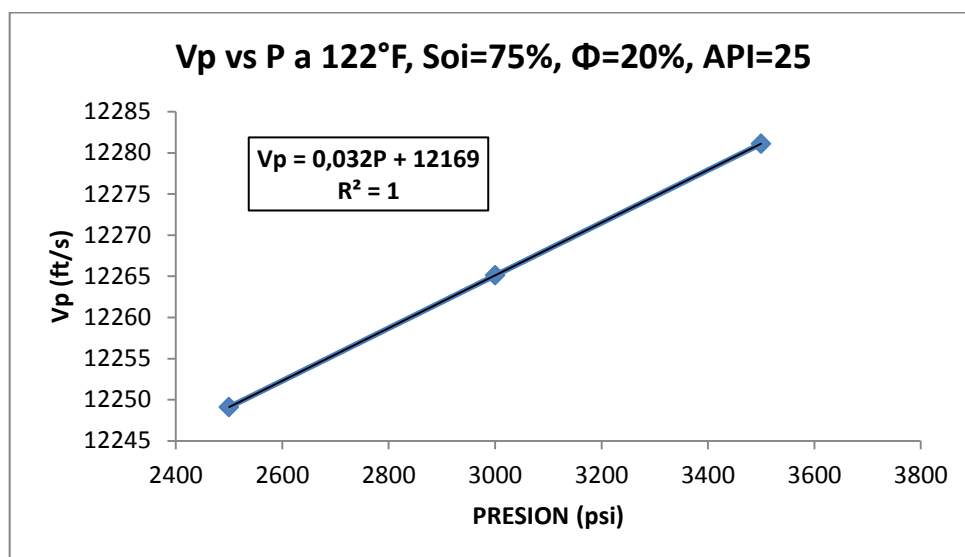
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 169. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=100\%$ ,  $257^{\circ}F$**



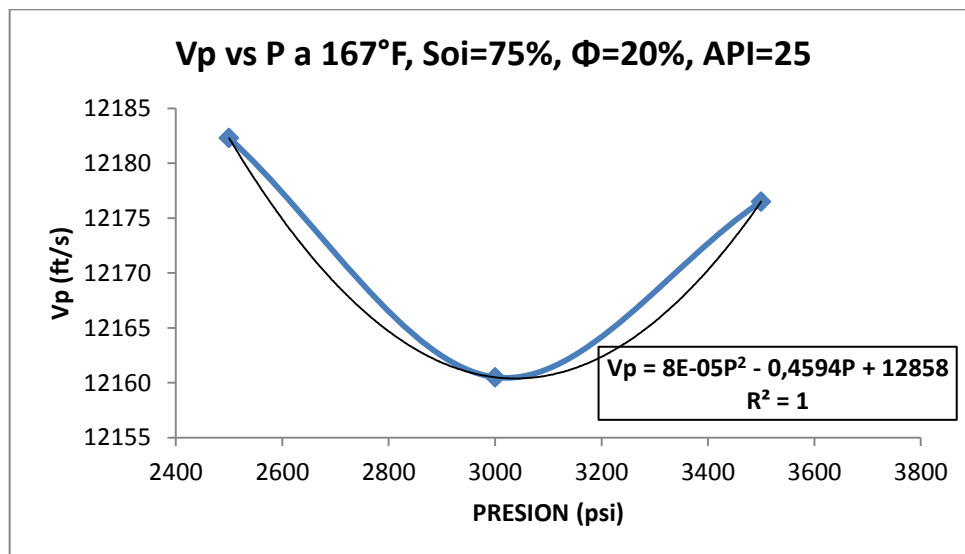
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 170. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $122^{\circ}F$**



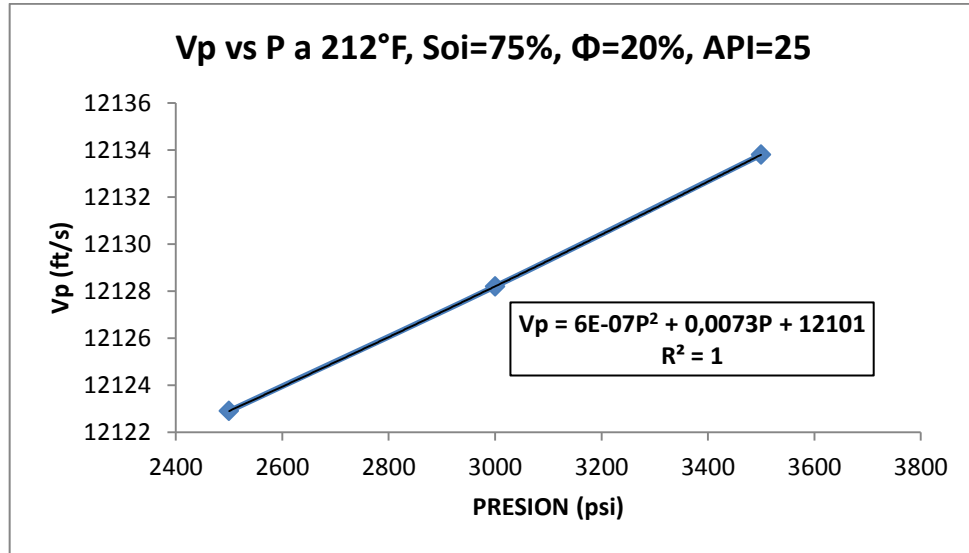
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 171. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $167^{\circ}F$**



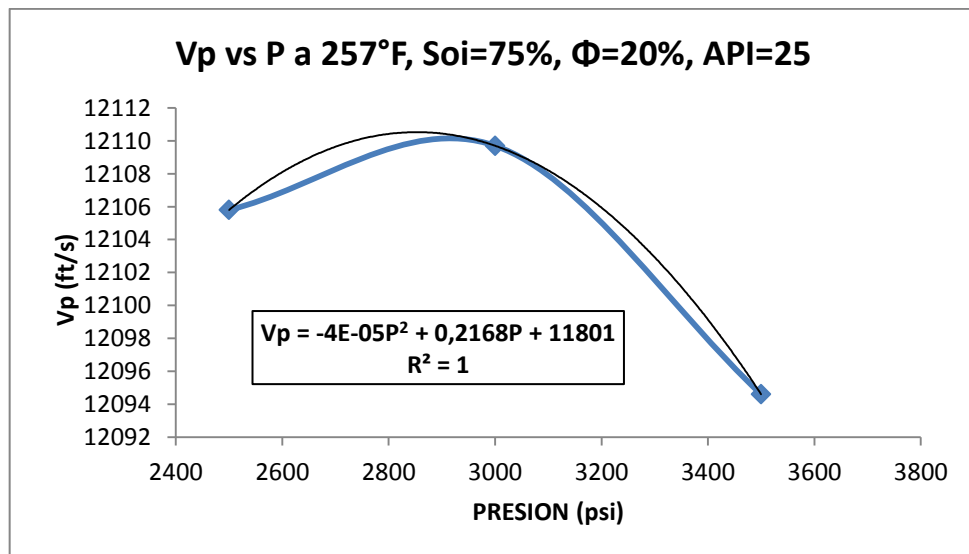
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 172. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $212^{\circ}F$**



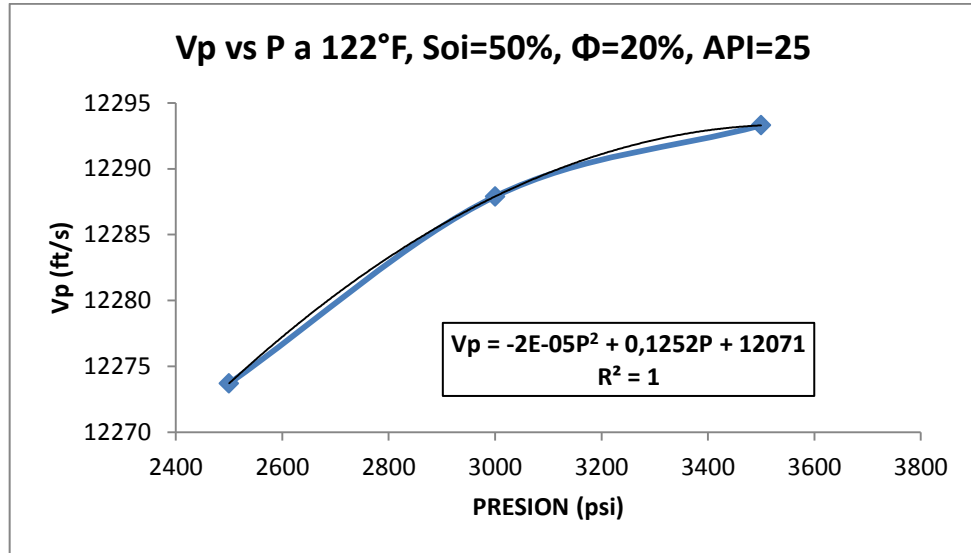
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 173. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $257^{\circ}F$**



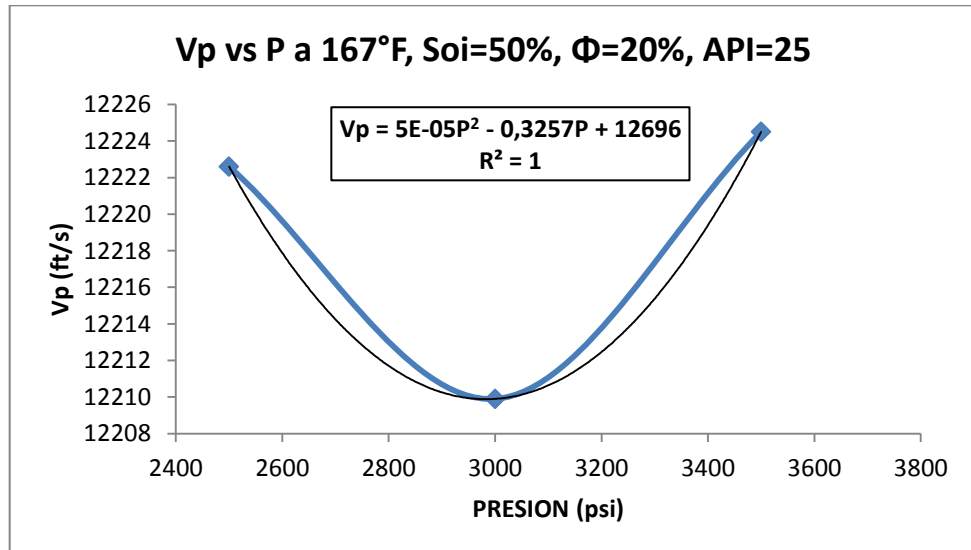
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 174. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_o_i=50\%$ ,  $122^\circ\text{F}$**



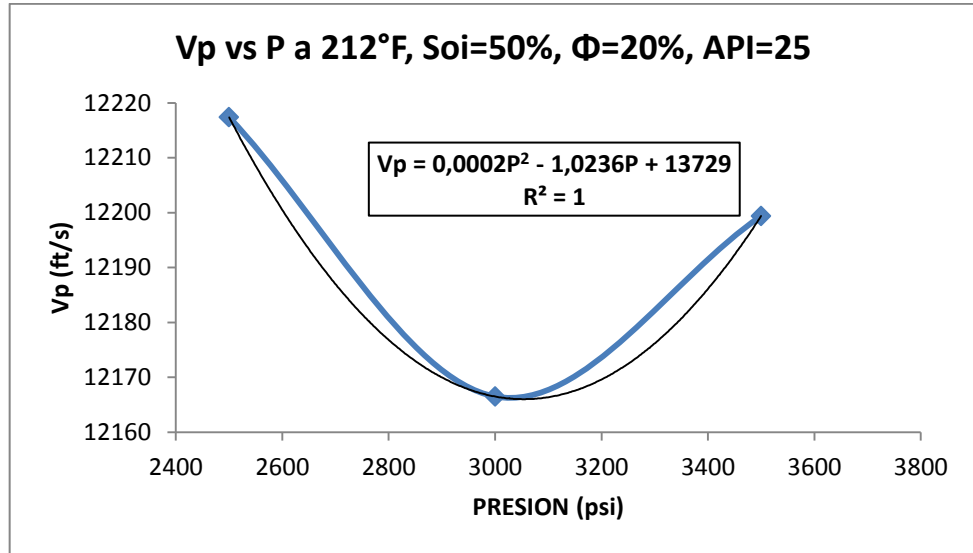
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 175. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_o_i=50\%$ ,  $167^\circ\text{F}$**



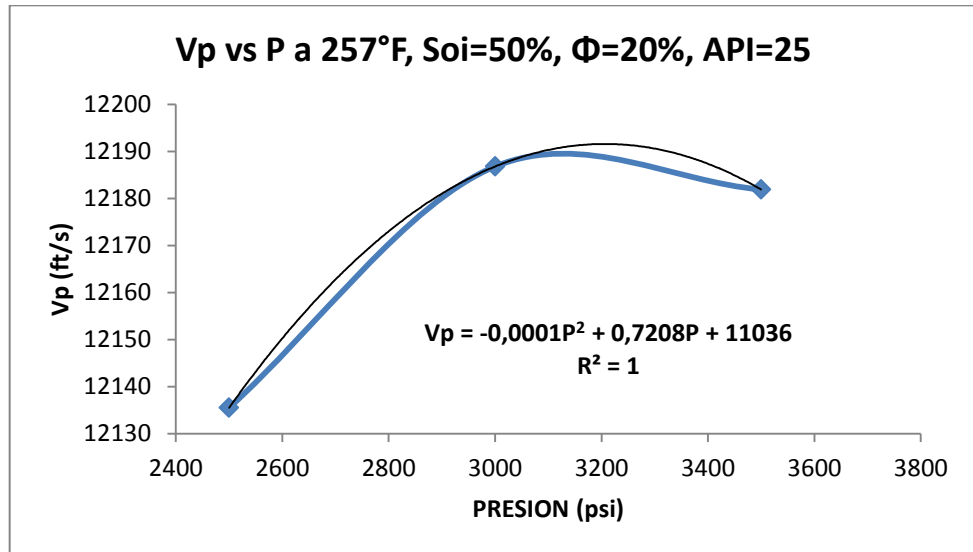
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 176. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $212^{\circ}F$**



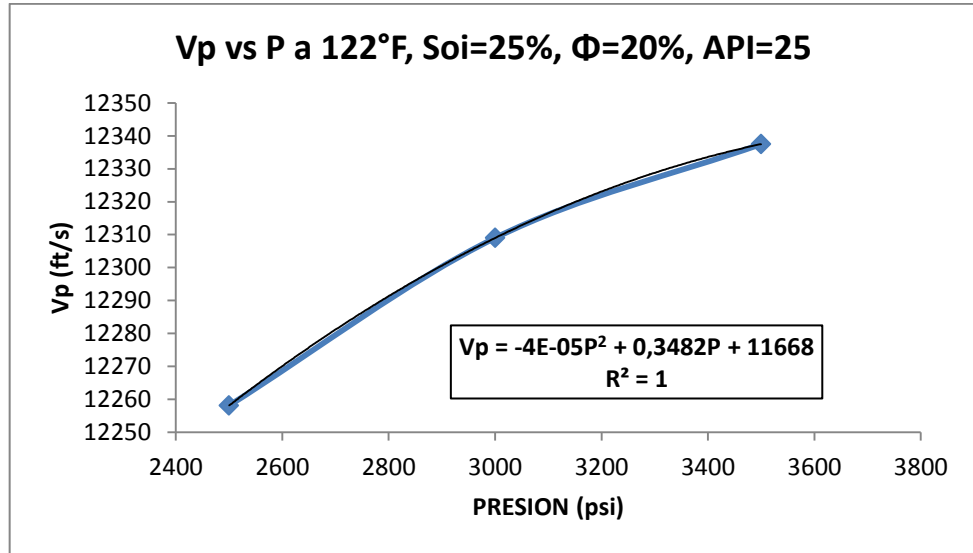
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 177 Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $257^{\circ}F$**



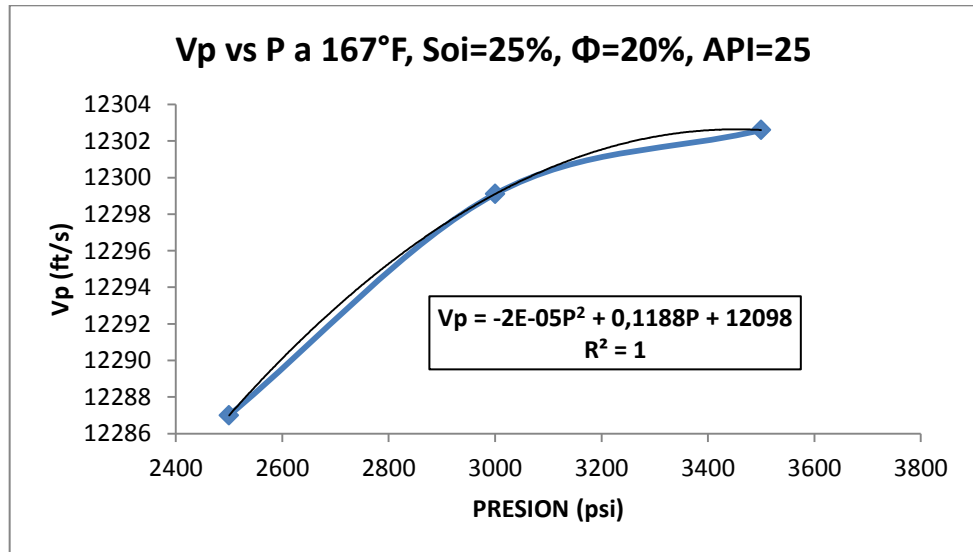
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 178. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $122^{\circ}F$**



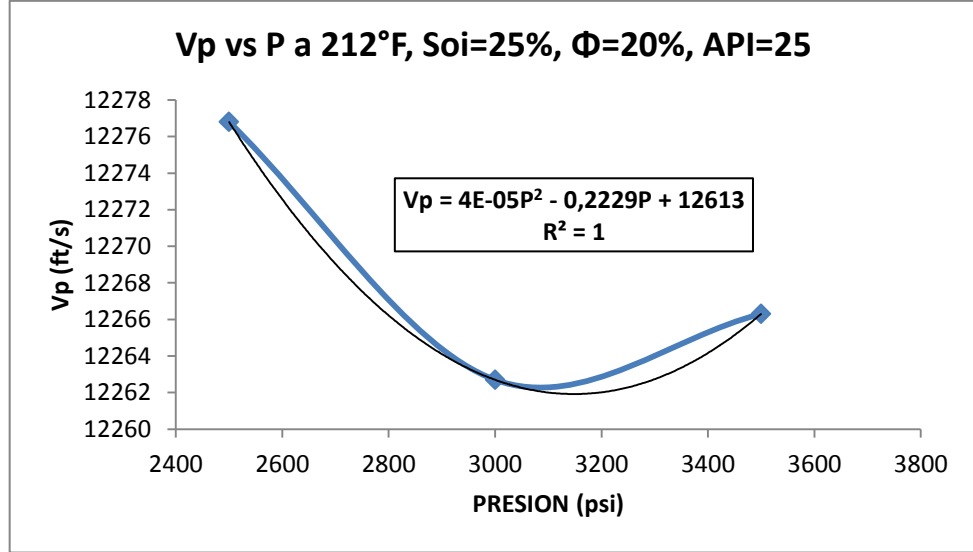
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 179. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $167^{\circ}F$**



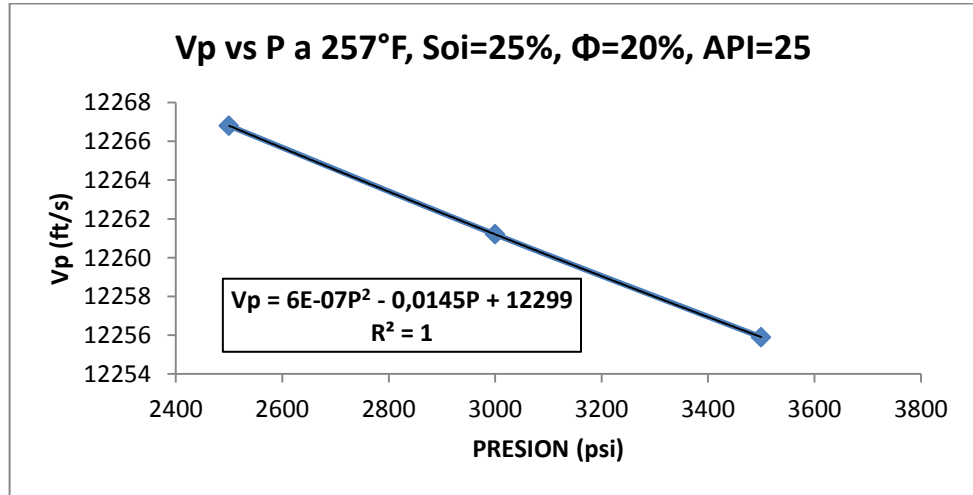
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 180. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $212^{\circ}\text{F}$**



**FUENTE: Los Autores**

**Figura 181. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $257^{\circ}\text{F}$**

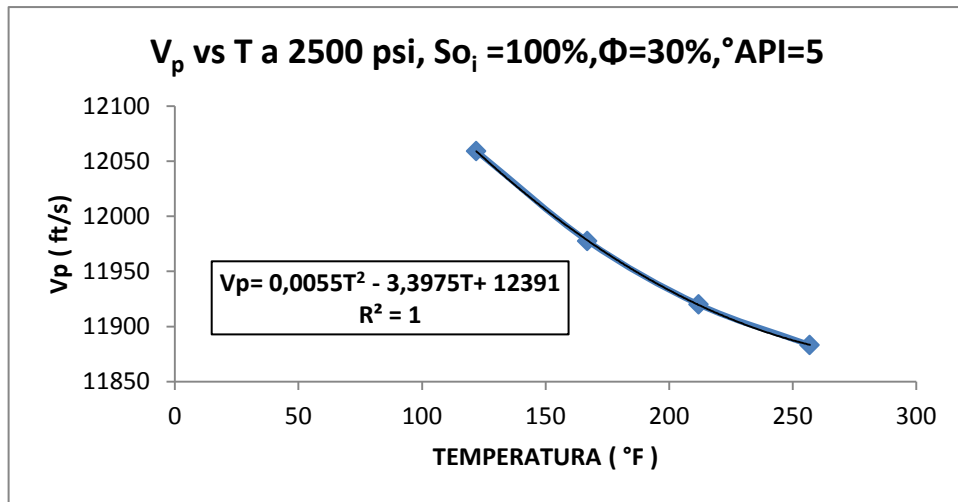


**FUENTE: Los Autores**

#### 4.7 CASO 7: POROSIDAD DEL 30% Y PETROLEO DE 5° API

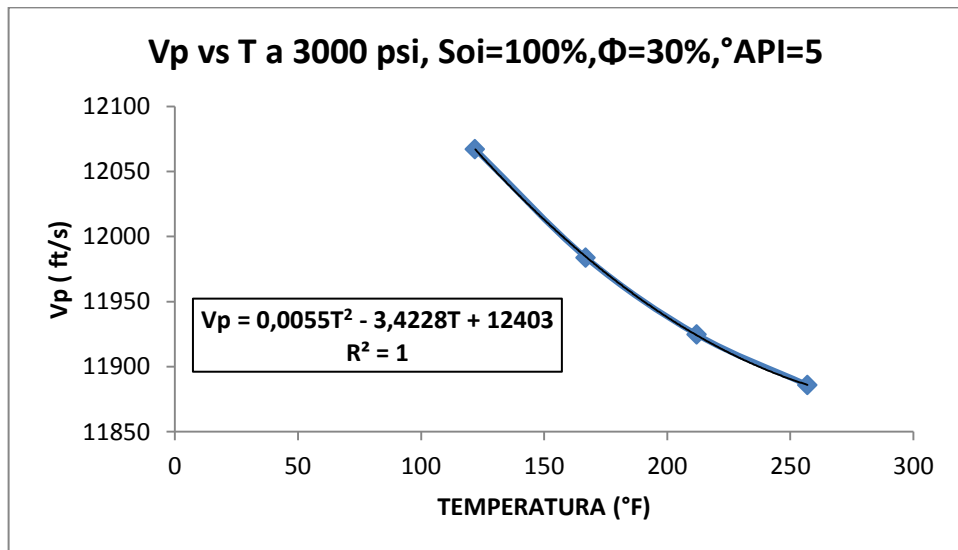
##### 4.7.1 ONDA COMPRESIONAL CONTRA TEMPERATURA A DISTINTAS PRESIONES, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE ACEITE

Figura 182. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=100\%$ , 2500 PSI



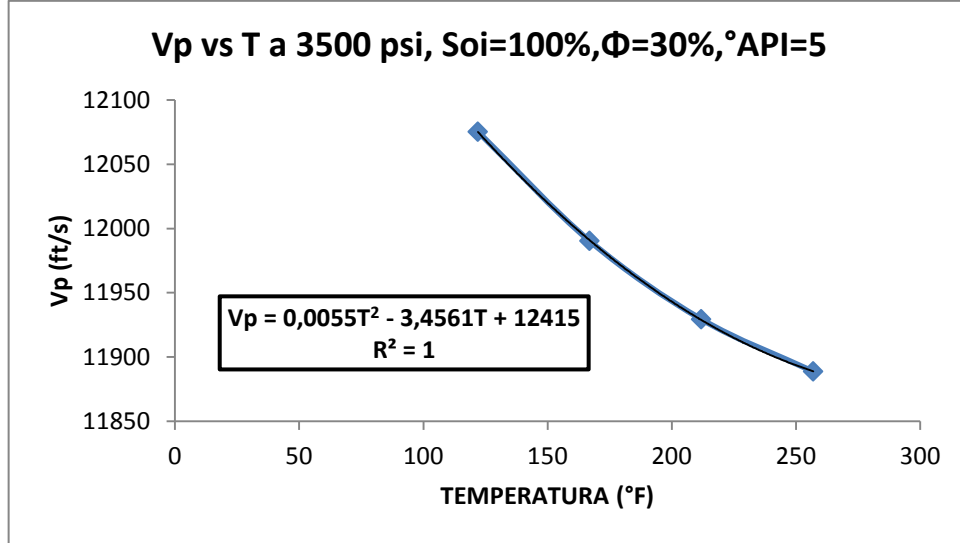
FUENTE: Los Autores

Figura 183. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=100\%$ , 3000 PSI



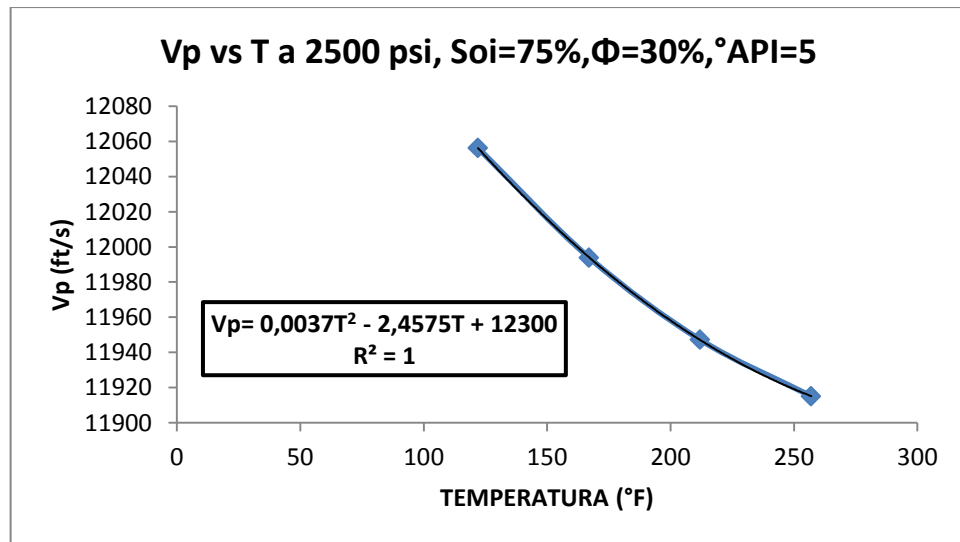
FUENTE: Los Autores

**Figura 184. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=100\%$ , 3500 PSI**



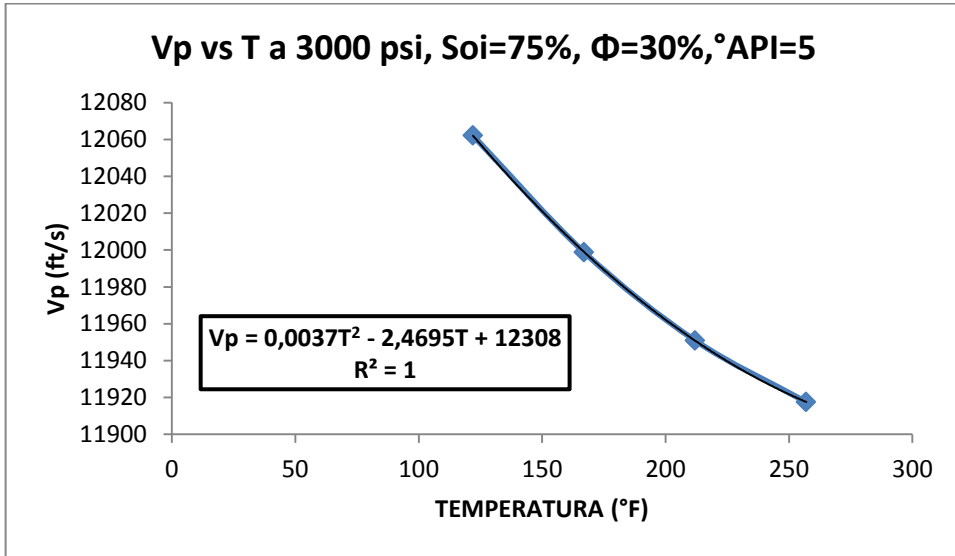
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 185. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=75\%$ , 2500 PSI**



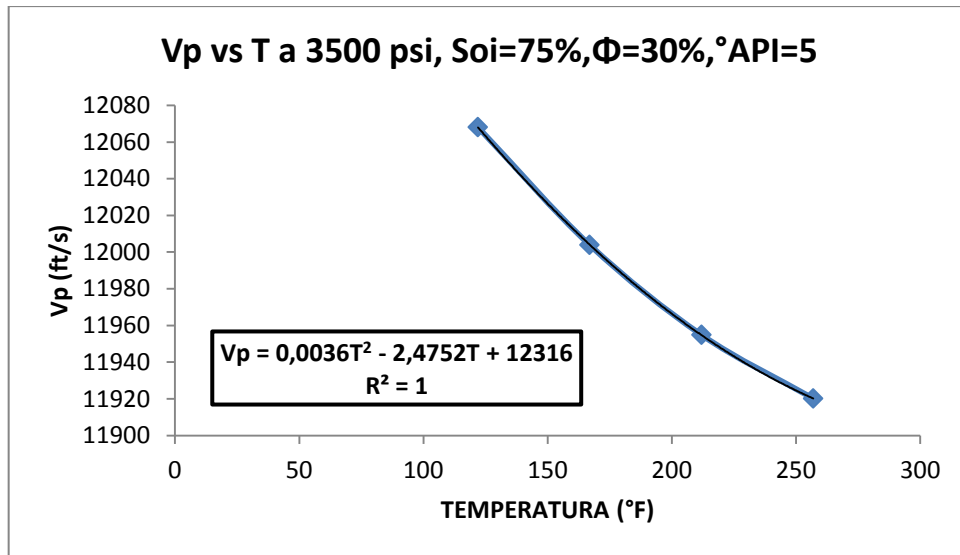
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 186. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=75\%$ , 3000 PSI**



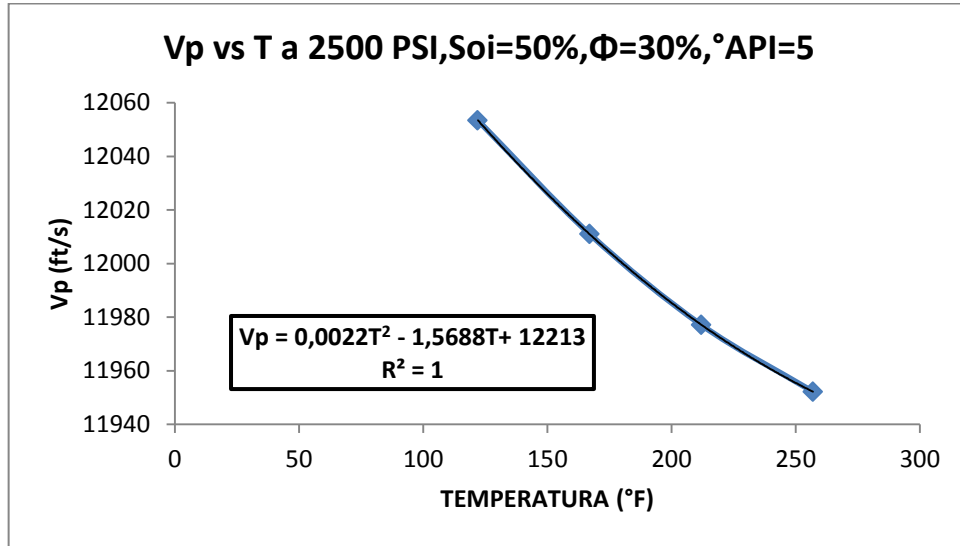
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 187. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=75\%$ , 3500 PSI**



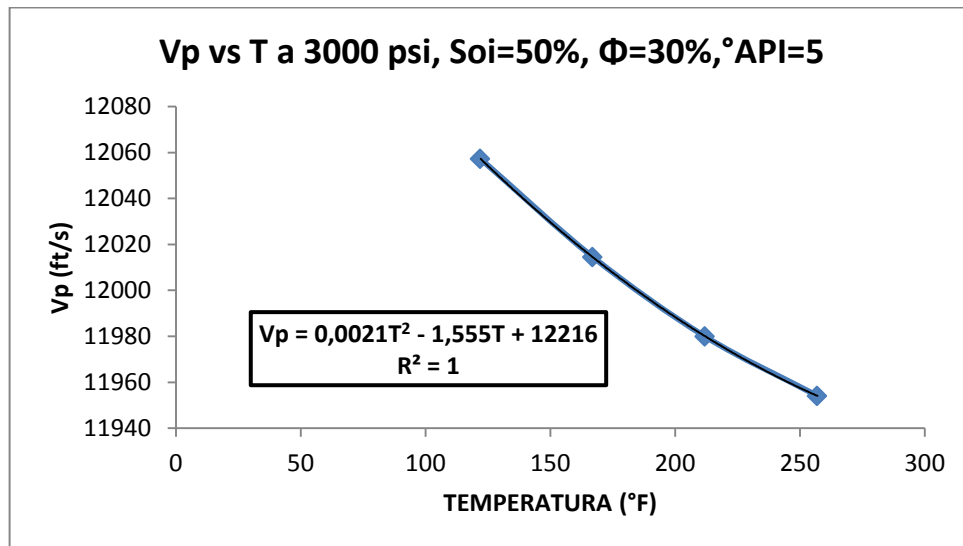
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 188. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=50\%$ , 2500 PSI**



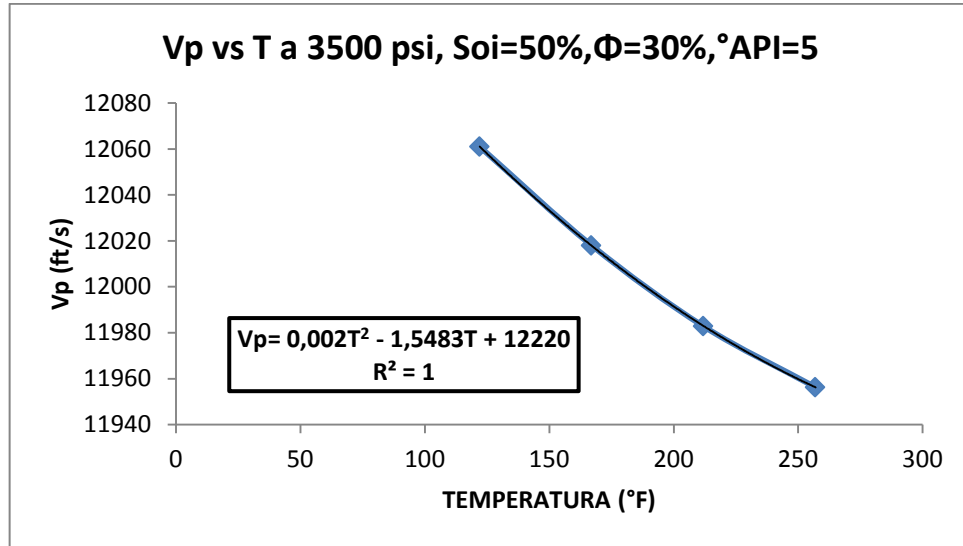
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 189. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=50\%$ , 3000 PSI**



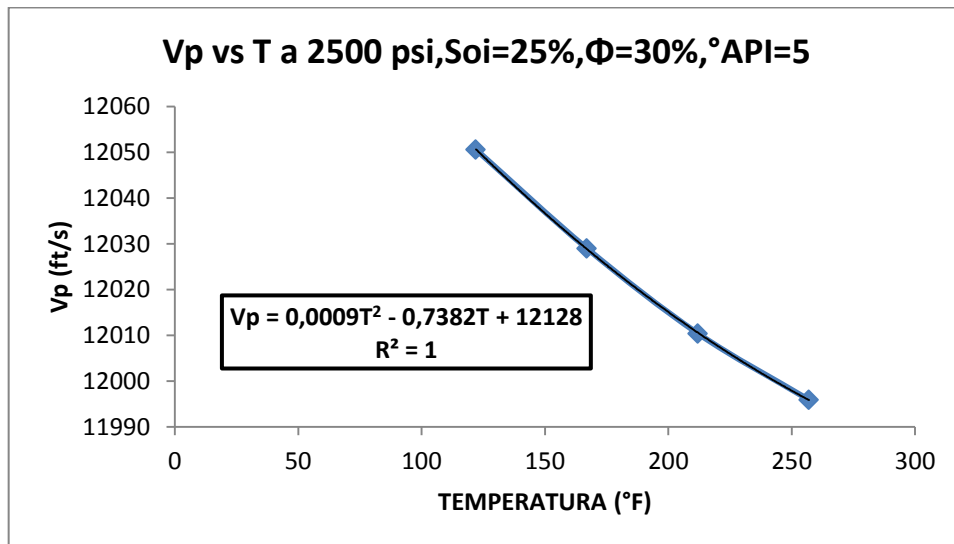
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 190. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=50\%$ , 3500 PSI**



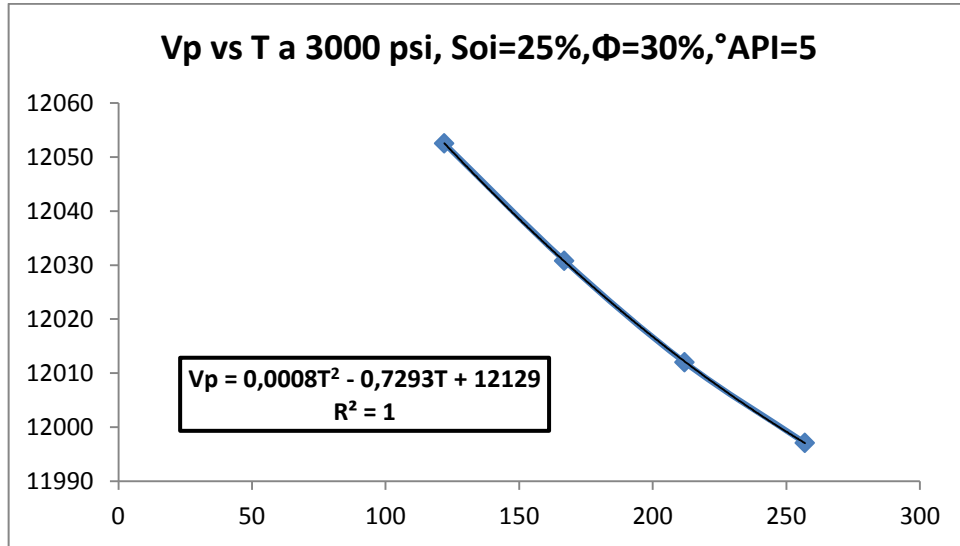
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 191. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=25\%$ , 2500 PSI**



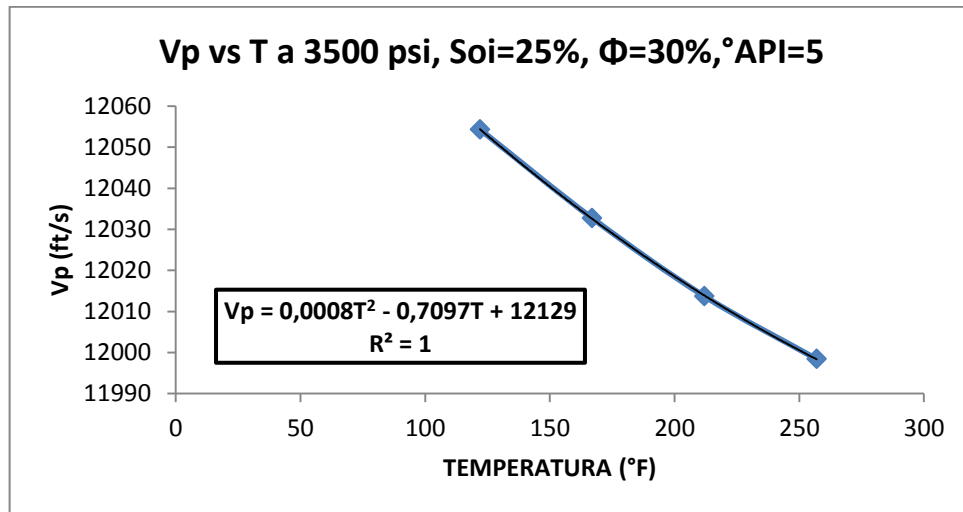
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 192. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=25\%$ , 3000 PSI**



**FUENTE: Los Autores**

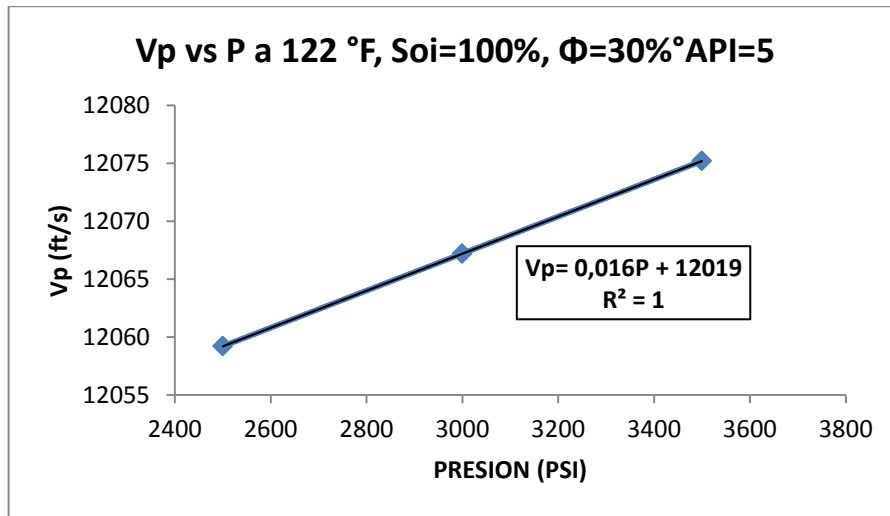
**Figura 193. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=25\%$ , 3500 PSI**



**FUENTE: Los Autores**

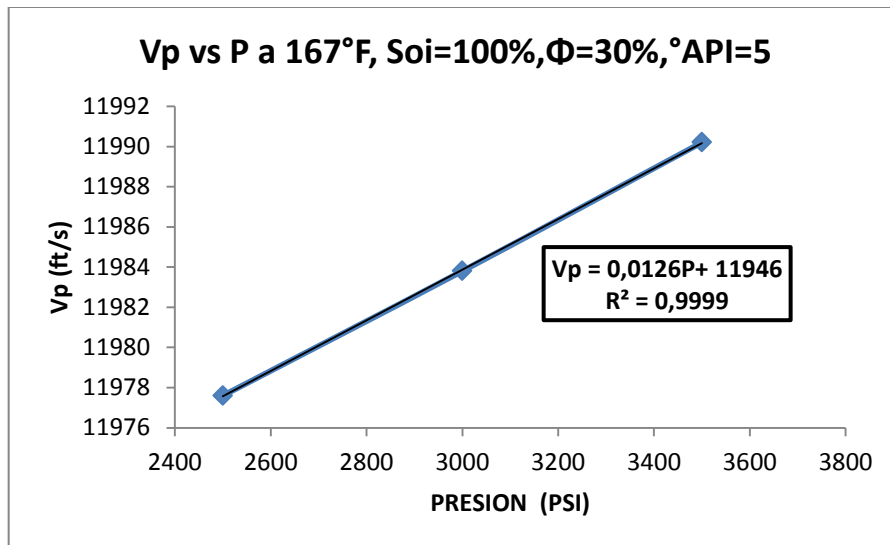
**4.7.2 ONDA COMPRESIONAL CONTRA PRESION A DISTINTAS TEMPERATURAS, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE PETROLEO**

*Figura 194. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=100\%$ ,  $122^\circ F$*



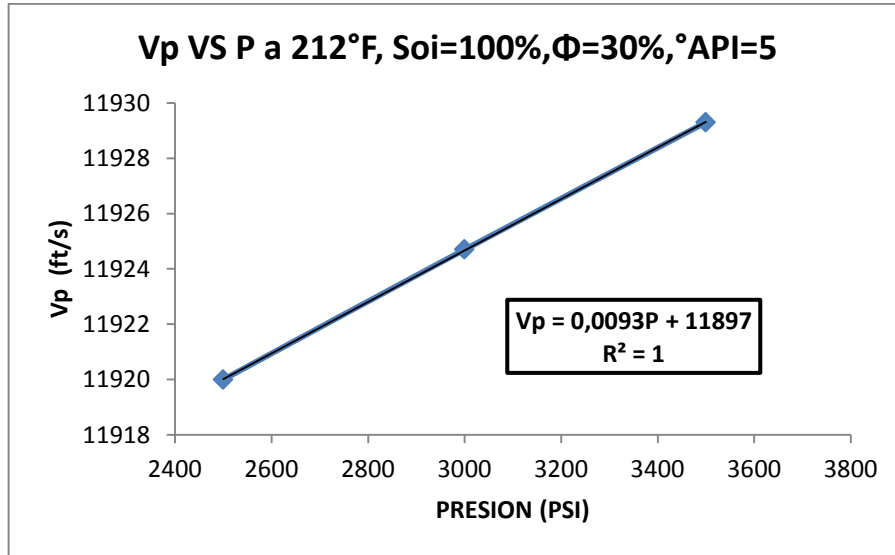
**FUENTE: Los Autores**

*Figura 195. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=100\%$ ,  $167^\circ F$*



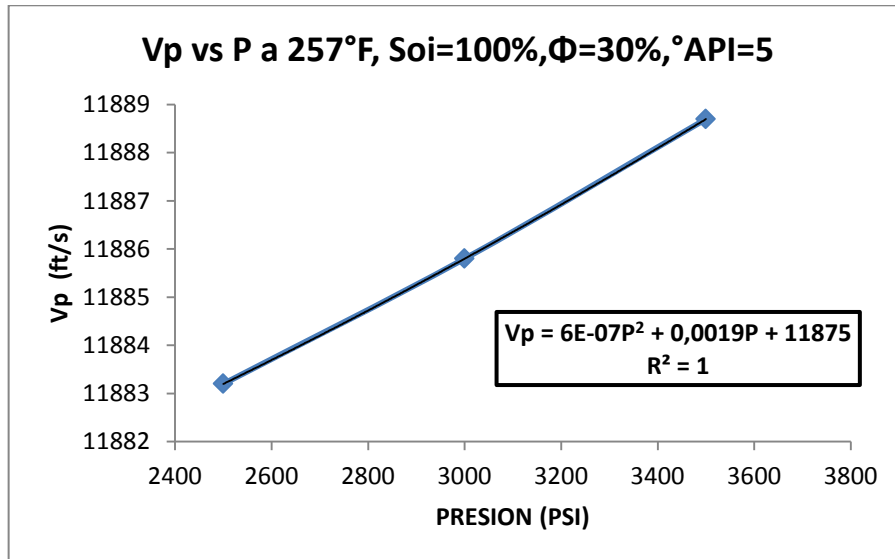
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 196. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=100\%$ ,  $212^{\circ}\text{F}$**



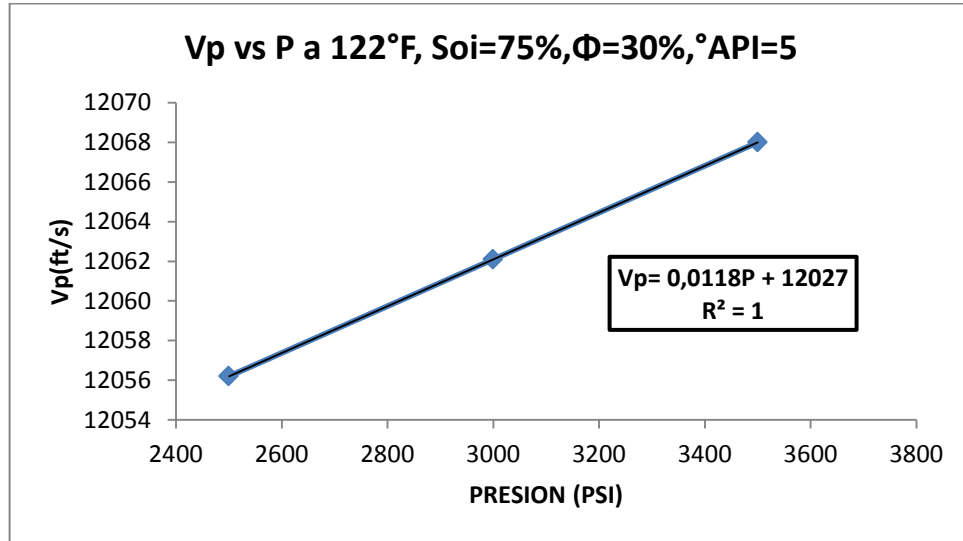
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 197. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=100\%$ ,  $257^{\circ}\text{F}$**



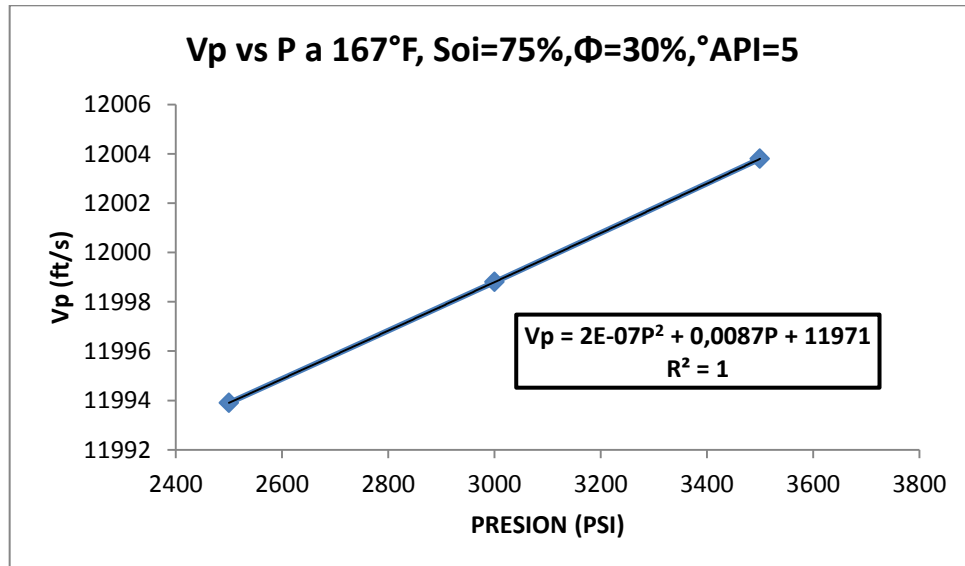
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 198. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $122^\circ\text{F}$**



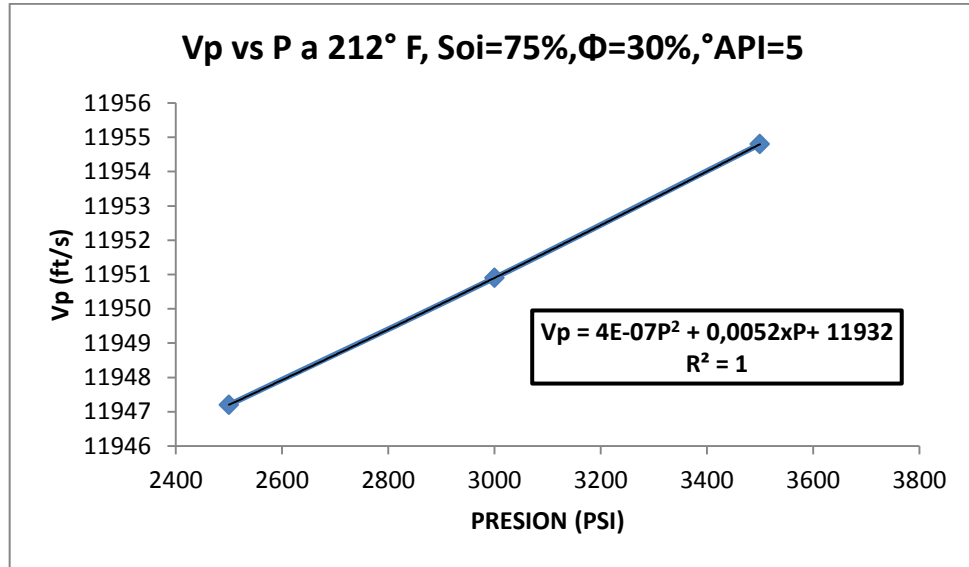
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 199. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $167^\circ\text{F}$**



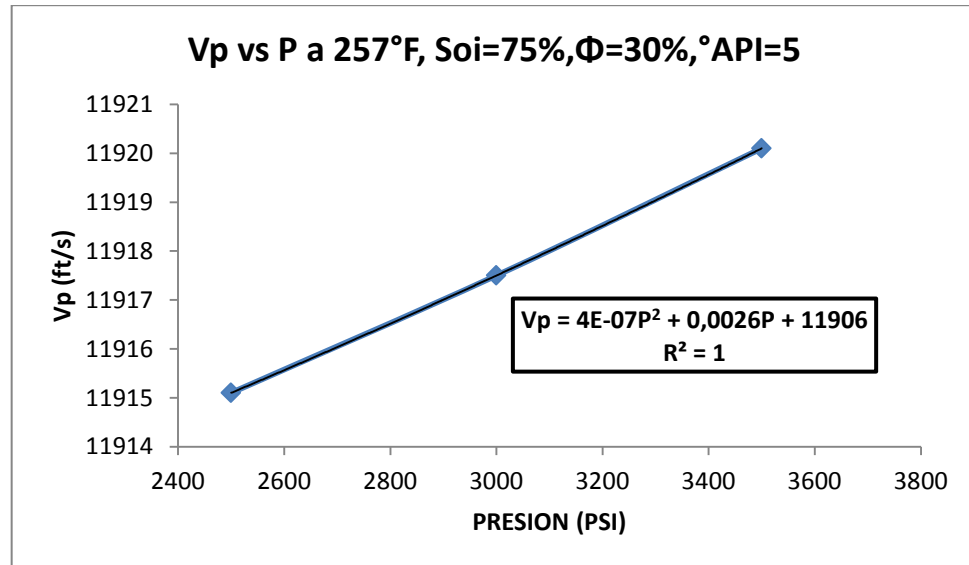
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 200. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $212^{\circ}F$**



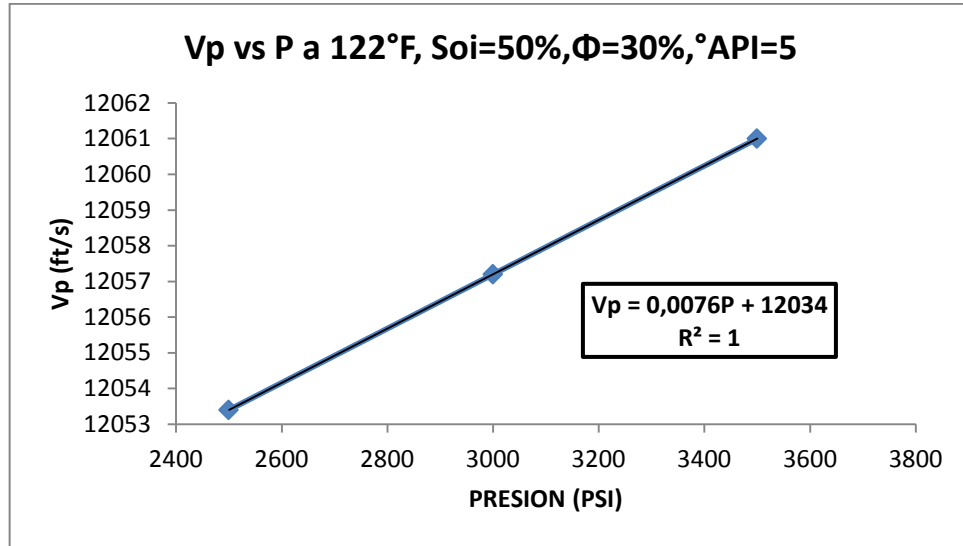
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 201. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $257^{\circ}F$**



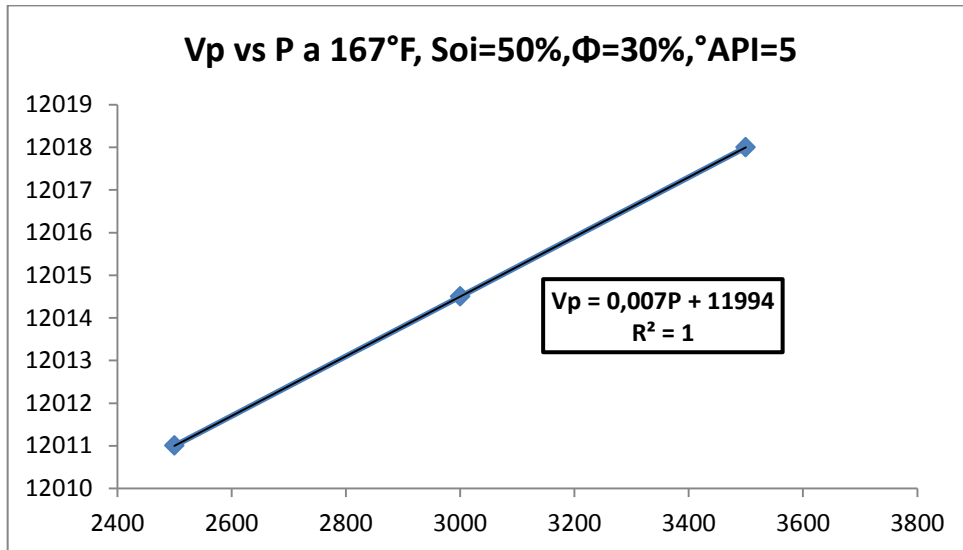
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 202. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $122^\circ F$**



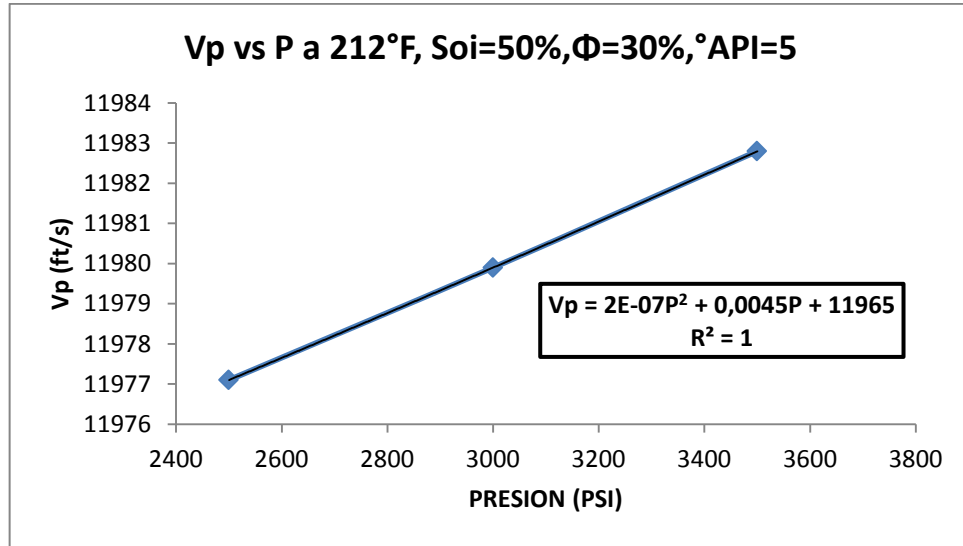
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 203. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $167^\circ F$**



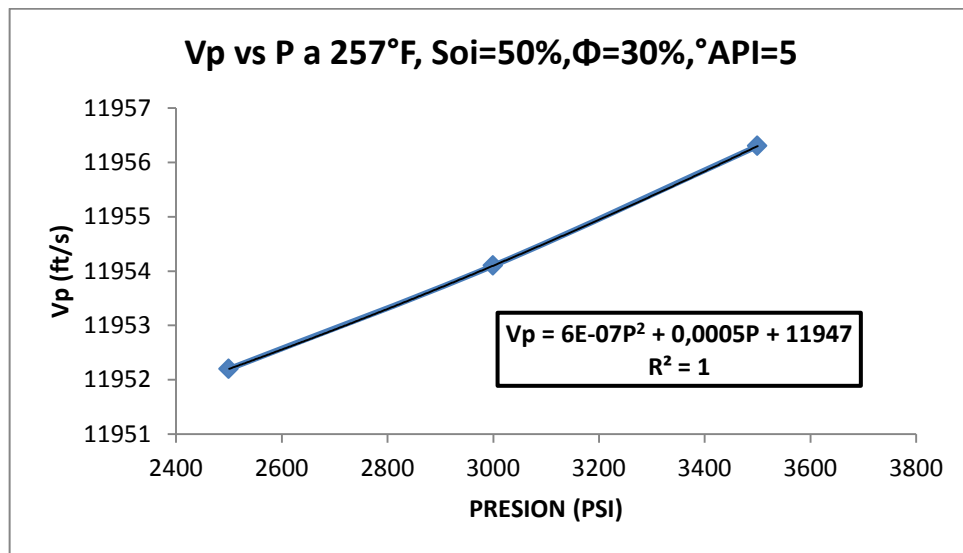
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 204. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $212^{\circ}F$**



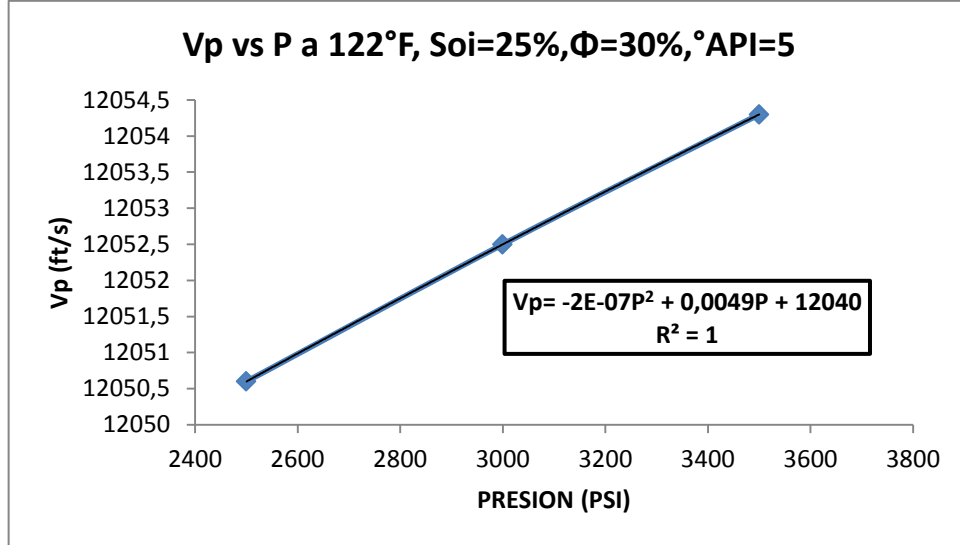
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 205. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $257^{\circ}F$**



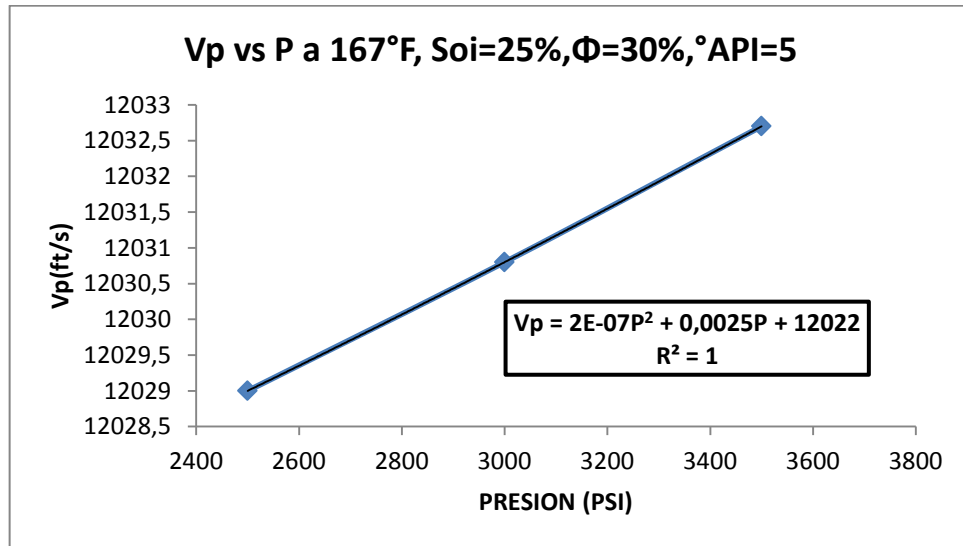
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 206. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $122^{\circ}\text{F}$**



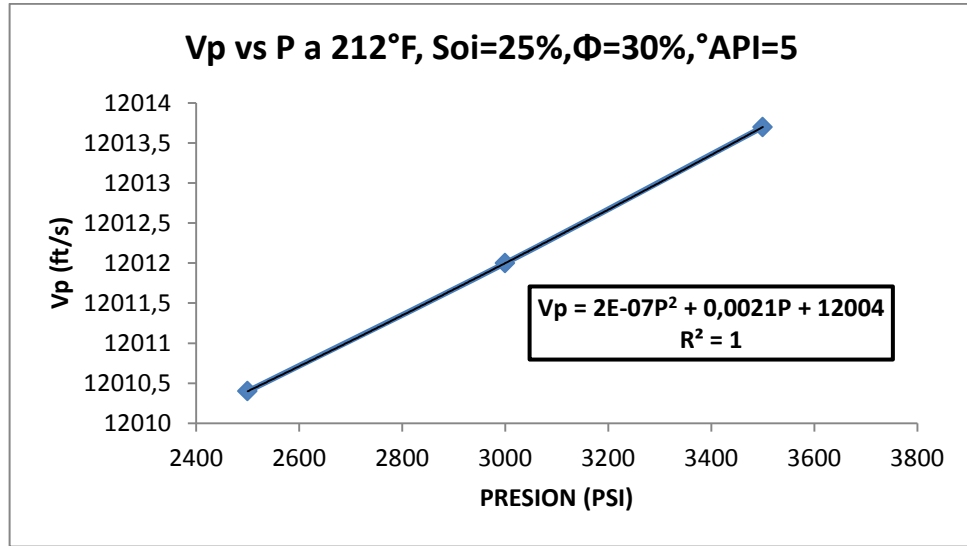
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 207. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $167^{\circ}\text{F}$**



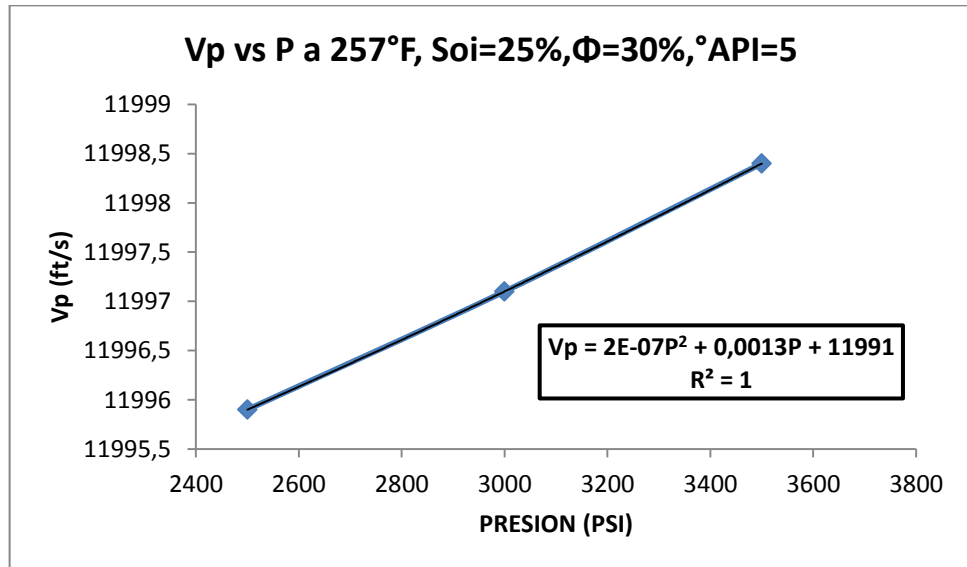
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 208. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $212^{\circ}\text{F}$**



**FUENTE: Los Autores**

**Figura 209. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $257^{\circ}\text{F}$**

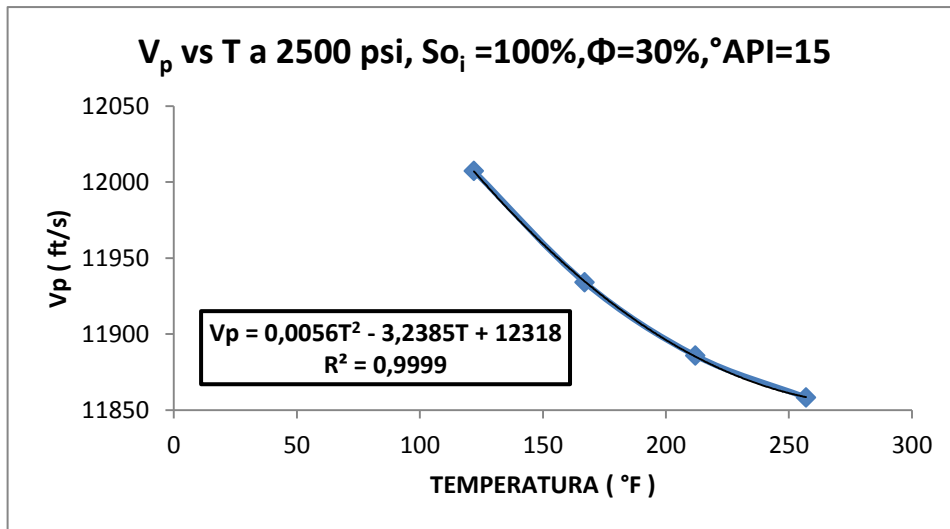


**FUENTE: Los Autores**

#### 4.8 CASO 8: POROSIDAD DEL 30% Y PETROLEO DE 15°API

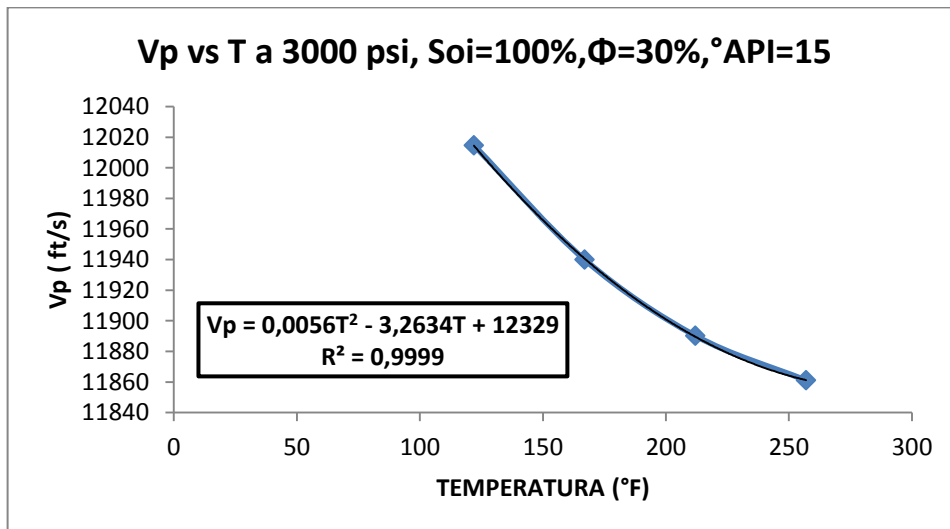
##### 4.8.1 ONDA COMPRESIONAL CONTRA TEMPERATURA A DISTINTAS PRESIONES, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE ACEITE

Figura 210. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=100\%$ , 2500 PSI



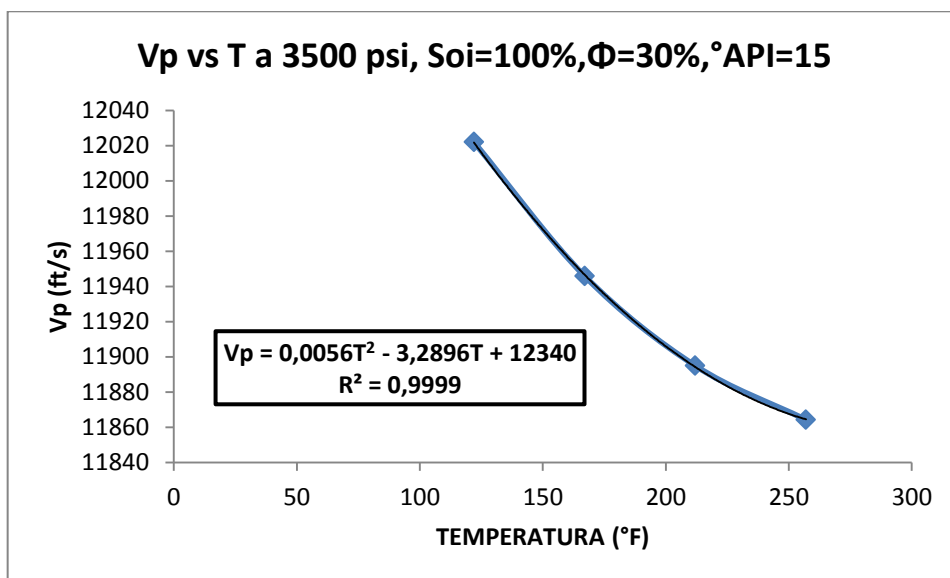
FUENTE: Los Autores

Figura 211. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=100\%$ , 3000 PSI



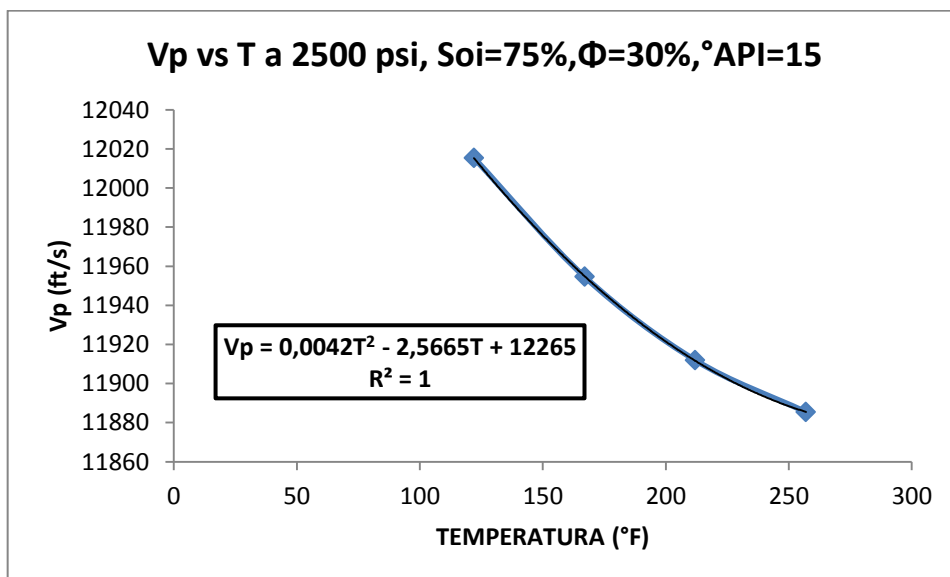
FUENTE: Los Autores

**Figura 212. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=100\%$ , 3500 PSI**



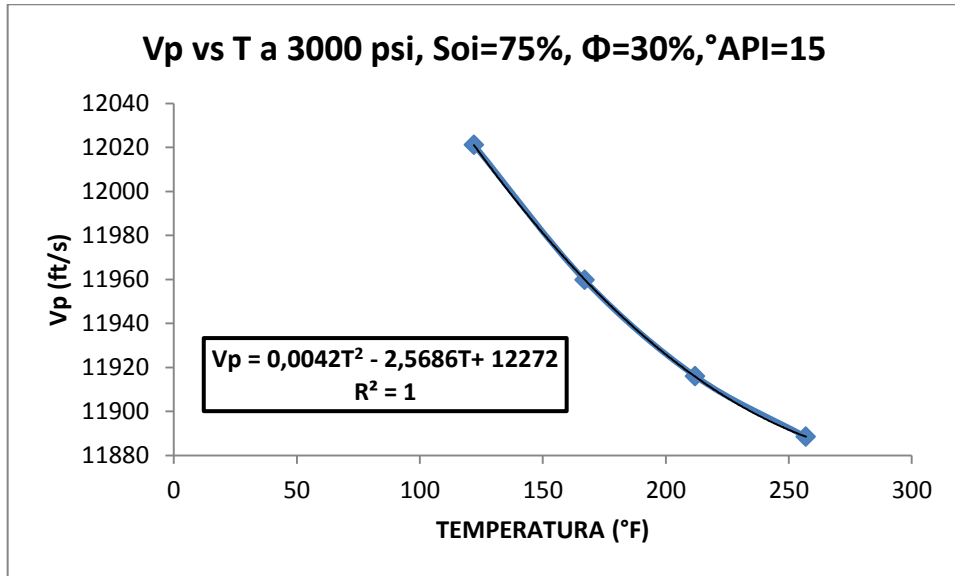
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 213. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=75\%$ , 2500 PSI**



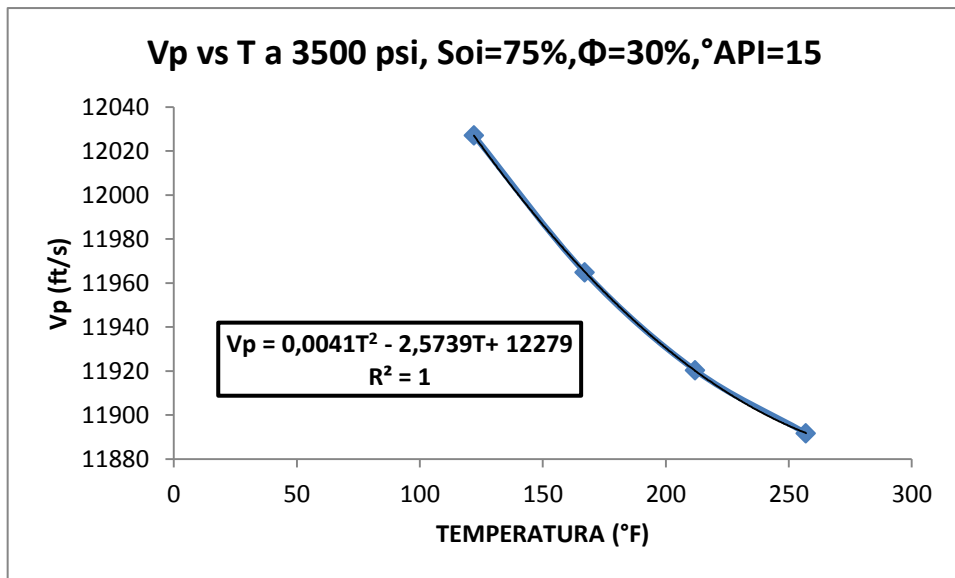
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 214. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=75\%$ , 3000 PSI**



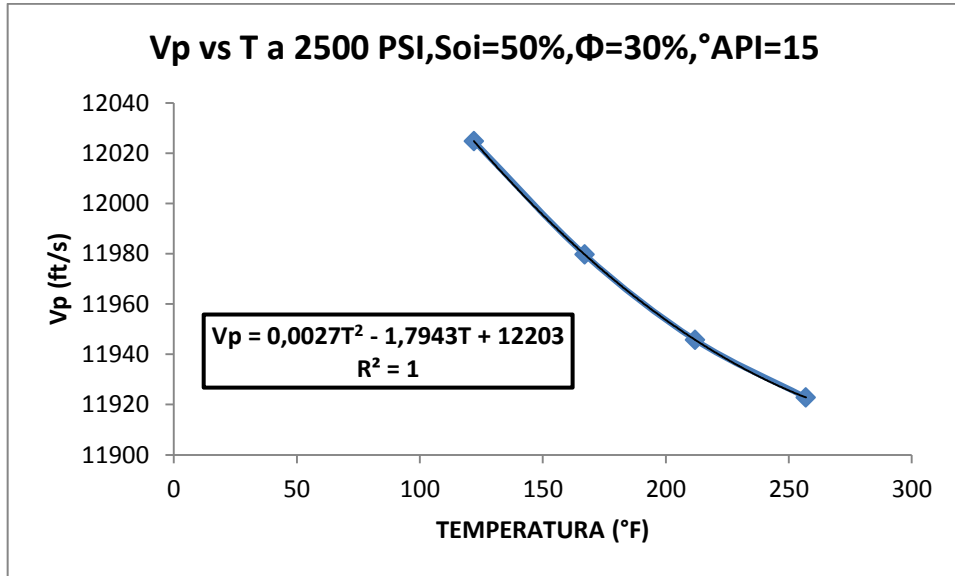
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 215. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=75\%$ , 3500 PSI**



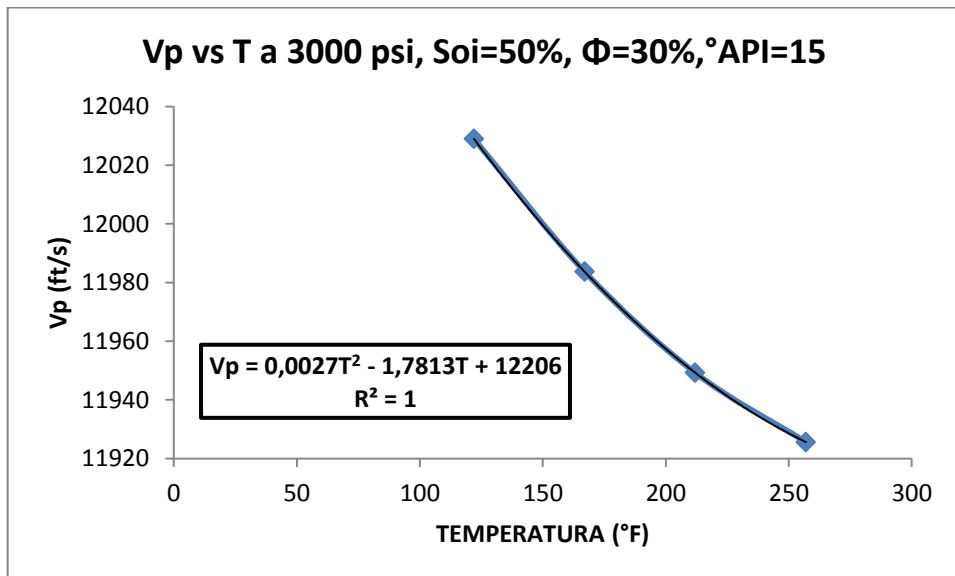
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 216. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=50\%$ , 2500 PSI**



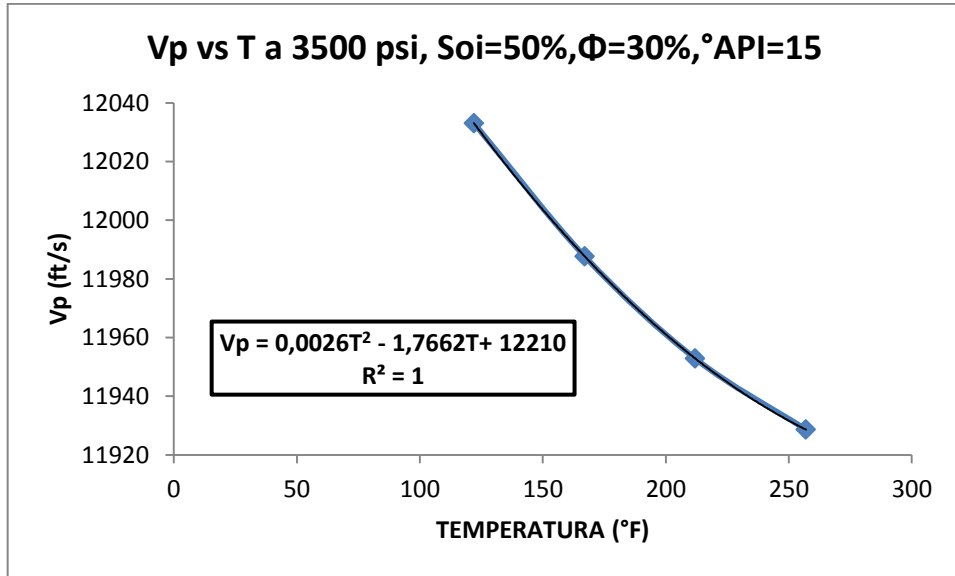
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 217. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=50\%$ , 3000 PSI**



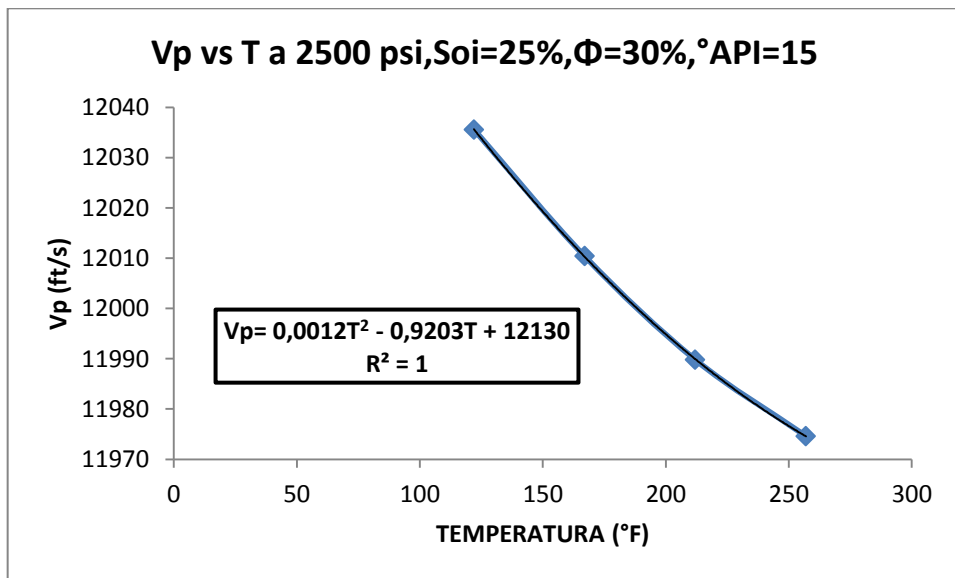
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 218. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=50\%$ , 3500 PSI**



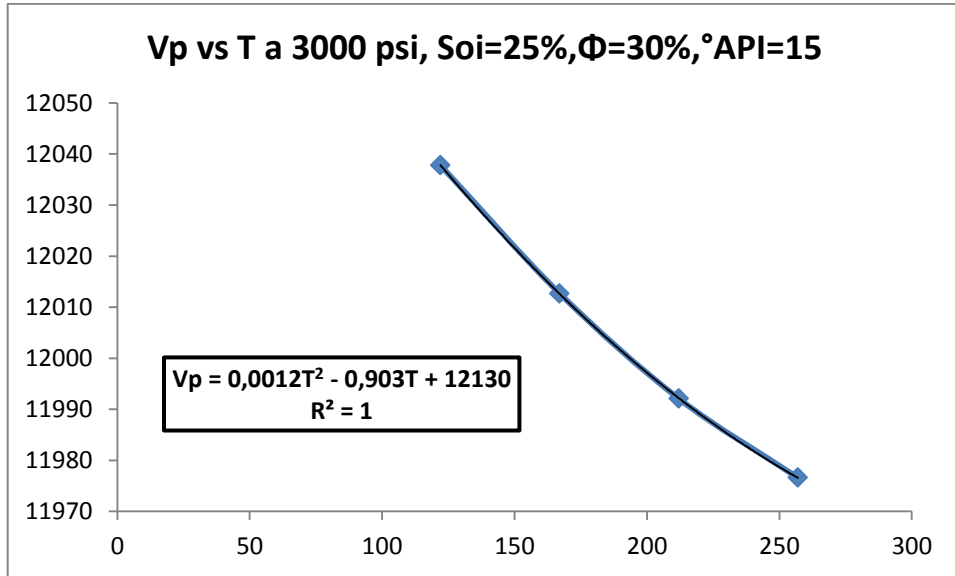
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 219. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=25\%$ , 2500 PSI**



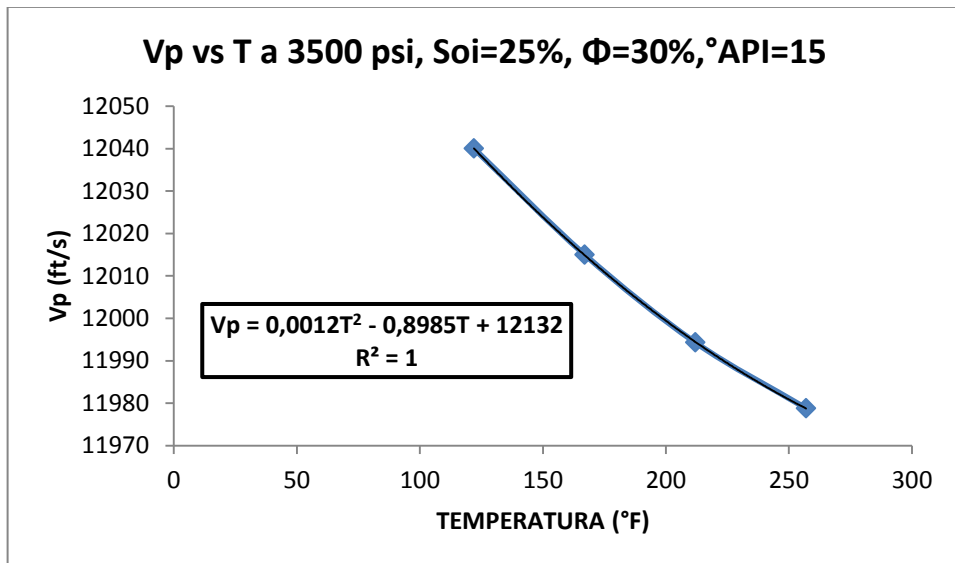
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 220. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=25\%$ , 3000 PSI**



**FUENTE: Los Autores**

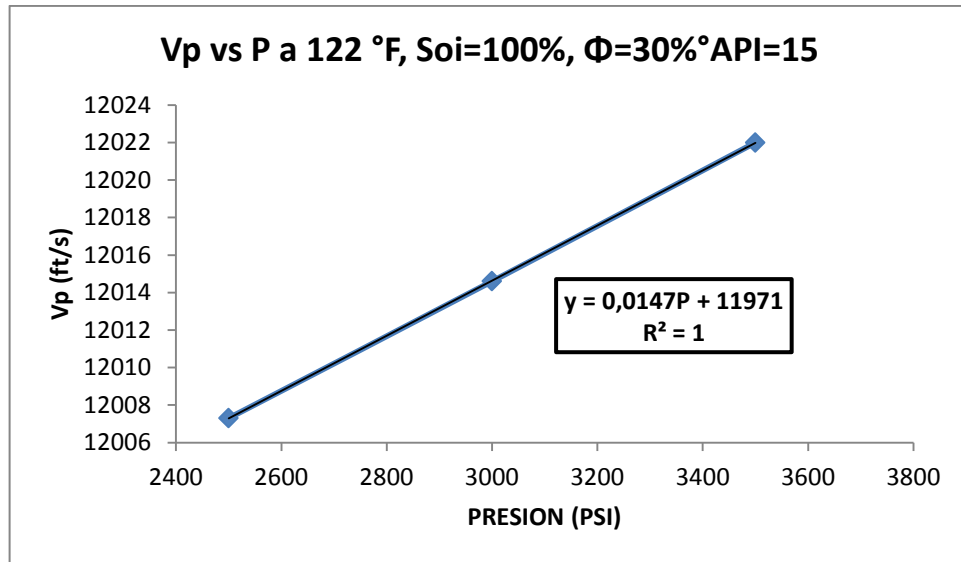
**Figura 221. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=25\%$ , 3500 PSI**



**FUENTE: Los Autores**

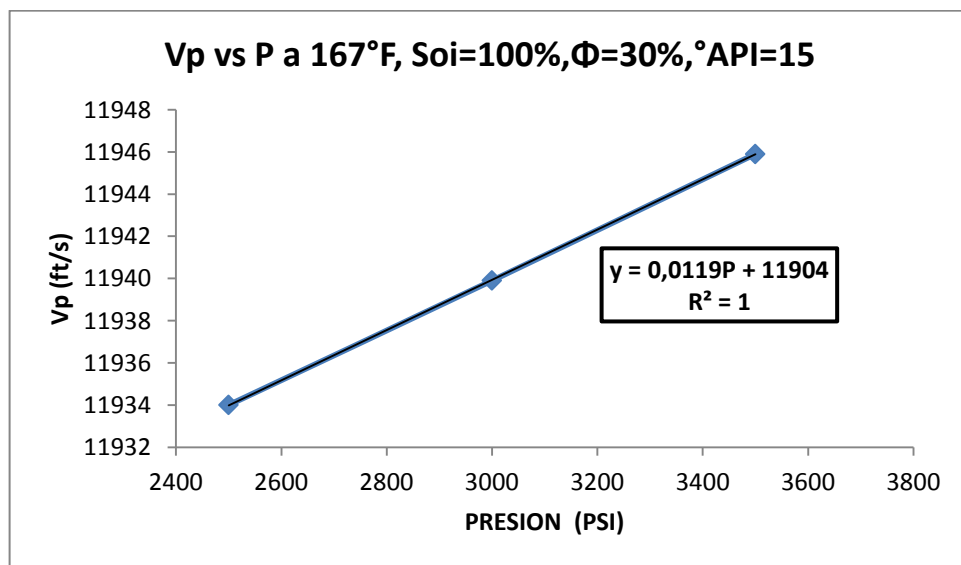
#### 4.8.2 ONDA COMPRESIONAL CONTRA PRESION A DISTINTAS TEMPERATURAS, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE PETROLEO

Figura 222. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=100\%$ ,  $112^\circ\text{F}$



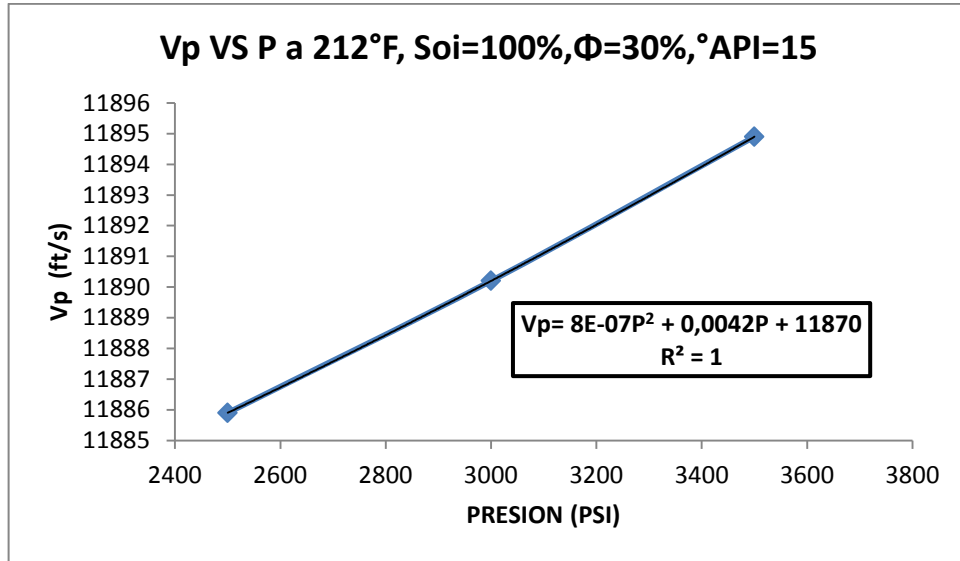
FUENTE: Los Autores

Figura 223. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=100\%$ ,  $167^\circ\text{F}$



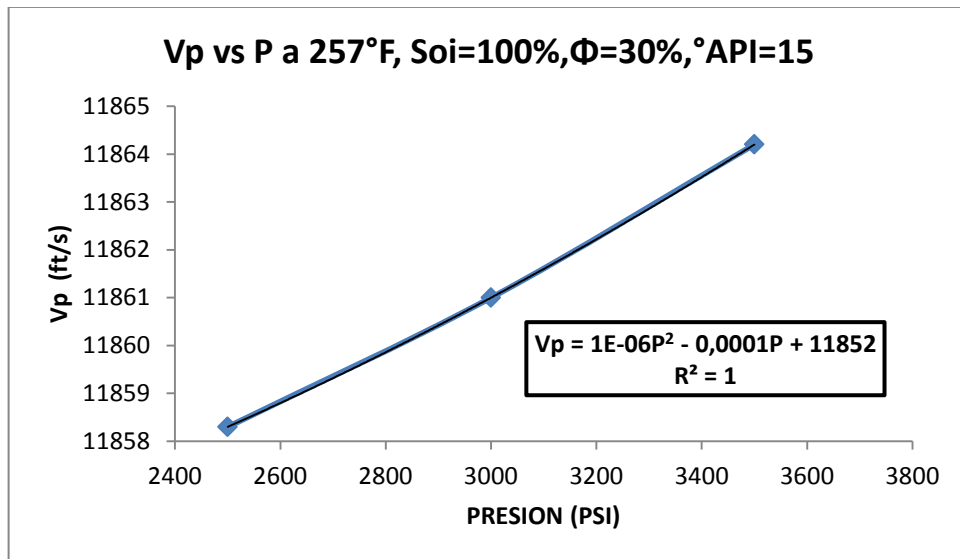
FUENTE: Los Autores

**Figura 224. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=100\%$ ,  $212^{\circ}\text{F}$**



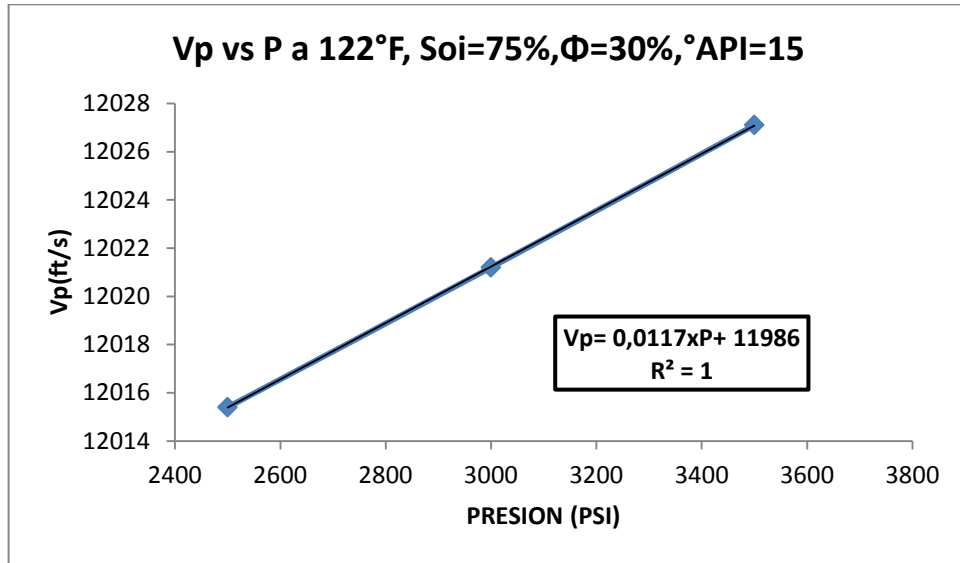
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 225. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=100\%$ ,  $257^{\circ}\text{F}$**



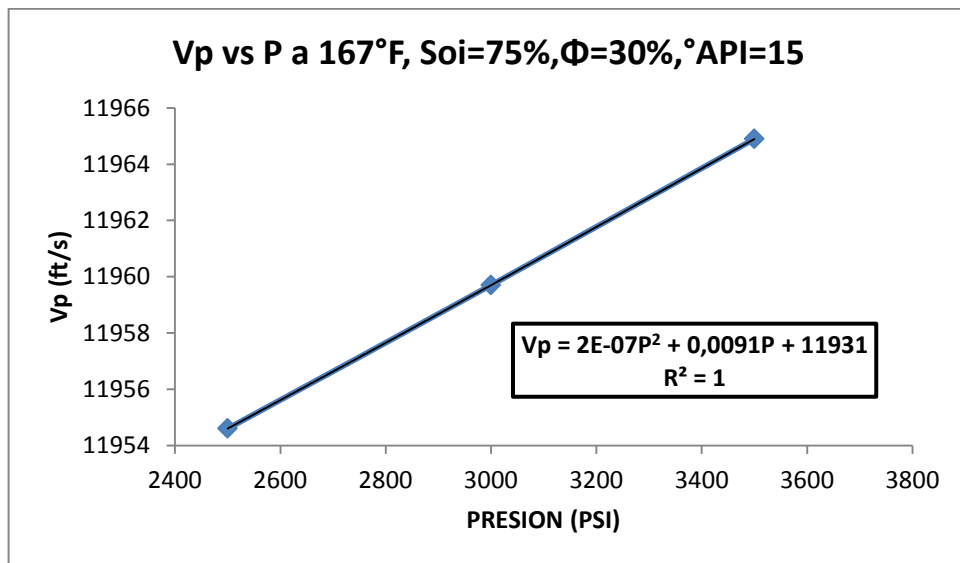
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 226. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $122^\circ\text{F}$**



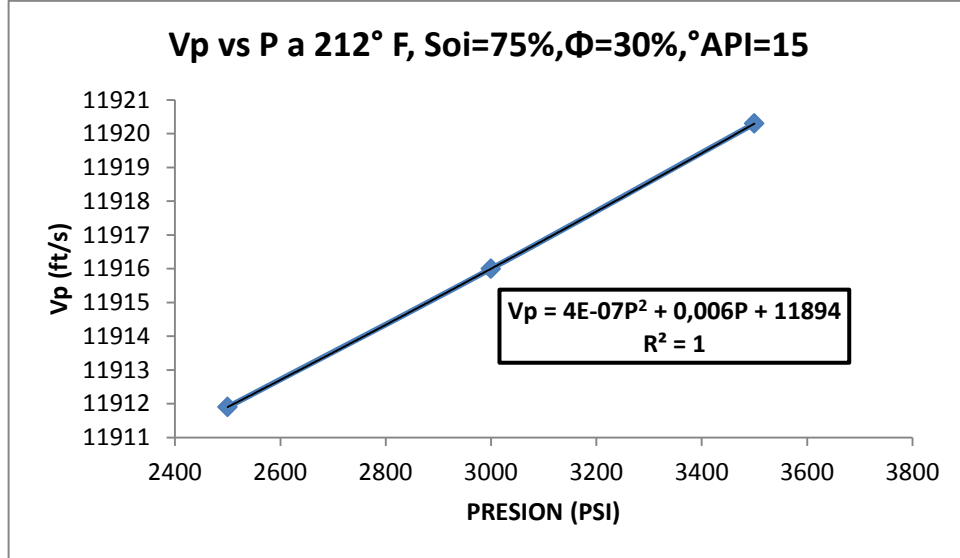
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 227. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $167^\circ\text{F}$**



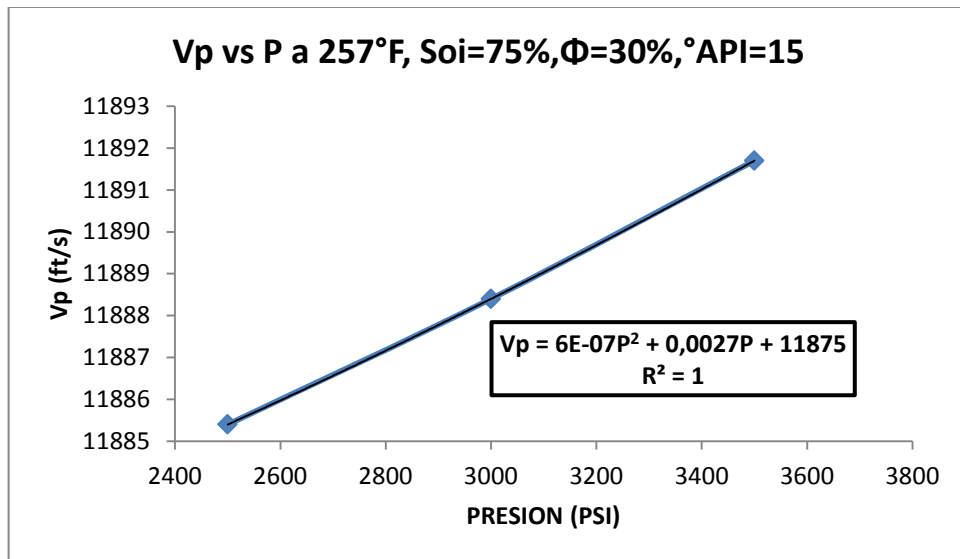
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 228. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $212^{\circ}\text{F}$**



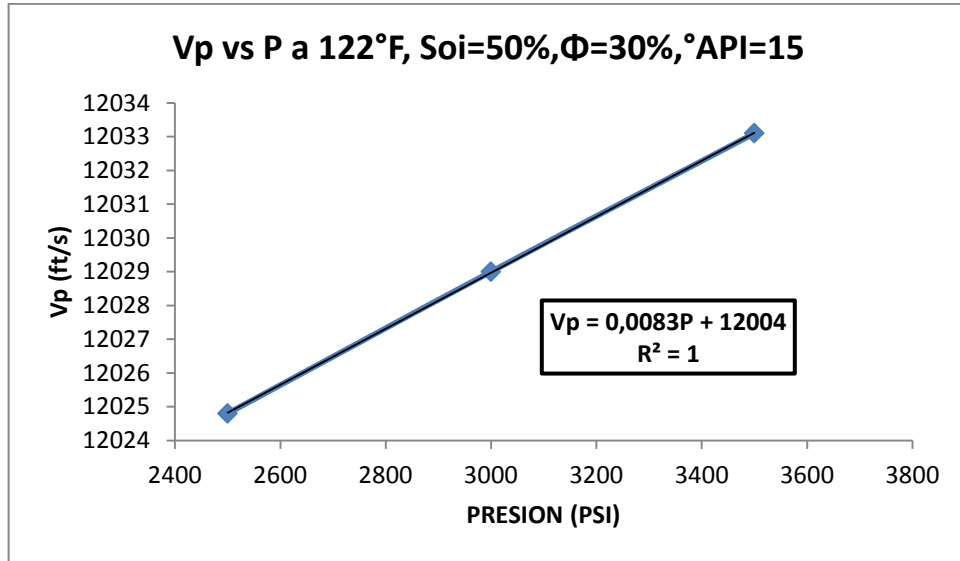
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 229. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $257^{\circ}\text{F}$**



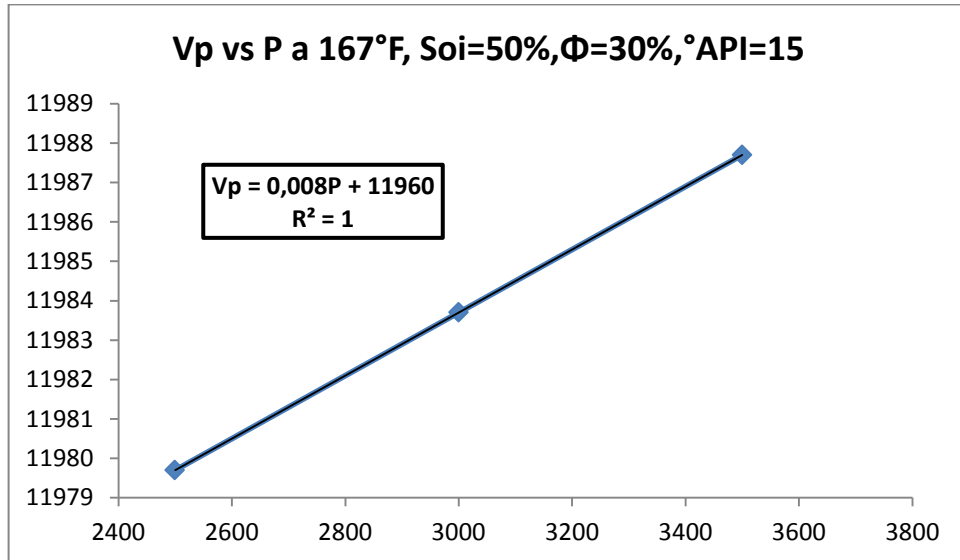
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 230. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $122^{\circ}\text{F}$**



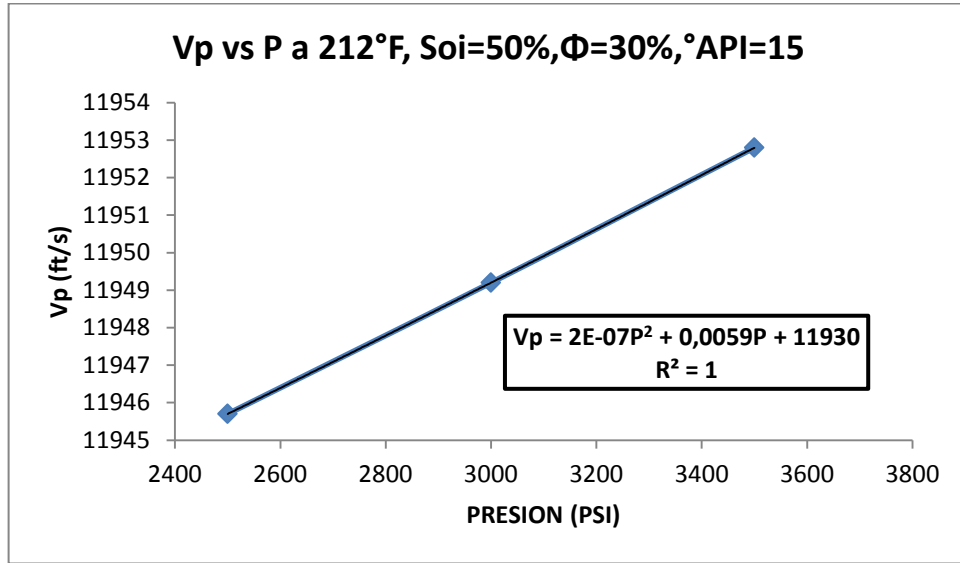
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 231. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $167^{\circ}\text{F}$**



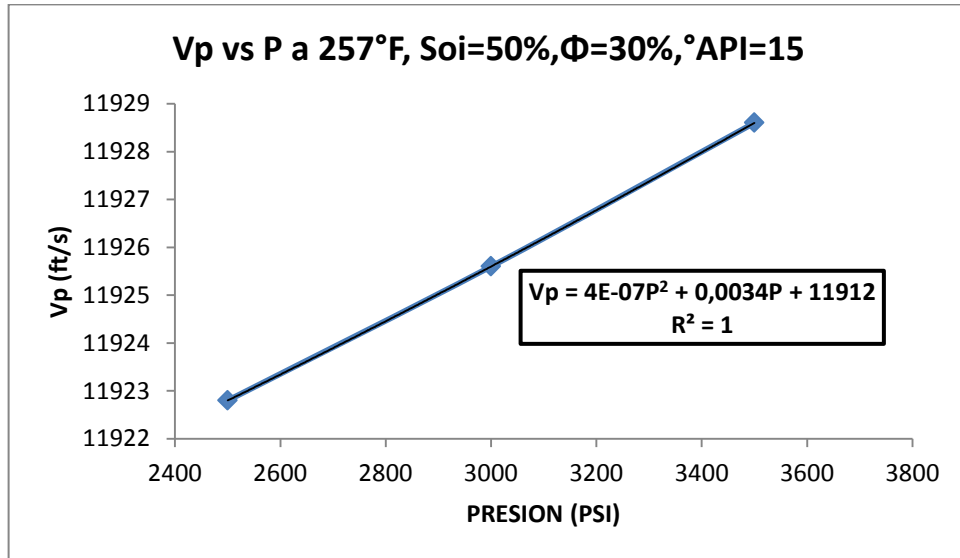
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 232. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $212^{\circ}F$**



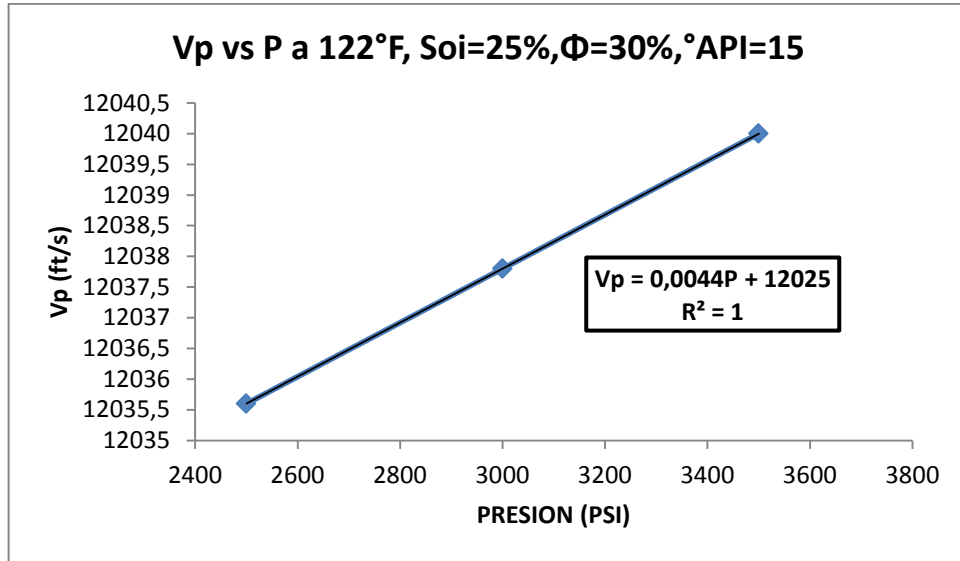
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 233. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $257^{\circ}F$**



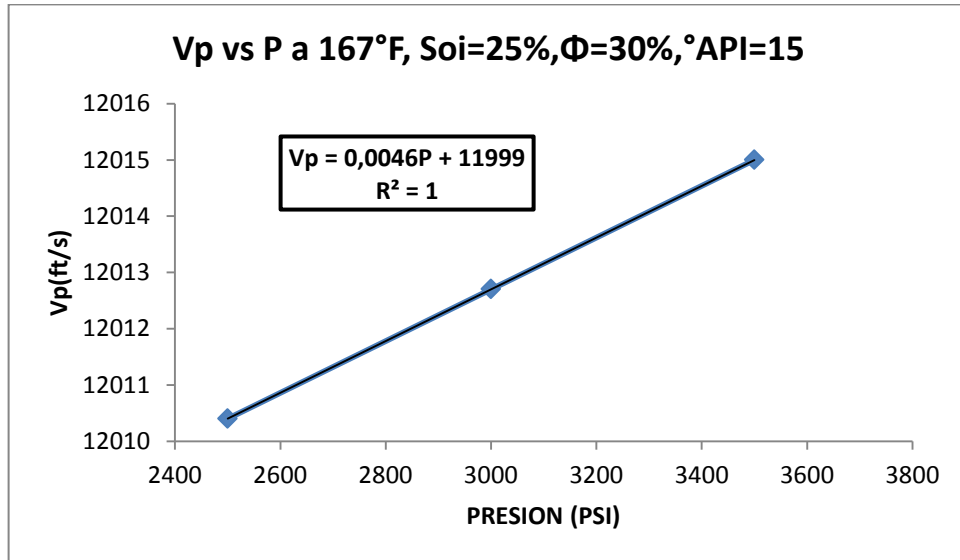
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 234. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $122^{\circ}F$**



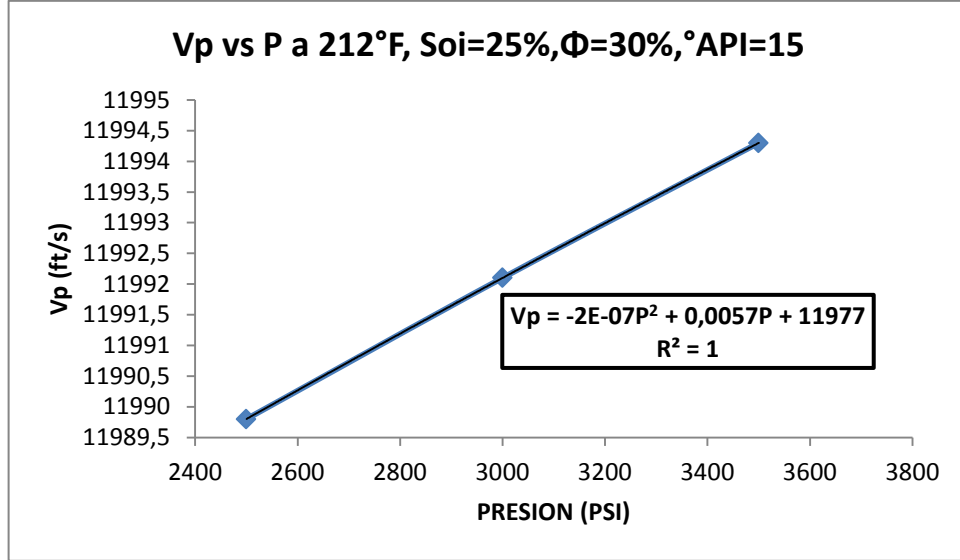
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 235. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $167^{\circ}F$**



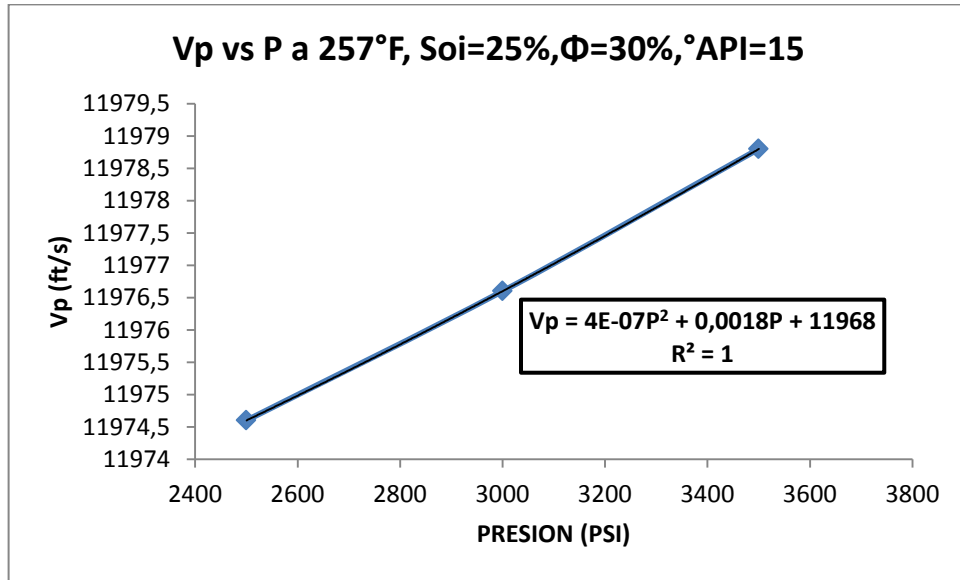
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 236. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $212^{\circ}F$**



**FUENTE: Los Autores**

**Figura 237. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $257^{\circ}F$**

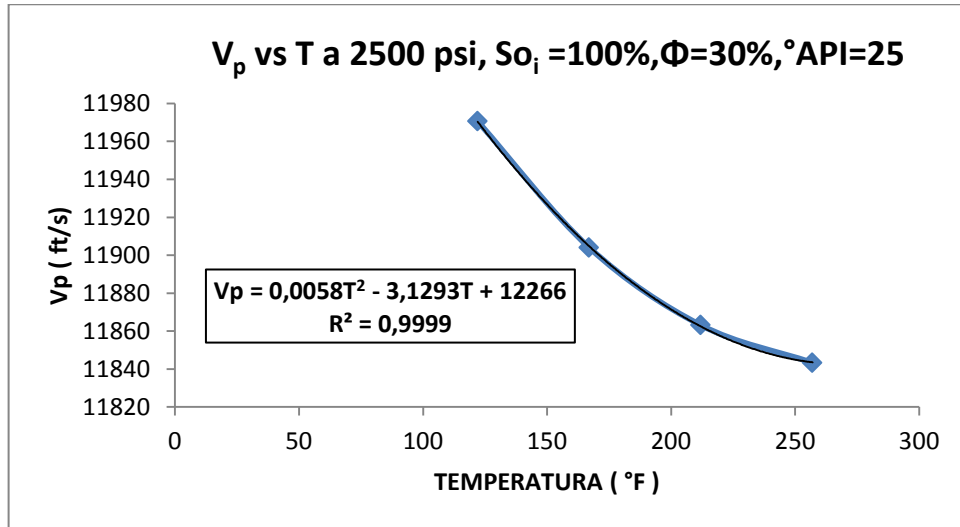


**FUENTE: Los Autores**

## 4.9 CASO 9: POROSIDAD DEL 30% Y PETROLEO DE 25°API

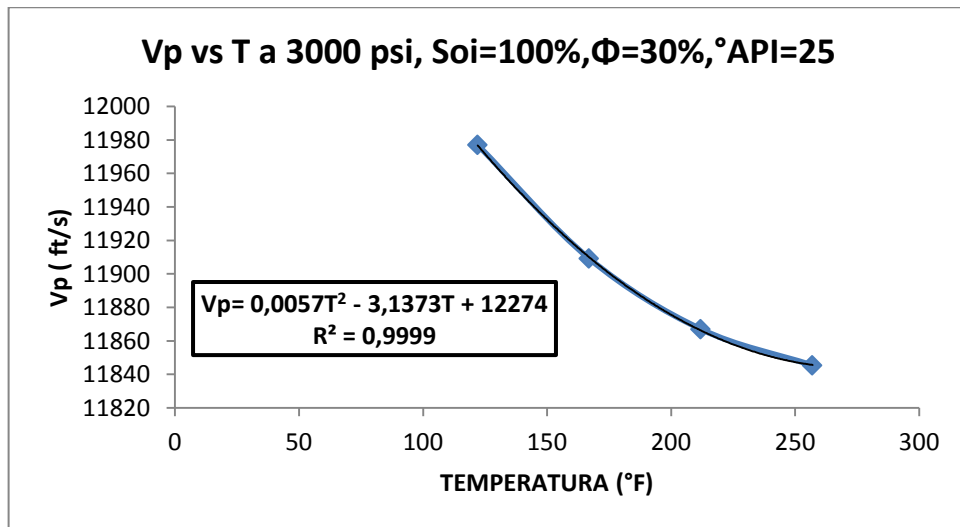
### 4.9.1 ONDA COMPRESIONAL CONTRA TEMPERATURA A DISTINTAS PRESIONES, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE ACEITE

Figura 238. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=100\%$ , 2500 PSI



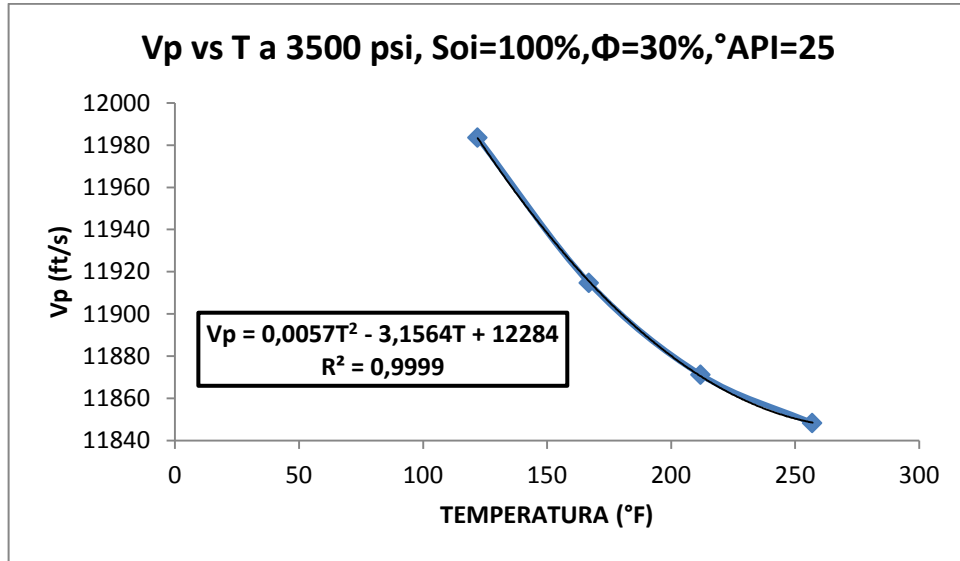
FUENTE: Los Autores

Figura 239. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=100\%$ , 3000 PSI



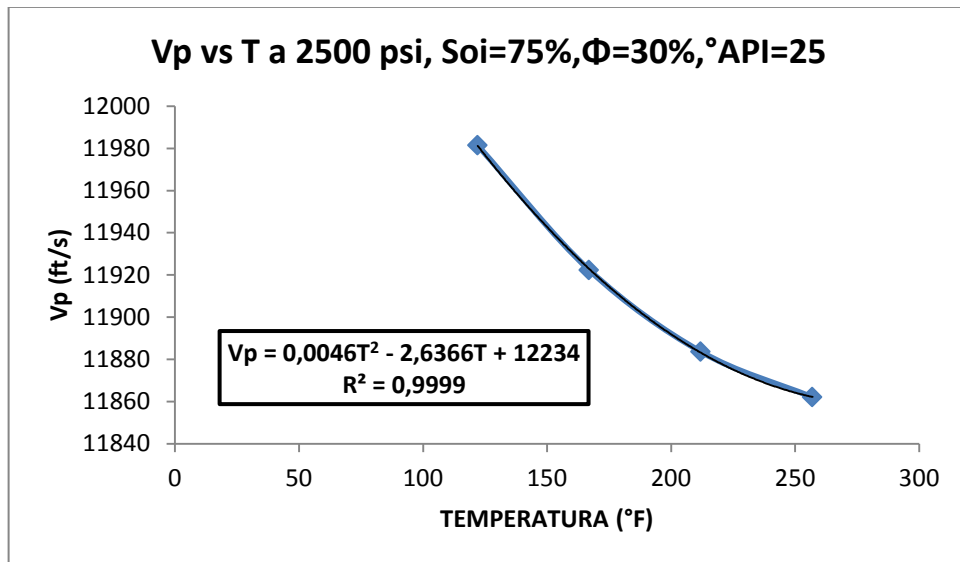
FUENTE: Los Autores

**Figura 240. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=100\%$ , 3500 PSI**



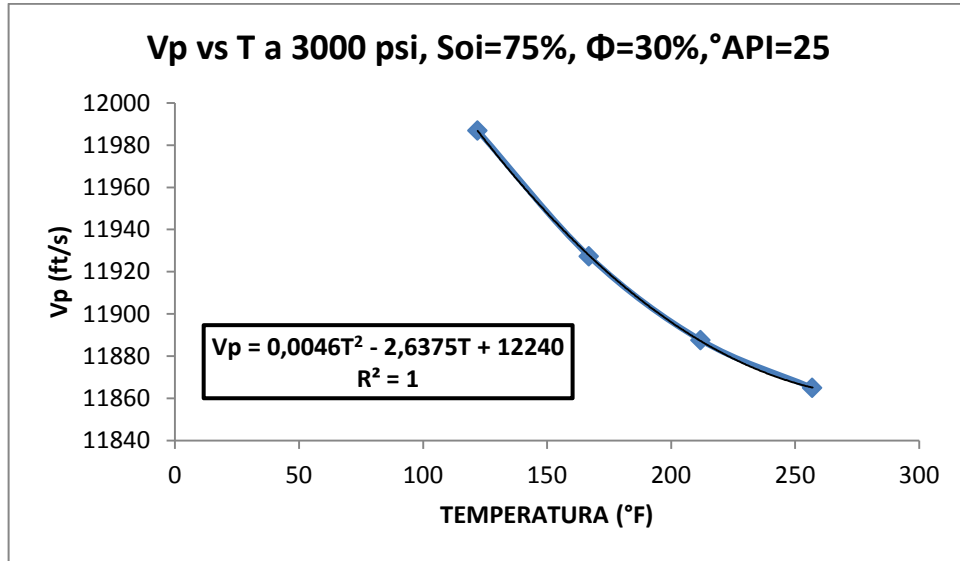
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 241. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=75\%$ , 2500 PSI**



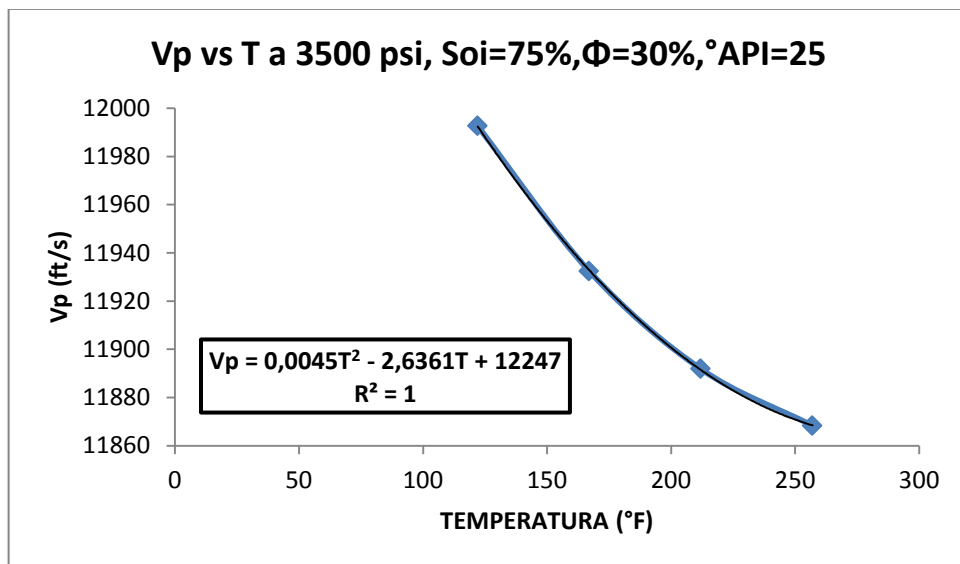
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 242. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=75\%$ , 3000 PSI**



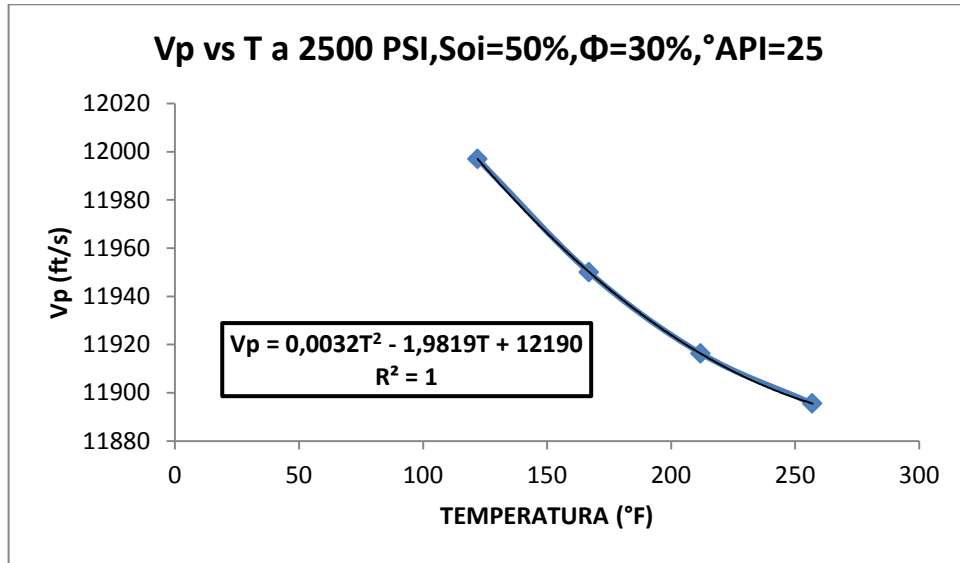
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 243. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=75\%$ , 3500 PSI**



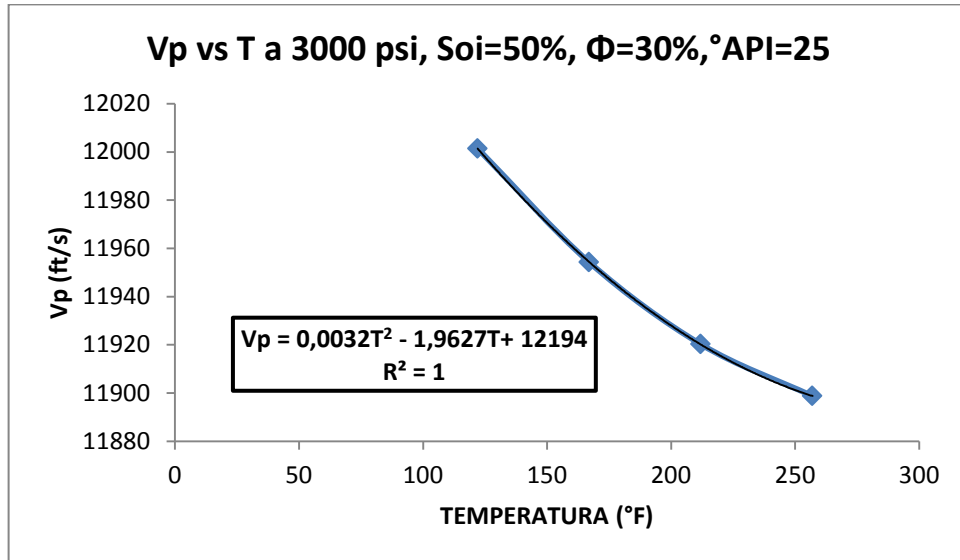
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 244. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=50\%$ , 2500 PSI**



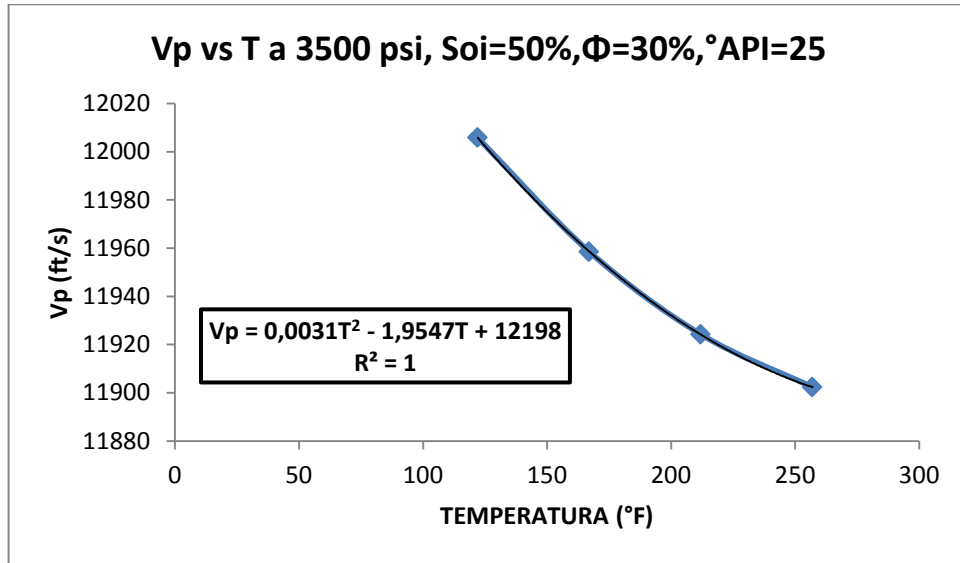
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 245. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=50\%$ , 3000 PSI**



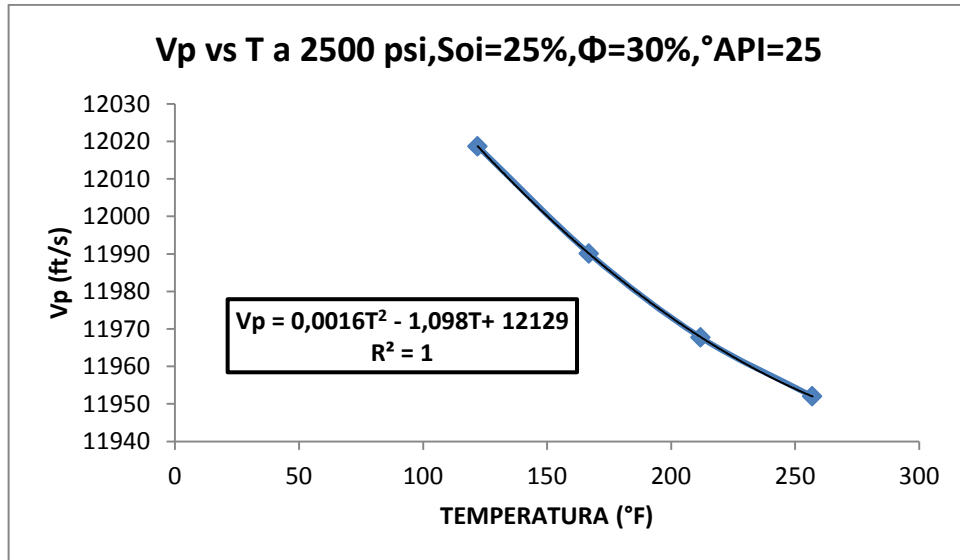
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 246. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=50\%$ , 3500 PSI**



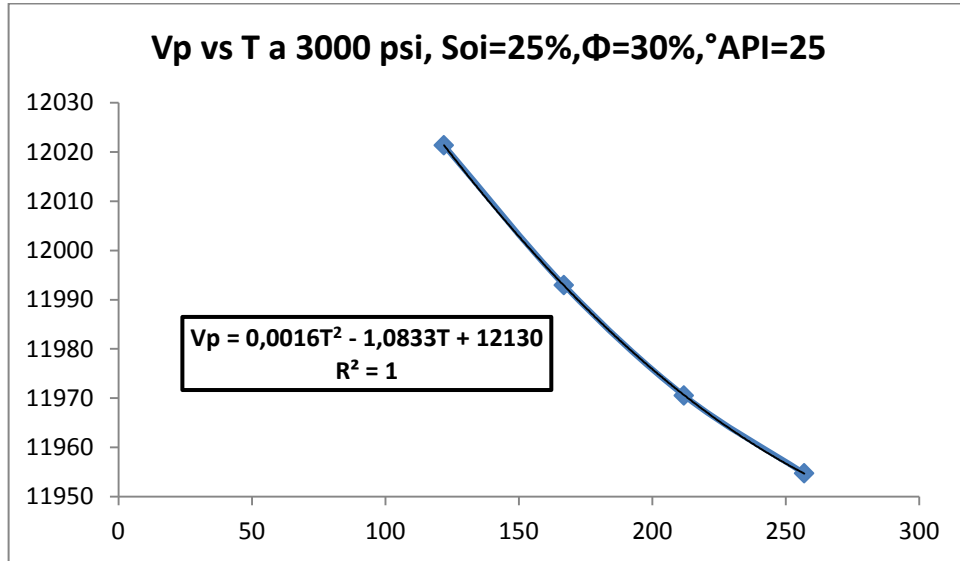
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 247. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=25\%$ , 2500 PSI**



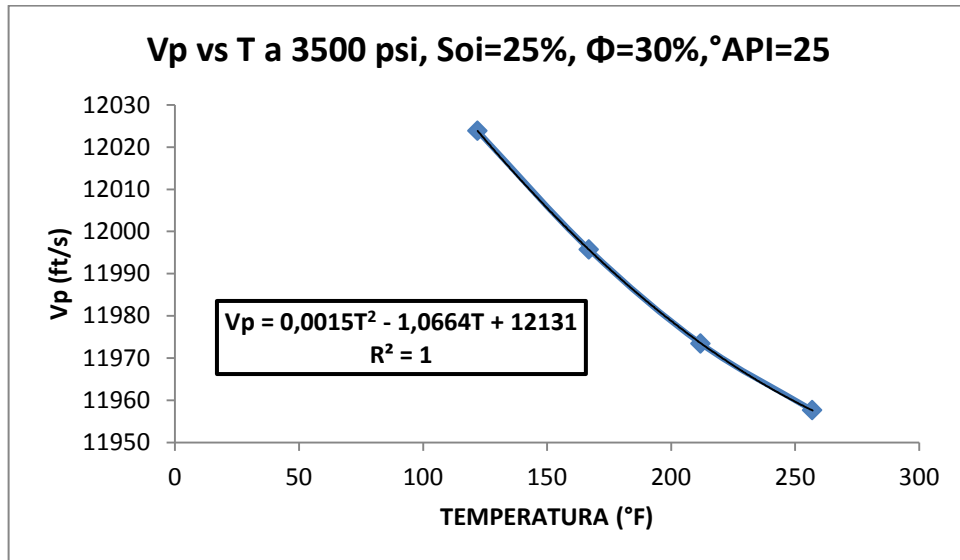
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 248. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=25\%$ , 3000 PSI**



**FUENTE: Los Autores**

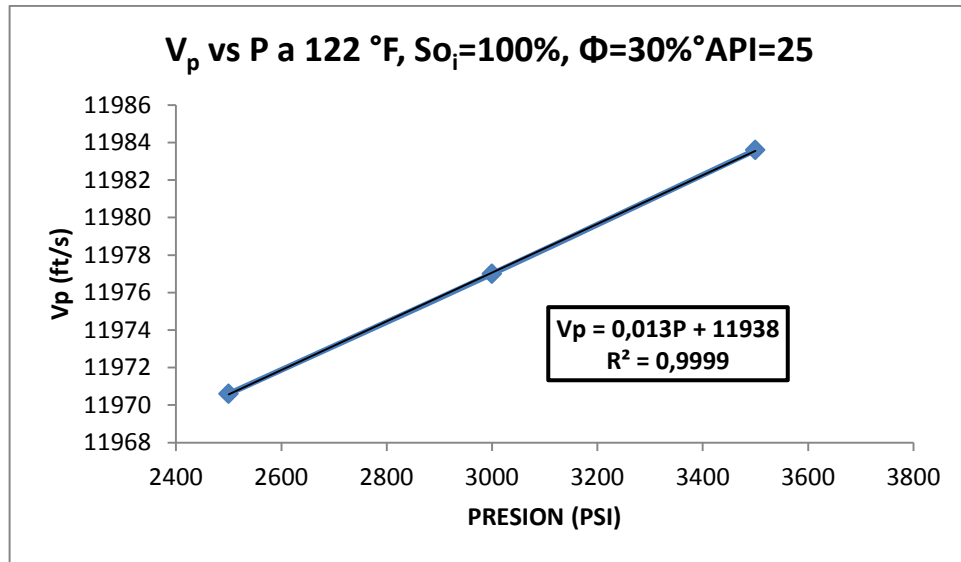
**Figura 249. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_o=25\%$ , 3500 PSI**



**FUENTE: Los Autores**

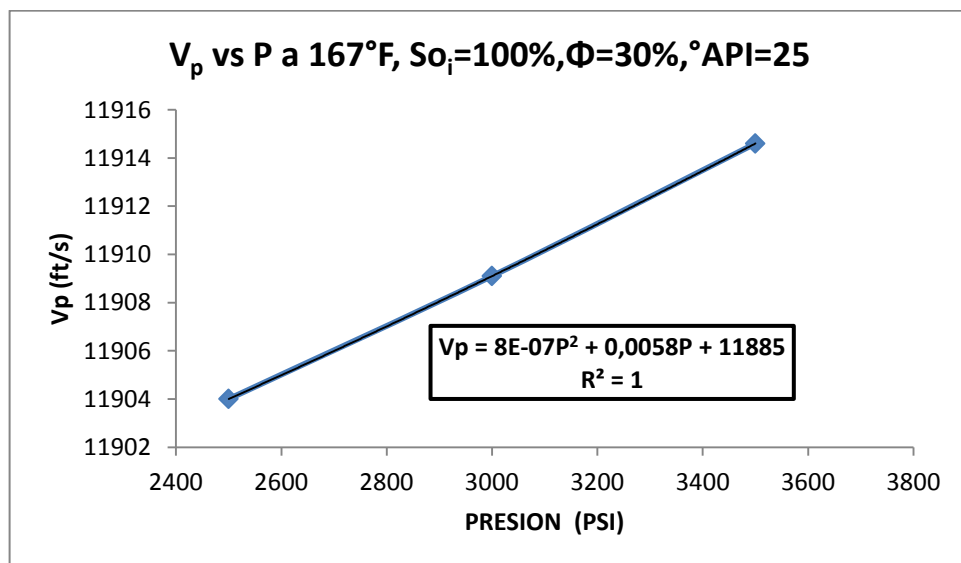
#### 4.9.2 ONDA COMPRESIONAL CONTRA PRESION A DISTINTAS TEMPERATURAS, Y VALORES DE SATURACIÓN INICIAL DE PETRÓLEO

Figura 250. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=100\%$ ,  $122^\circ\text{F}$



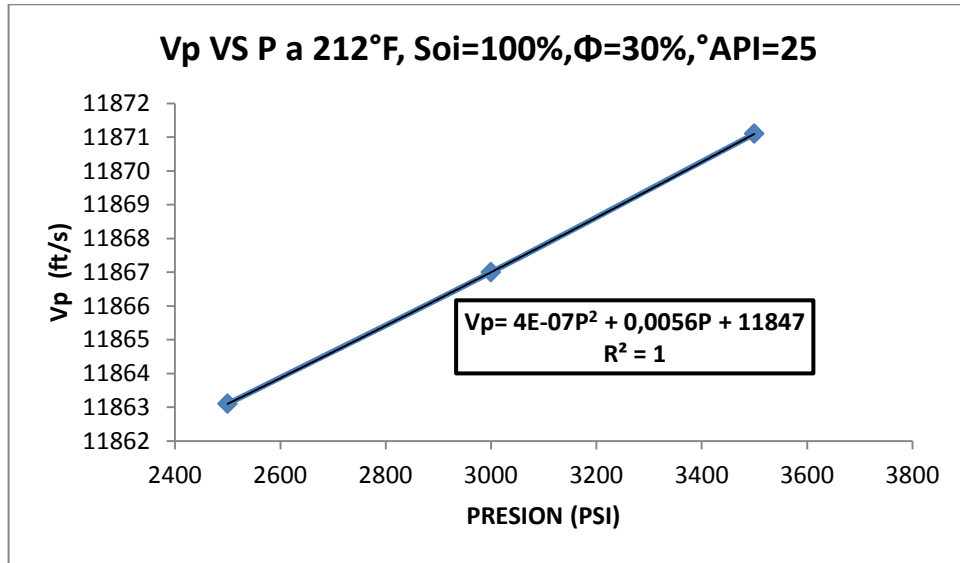
FUENTE: Los Autores

Figura 251. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=100\%$ ,  $167^\circ\text{F}$



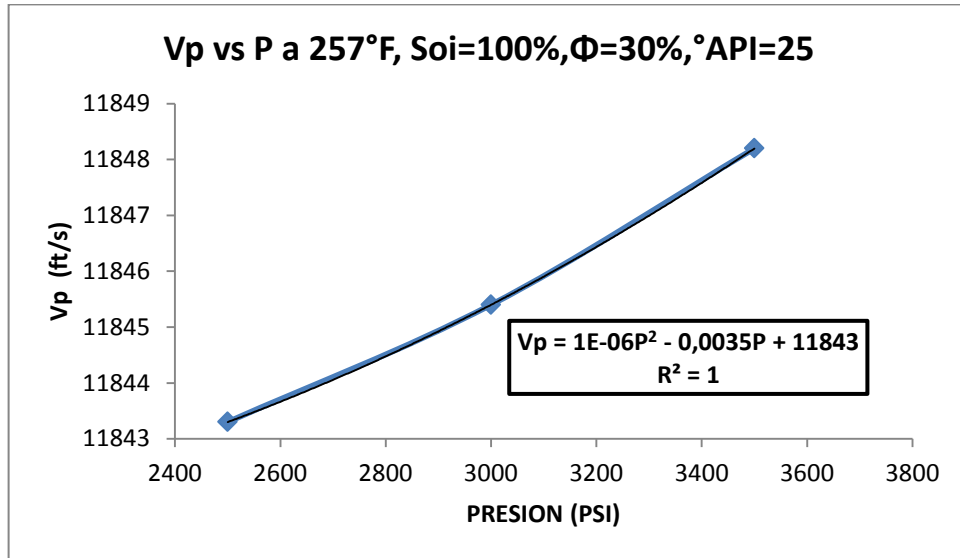
FUENTE: Los Autores

**Figura 252. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=100\%$ ,  $212^{\circ}\text{F}$**



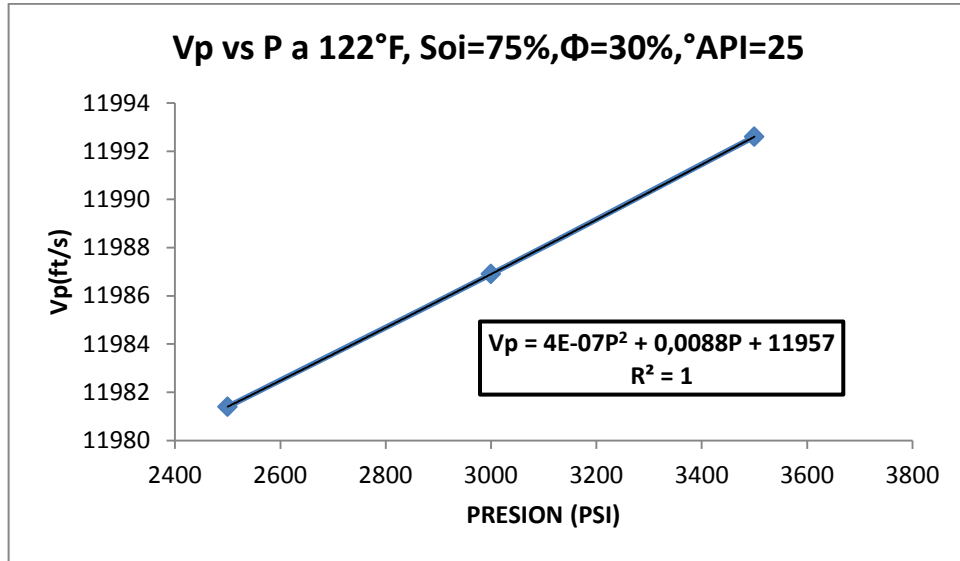
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 253. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=100\%$ ,  $257^{\circ}\text{F}$**



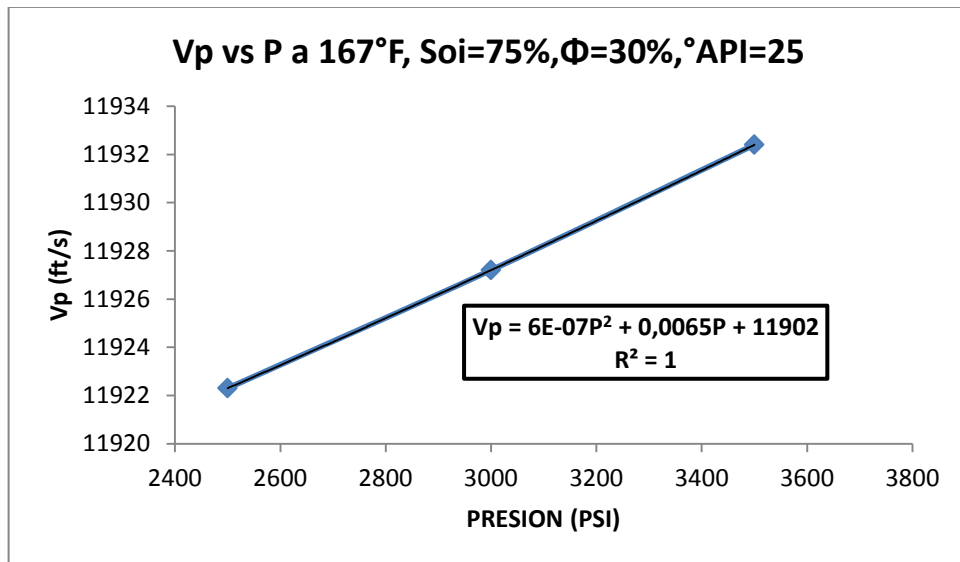
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 254. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $122^{\circ}F$**



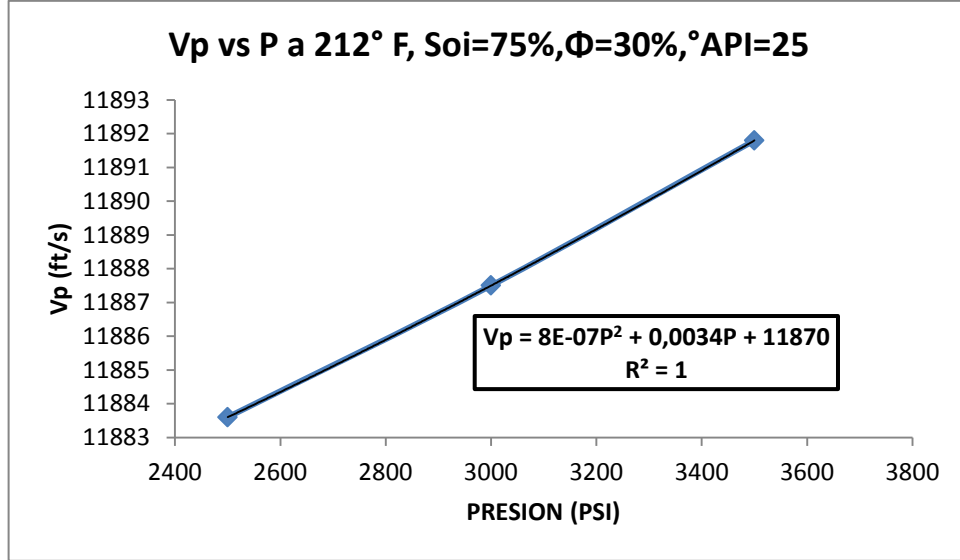
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 255. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $167^{\circ}F$**



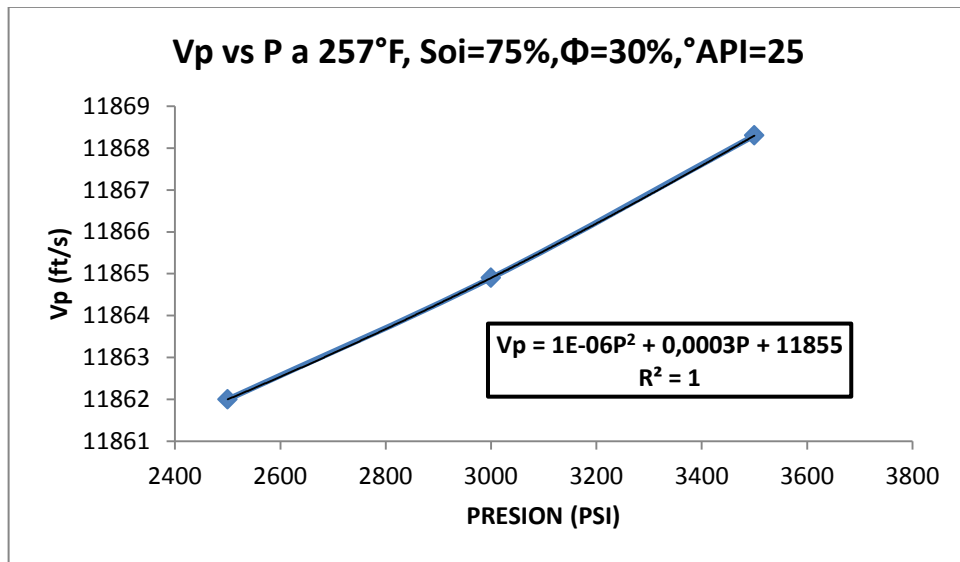
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 256. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $212^{\circ}\text{F}$**



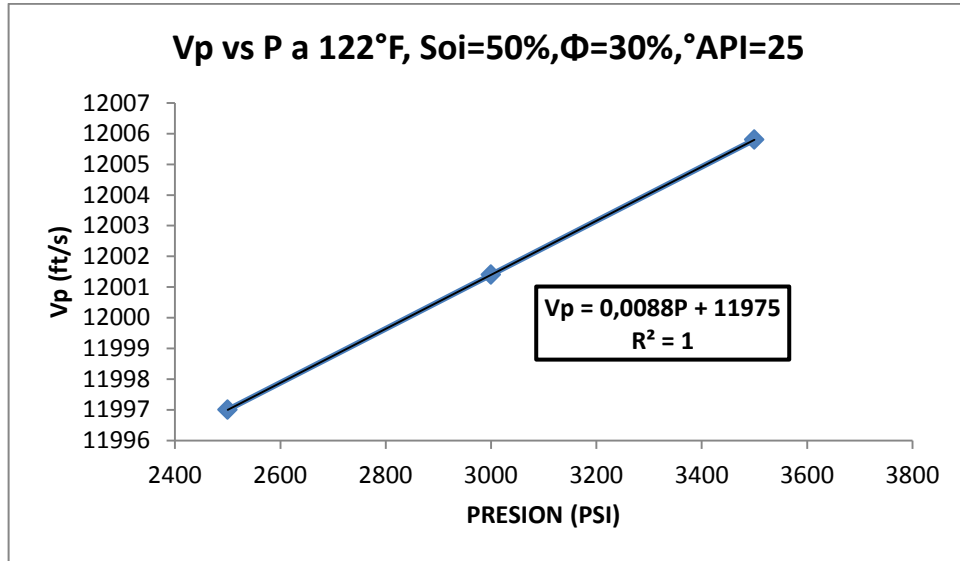
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 257. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=75\%$ ,  $257^{\circ}\text{F}$**



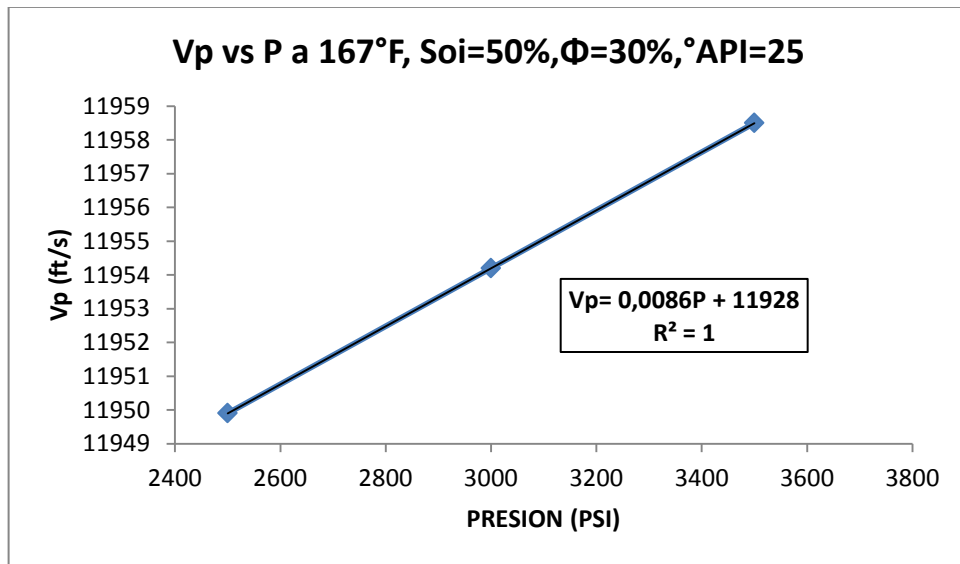
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 258. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $122^{\circ}\text{F}$**



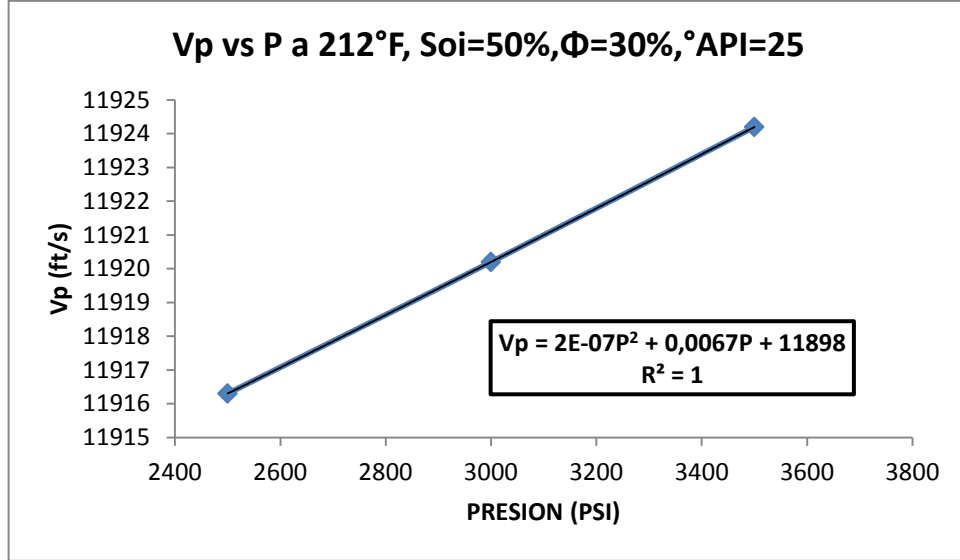
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 259. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $167^{\circ}\text{F}$**



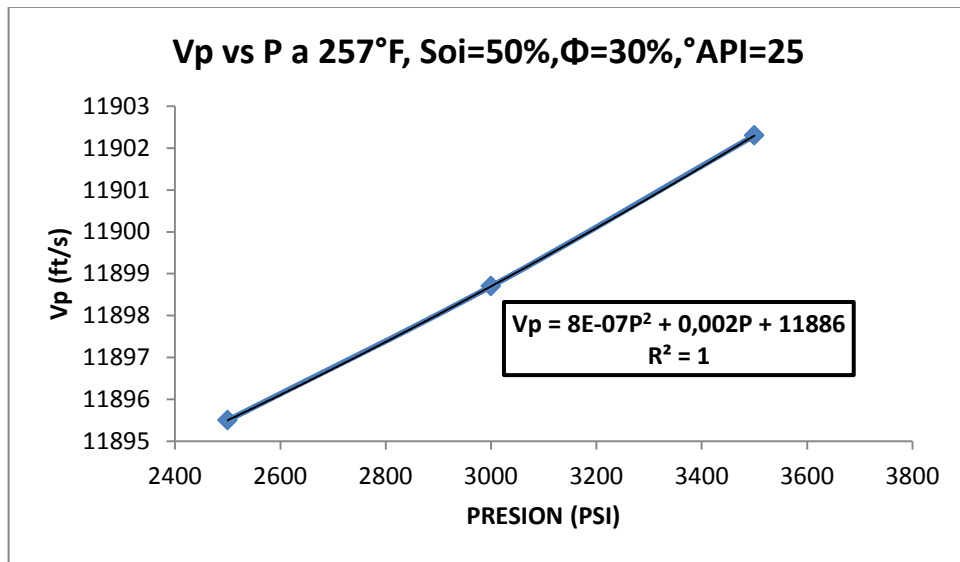
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 260. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $212^{\circ}F$**



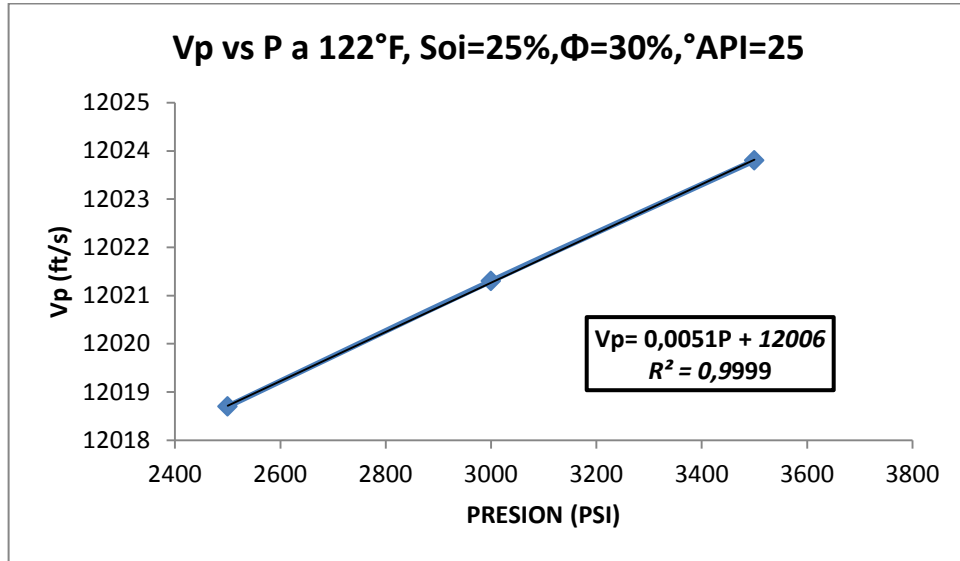
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 261. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=50\%$ ,  $257^{\circ}F$**



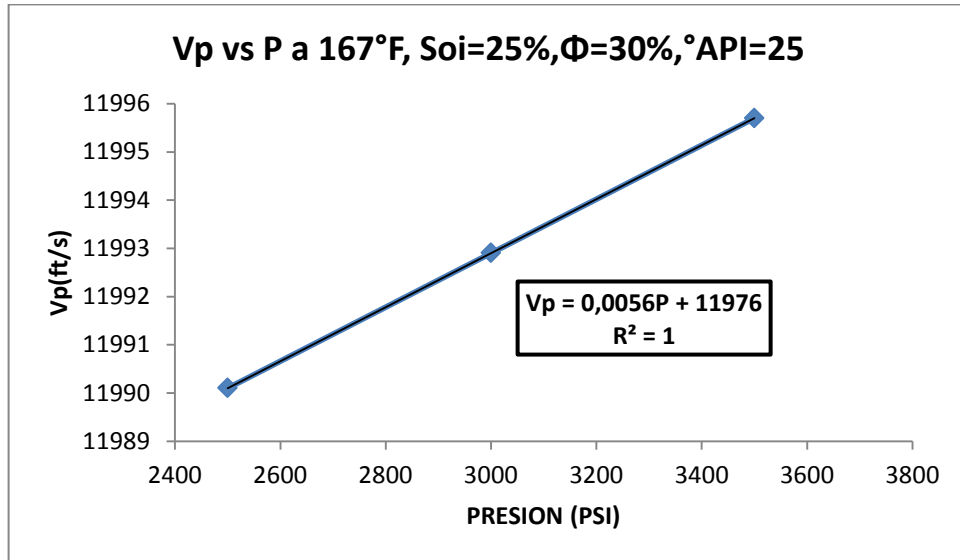
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 262. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $122^{\circ}\text{F}$**



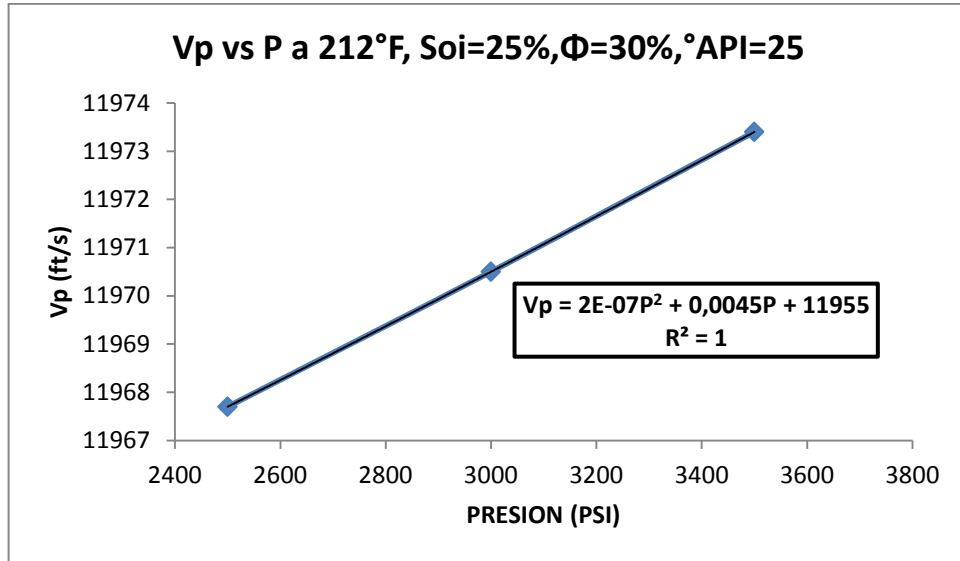
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 263. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $167^{\circ}\text{F}$**



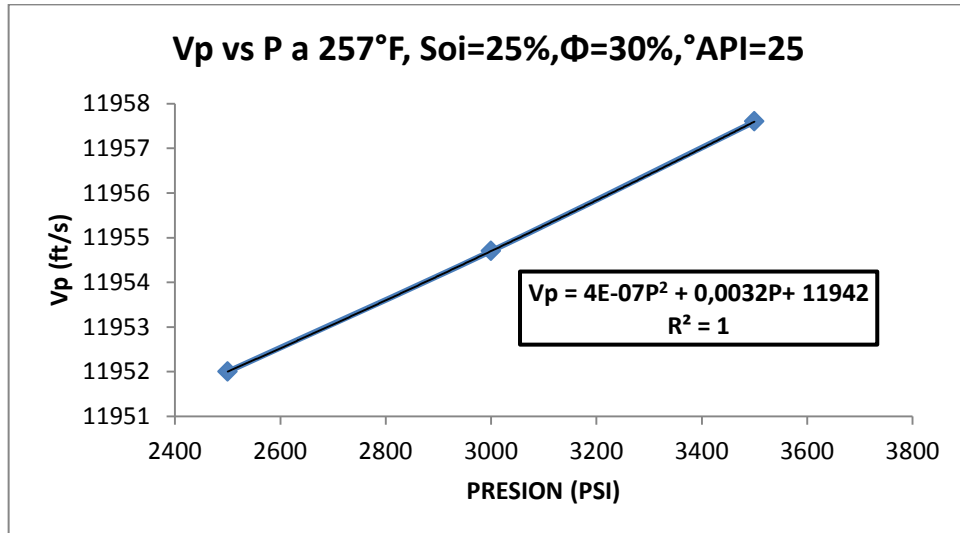
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 264. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $212^{\circ}F$**



**FUENTE: Los Autores**

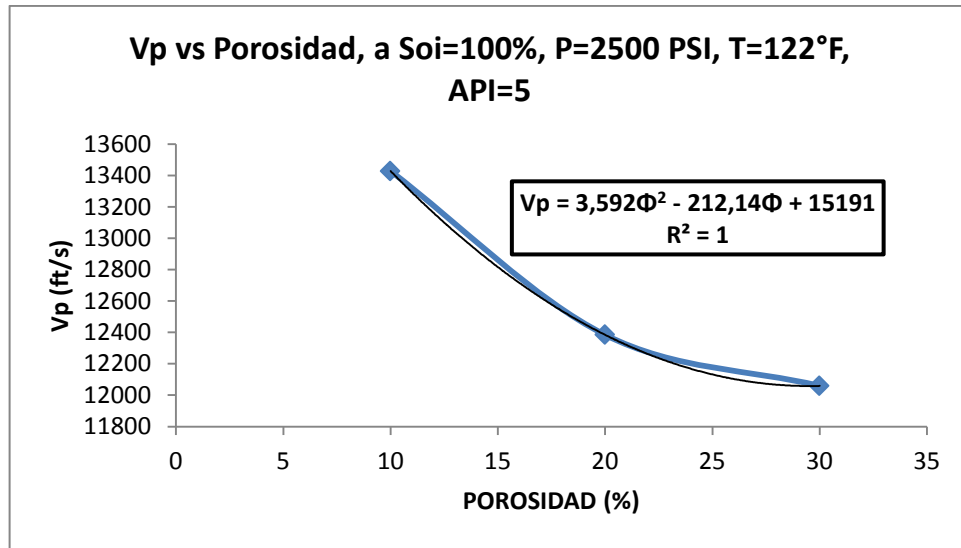
**Figura 265. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{oi}=25\%$ ,  $257^{\circ}F$**



**FUENTE: Los Autores**

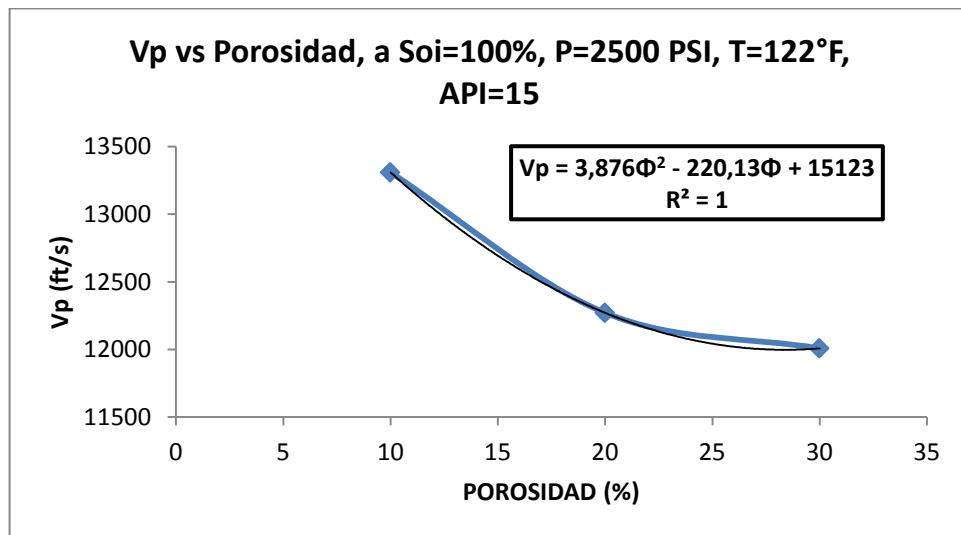
### 4.9.3 ONDA COMPRESIONAL CONTRA POROSIDAD A PRESION Y TEMPERATURA CONSTANTES, Y DISTINTOS TIPOS DE PETRÓLEO

Figura 266. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de porosidad a  $S_{oi}=100\%$ , y diferentes tipos de petróleo



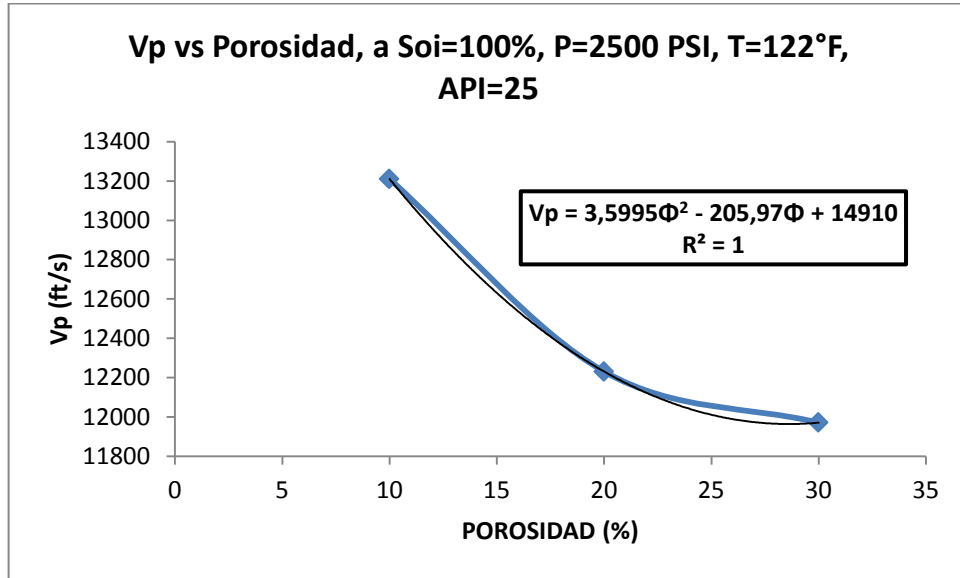
FUENTE: Los Autores

Figura 267. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de porosidad a  $S_{oi}=100\%$ , y diferentes tipos de petróleo



FUENTE: Los Autores

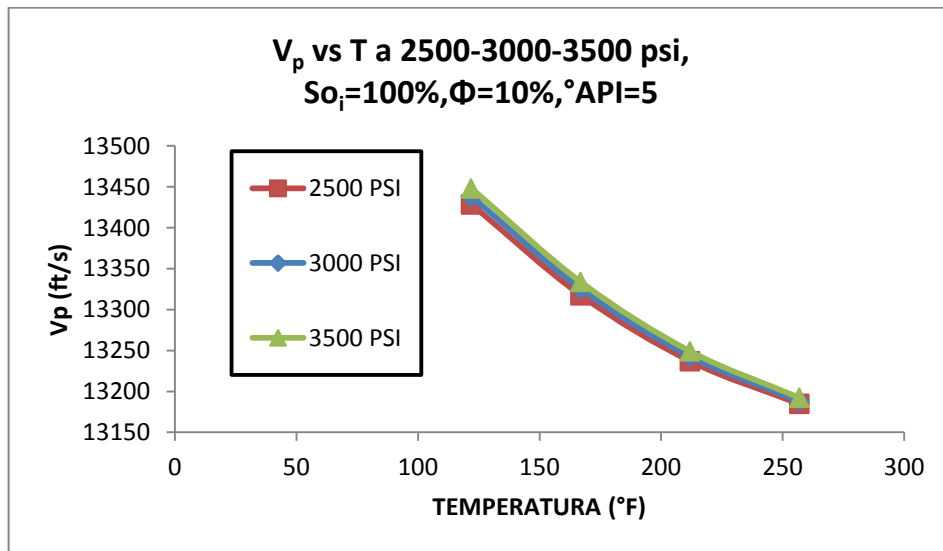
**Figura 268. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de porosidad a  $S_{oi}=100\%$ , y diferentes tipos de petróleo**



FUENTE: Los Autores

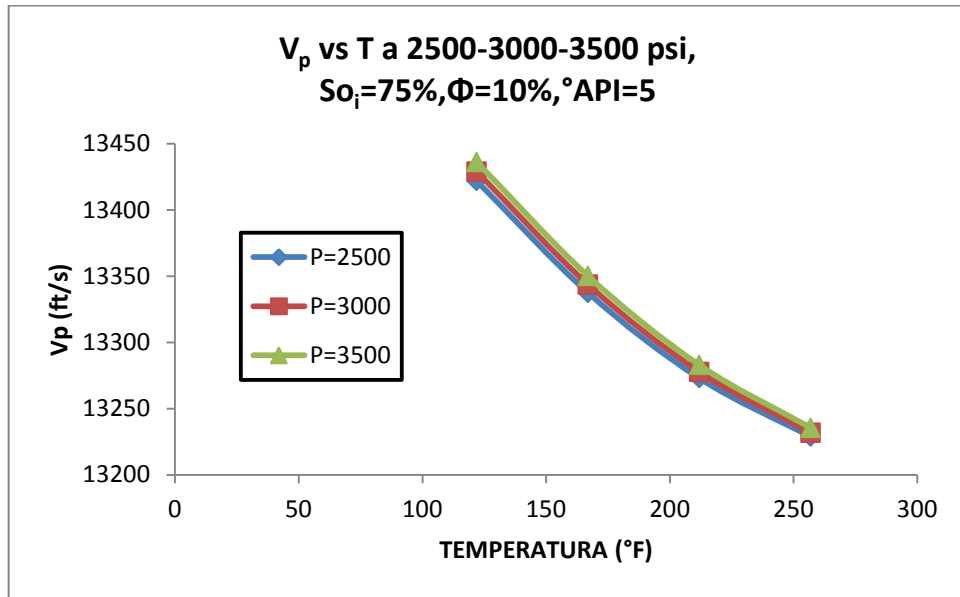
#### 4.10 GRAFICAS COMPARATIVAS DE VELOCIDAD DE LA ONDA P Vs TEMPERATURA A DIFERENTES CONDICIONES

**Figura 269. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=100\%$ , y diferentes presiones**



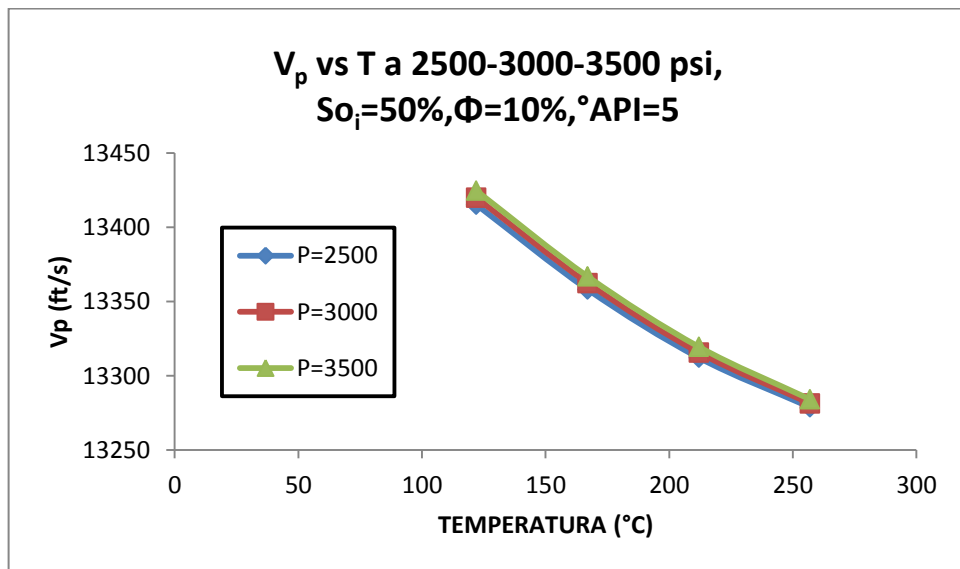
FUENTE: Los Autores

**Figura 270. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=75\%$ , y diferentes presiones**



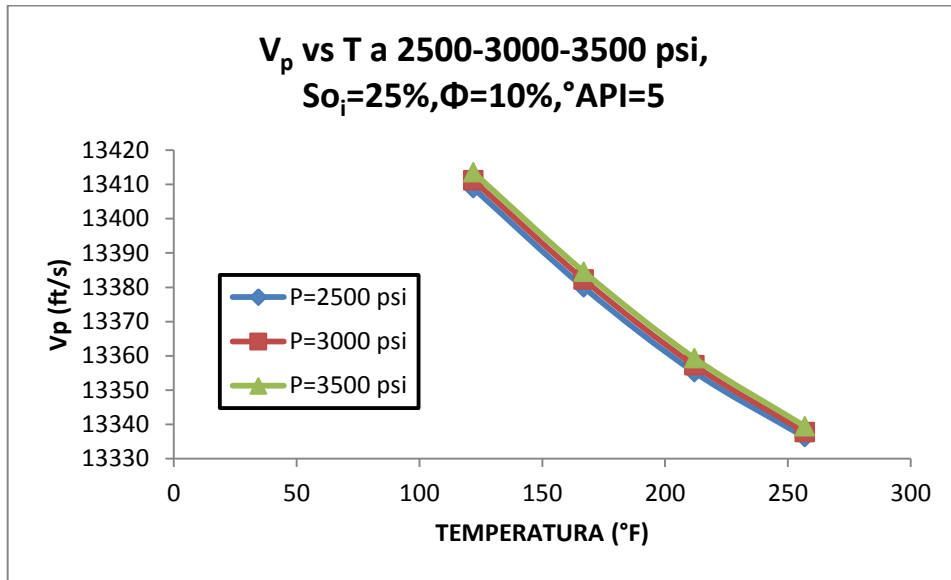
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 271. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=50\%$ , y diferentes presiones**



**FUENTE: Los Autores**

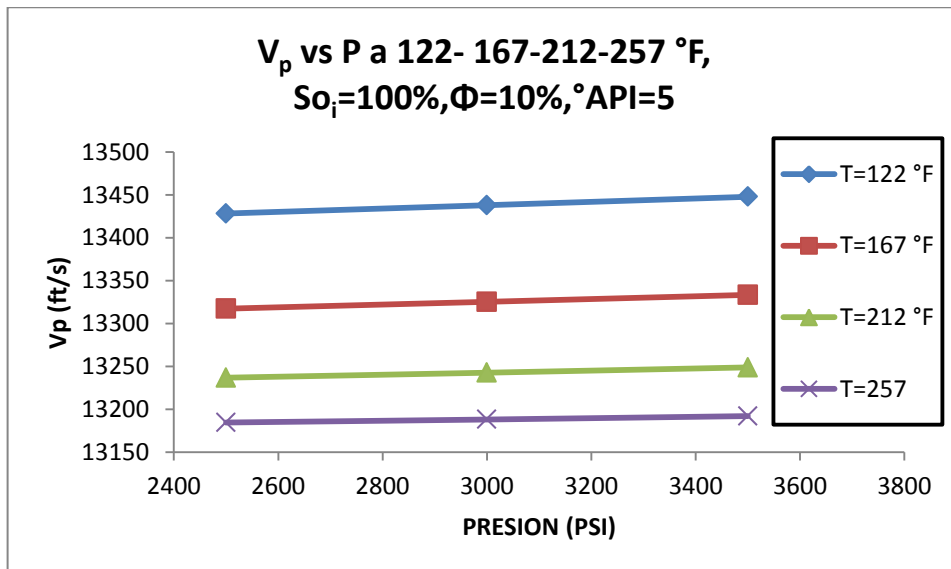
**Figura 272. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=25\%$ , y diferentes presiones**



FUENTE: Los Autores

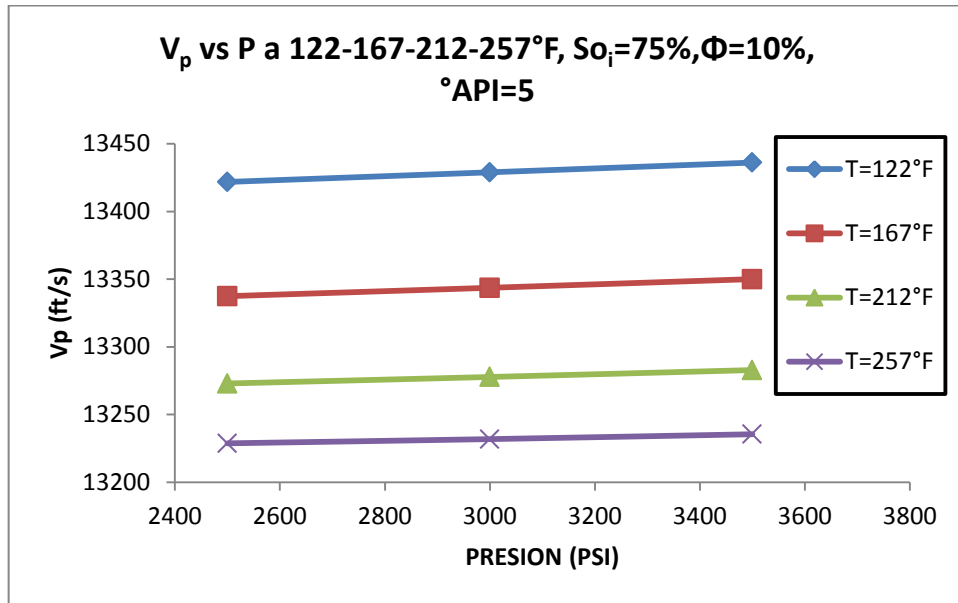
#### 4.11 GRAFICAS COMPARATIVAS DE VELOCIDAD DE LA ONDA P Vs PRESIÓN A DIFERENTES CONDICIONES

**Figura 273. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=100\%$ , y diferentes temperaturas**



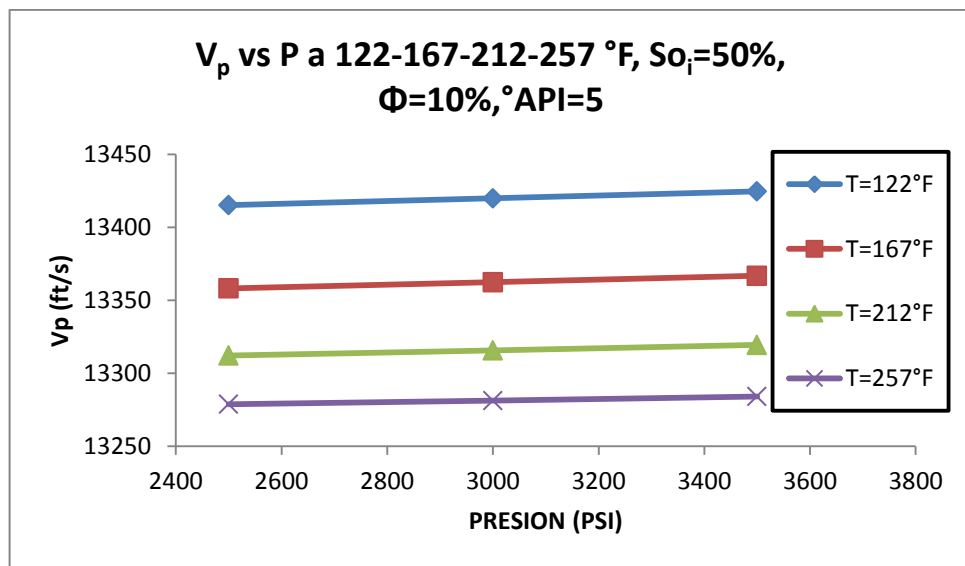
FUENTE: Los Autores

**Figura 274. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=75\%$ , y diferentes temperaturas**



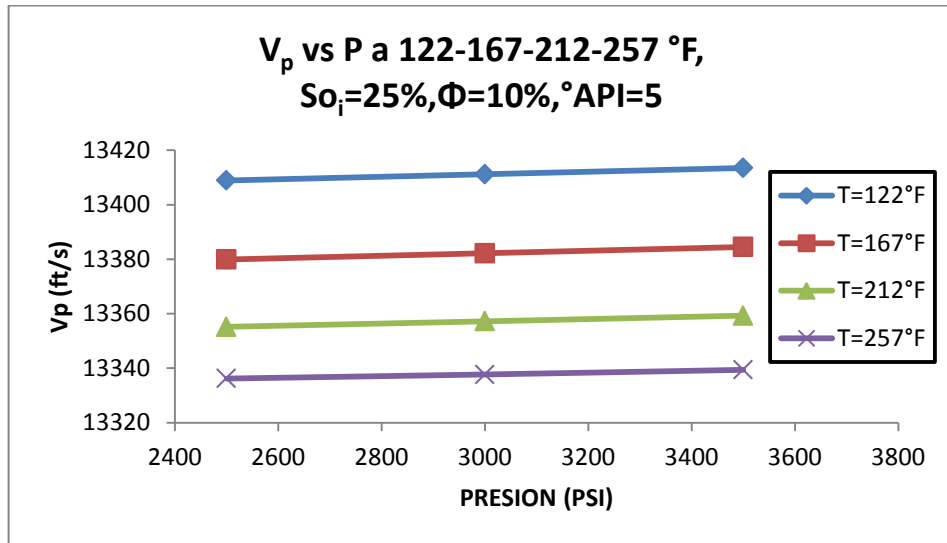
**FUENTE: Los Autores**

**Figura 275. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=50\%$ , y diferentes temperaturas**



**FUENTE: Los Autores**

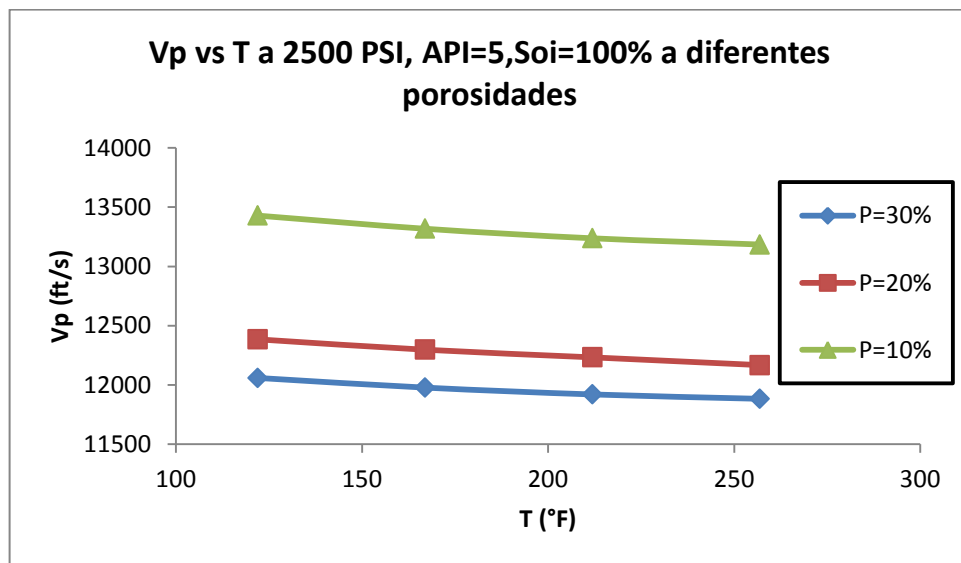
**Figura 276. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de presión a  $S_{o_i}=25\%$ , y diferentes temperaturas**



FUENTE: Los Autores

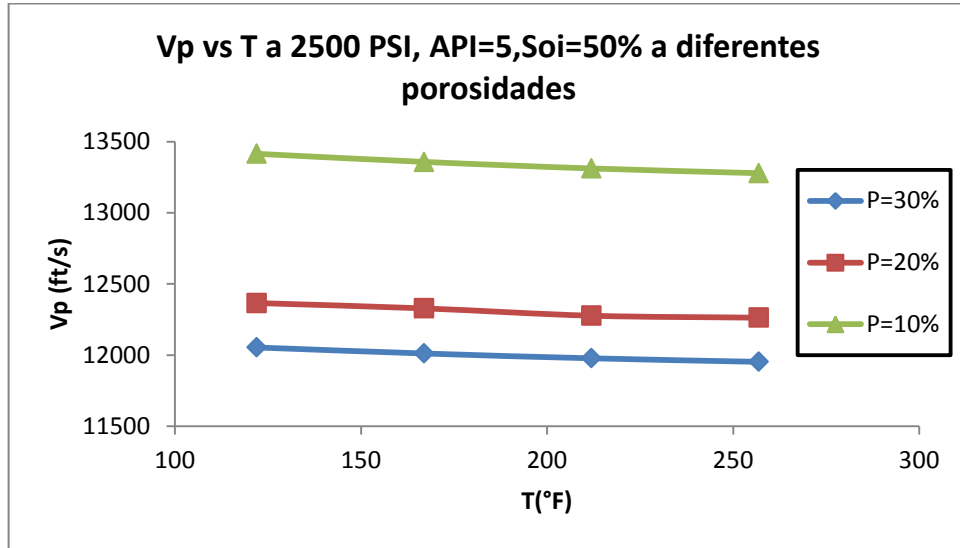
#### 4.12 GRAFICAS COMPARATIVAS DE VELOCIDAD DE LA ONDA P Vs TEMPERATURA A DIFERENTES POROSIDADES Y SATURACIONES DE PETRÓLEO CON GRAVEDAD API=5.

**Figura 277. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{o_i}=100\%$ , y diferentes porosidades**



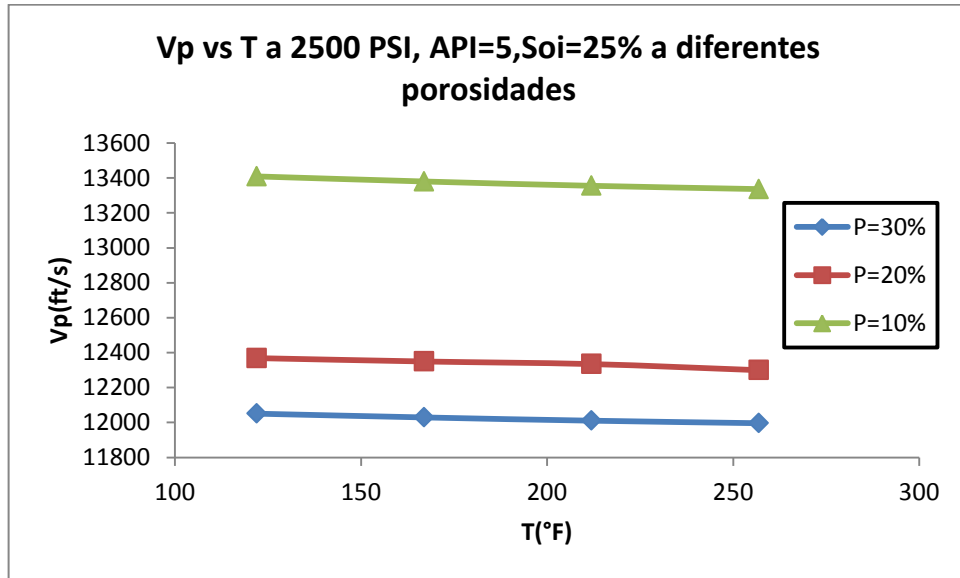
FUENTE: Los Autores

**Figura 278. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=50\%$ , y diferentes porosidades**



FUENTE: Los Autores

**Figura 279. Variación de la velocidad de propagación de la onda P, debida a cambio de temperatura a  $S_{oi}=25\%$ , y diferentes porosidades**



FUENTE: Los Autores

#### 4.13 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Después de evaluar los parámetros, e identificar los más representativos en el caso de estudio (yacimiento en el cual se aplique) se pueden obtener las ecuaciones que describen la tendencia de la transmisión de la ondas bajo determinadas condiciones en las cuales se encuentra el yacimiento al momento en que se realiza tanto la adquisición sísmica como los registros del yacimiento en particular

La metodología obtenida es una herramienta muy útil para la caracterización de un yacimiento por lo cual se puede aplicar en campos no solo en fase de exploración sino también que estén o sean candidatos a ser sometidos a procesos de recobro mejorado, permitiendo la evaluación y ubicación de zonas prospectivas antes no estudiadas o descartadas y de esta manera inferir con menor incertidumbre cual sería la respuesta de las velocidades sísmicas de una zona del yacimiento sin la necesidad de perforar un pozo, asociándolo al contenido de fluidos y las características que éste presente

Uno de los parámetros que mayor influencia presenta sobre la respuesta sísmica es gravedad API del petróleo presente, bajos los escenarios estudiados se observo un incremento en la atenuación de la onda P a medida que la gravedad API disminuye. De manera análoga la onda S se ve ligeramente afectada por este parámetro.

De manera opuesta a lo que se esperaba, variaciones en la presión a la cual se encuentra sometida la muestra, no representan cambios significativos en las velocidades, aun partiendo del hecho que una sobre carga pude causar disminuciones representativas en el espacio poroso disponible para el

almacenamiento de hidrocarburos u otros fluidos propios de un yacimiento, esto se podría explicar al analizar la variación máxima que puede sufrir el volumen de la roca, el cual no afecta de manera notable a los fluidos contenidos en ella, ya que estos no se exponen directamente a dicha sobre carga, este efecto es más notorio cuando el fluido presenta densidades iniciales altas, obteniéndose una sobre posición casi total de las distintas curvas a diferentes condiciones.

Al igual que la presión la temperatura tuvo un comportamiento contrario al inicialmente pensado, ya que como se observa en las diferentes graficas, genera un cambio representativo en el tránsito de onda P el cual se incrementa cuando el fluido presente es de tipo pesado ya que modifica la densidad total del medio lo que se refleja en la respuesta acústica.

En lo referente a los niveles de saturación, esta metodología es un claro discriminante de los porcentajes iniciales, con una adecuada y detallada aplicación en el medio estudiado, y partiendo de una fuente de información altamente confiable, es posible no solo discriminar zonas que lo contengan, también es posible determinar cuáles de ellas contienen niveles económicamente viables que justifiquen un proceso de cañoneo que constituyan un aumento en la producción global del pozo, es este punto quizás unos de los principales logros de este trabajo, disminuir la incertidumbre no solo en el lugar del subsuelo en el cual se almacenan los hidrocarburos si no que a su vez los niveles presentes en ellos.

Como se esperaba, los niveles de atenuación de la onda P están en gran medida influenciados por los niveles de porosidad y el tipo de litología presentes en la muestra lo cual afecta directamente la densidad total del medio, esta propiedad se había considerado como una de las más sensibles desde el inicio de este trabajo.

La onda tipo S, no sufre variaciones significativas por cambios de presión o por los niveles de saturación de petróleo, sin embargo, presenta leves variaciones ante cambios de temperatura o de la gravedad API del petróleo saturante, por lo cual puede llegar a aportar información valiosa como discriminante del tipo de fluido existente en el yacimiento.

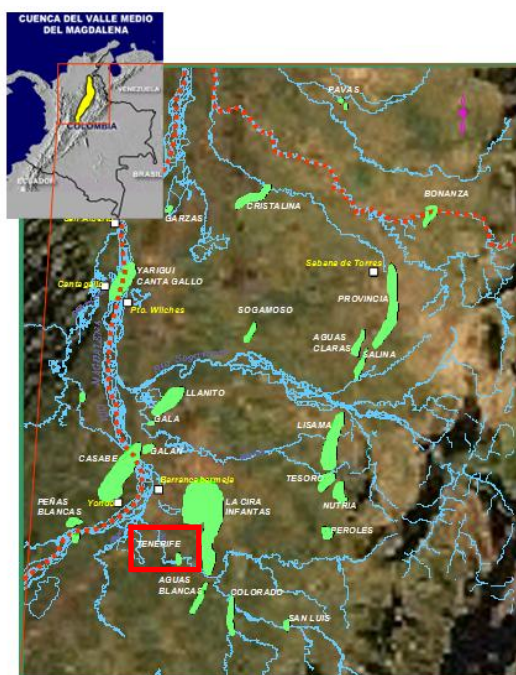
## 5. APLICACIÓN AL CAMPO TENERIFE

### 5.1 GENERALIDADES DE TENERIFE:

#### 5.1.1 UBICACIÓN

Localizado en el departamento de Santander, el campo Tenerife limita en su región norte con el municipio de Barrancabermeja, al oriente por el campo la Cira Infantas y al sur occidente por el municipio de Simacota, zona que pertenece a la cuenca del Valle medio del Magdalena.

*Figura 280. Localización del campo Tenerife*



FUENTE: Ecopetrol S.A.

#### 5.1.2 RESEÑA HISTÓRICA

La exploración tuvo lugar en 1968 con la iniciativa de perforar un pozo exploratorio en base a tres razones:

La interpretación del levantamiento sismográfico realizado en el área occidente del campo Cira Infantas y Aguas Blancas de donde se infería la posibilidad de tener un cierre estructural contra falla.

En los trabajos geofísicos realizados se evidenciaba una condición estructural que representaba una posibilidad de acumulación de hidrocarburos donde se tenía la idea de encontrar además, arenas con características (permeabilidad y porosidad) más favorables que en Aguas Blancas.

Posibles accidentes o inconformidades de tipo estratigráfico en la columna del terciario que permitirían acumulaciones petrolíferas.

Por las características geológicas del área y su relación con campos de petróleo probados (Cira y Aguas Blancas) se esperaba producción de hidrocarburos en las areniscas de la formación mugrosa (zonas B y C) y en las areniscas del grupo Chorro especialmente las correspondientes a la Formación la Paz.

En Abril 7 de 1968 se alcanzó la profundidad final de 8021 pies del pozo Tenerife 1, con base en los registros eléctricos y las condiciones del hueco se decidió colocar un tapón balanceado desde 7900 a 7300 pies.

### **5.1.3 POZOS EXISTENTES**

Tenerife cuenta hoy con tres pozos perforados hallándose presencia de hidrocarburos en dos de ellos, Tenerife 1 y Tenerife 2, los cuales atraviesan las formaciones Colorado, y Mugrosa, destacándose la zona basal de esta última conocida como Mugrosa zona C, cuya base oscila entre 6900 ft (2103.12 m) y 7300 ft (2225.04 m) a una temperatura promedio de 150 °F (65.56°C) y una

presión inicial de 3170 psi reportada a 7200 ft (21.86 MPa a 2194.56 m), mostrando rangos de porosidad entre el 15% y el 19% y de permeabilidad entre 10 mD y 40 mD.

**Figura 281. Localización de los pozos del campo Tenerife.**



FUENTE: Ecopetrol S.A.

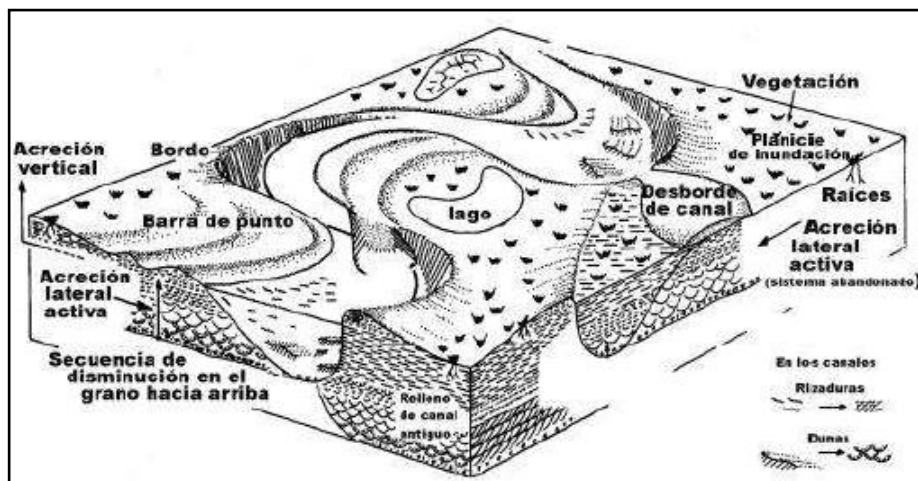
#### **5.1.4 FLUIDOS**

La gravedad API y la viscosidad de los fluidos del campo son de 22.8 grados y 32cp a 150°F - 105cp a 100°F, respectivamente. En los respectivos informes no se reporta presencia de gas y el agua producida tiene 12215ppm de NaCl.

#### **5.1.5 AMBIENTES DE DEPOSITACIÓN**

Los corazones de la formación Mugrosa-C muestran evidencias de sistemas depositacionales asociados a ríos meándricos como los ilustrados en la Figura 279

Figura 282. Esquema de Modelo Depositacional en Ríos Meándricos Miall, A.D. (1987).



FUENTE: Ecopetrol S.A.

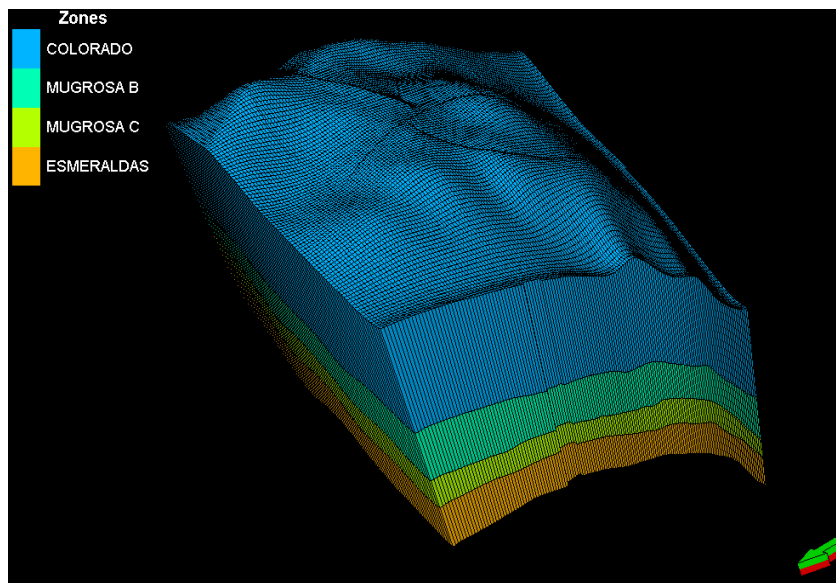
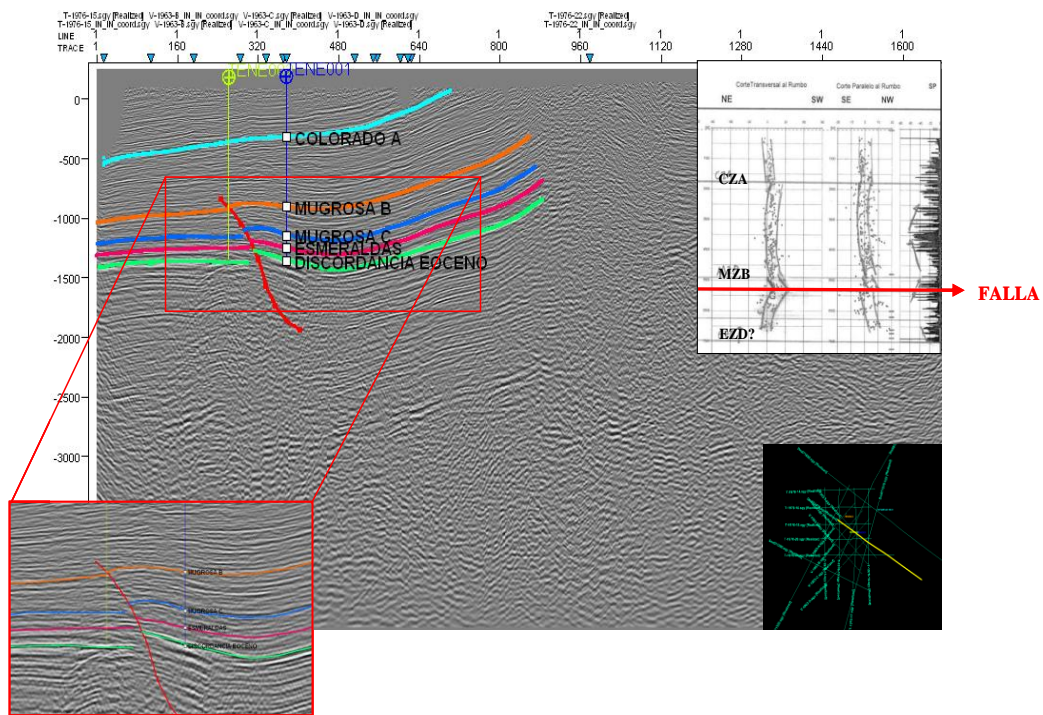
Las electrofacies identificadas corresponden a ambientes fluviales caracterizados por depósitos de flood plain, desborde, canal, barras de punto asociados a sistemas depositacionales de ríos meándricos.

En los tres pozos se identifican en orden de abundancia hacia la base, facies de Llanuras de inundación, canales y depósitos de desborde, los canales van aumentando su abundancia hacia el tope.

### 5.1.6 MODELO ESTRUCTURAL

A partir de la interpretación de algunas líneas sísmicas de buzamiento y la información de los tres pozos perforados y asumiendo que las fallas presentes actúan como sellos, se tendría un anticlinal cortado por fallas inversas y unas pequeñas normales, donde estas propiciarían la formación de compartimientos en las unidades productoras.

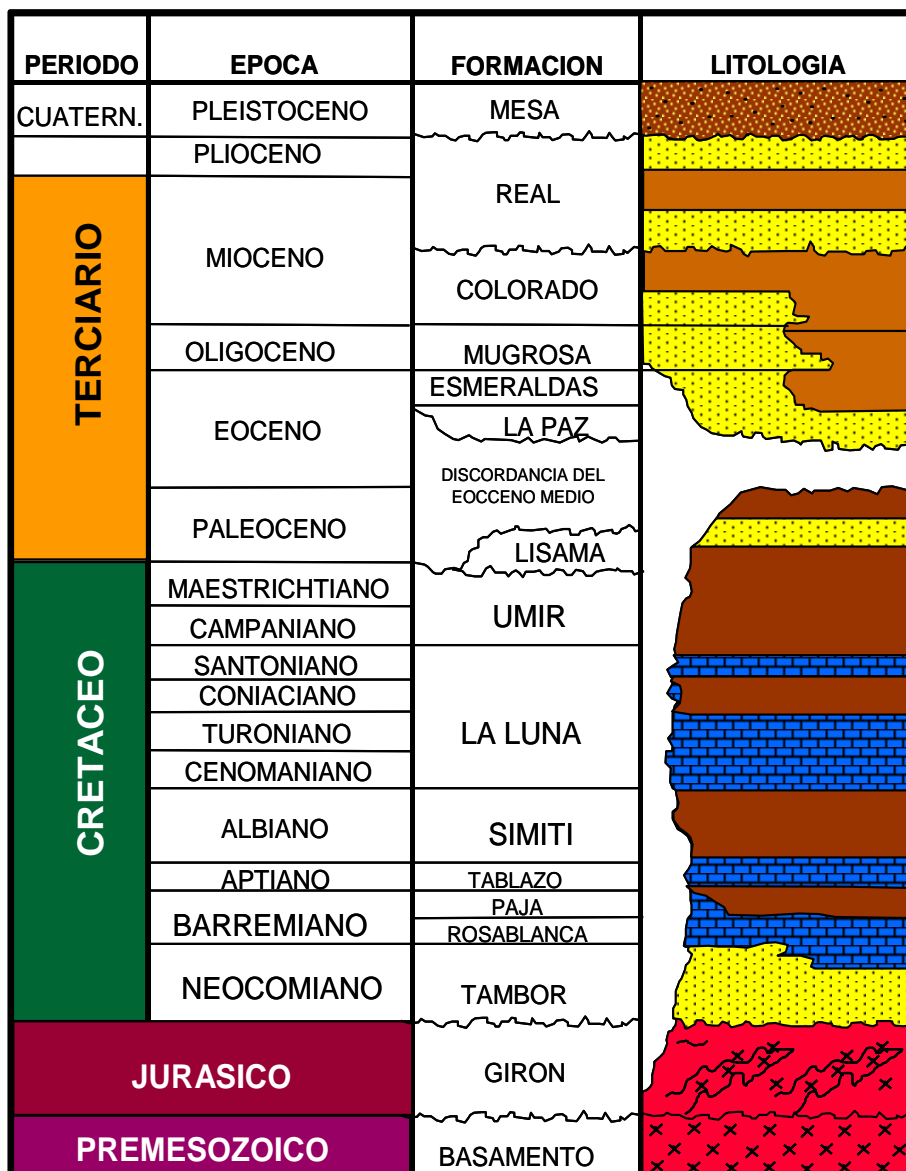
**Figura 283. Modelo Estructural del Campo Tenerife.**



FUENTE: Ecopetrol S.A.

### 5.1.7 MODELO ESTRATIGRAFICO

Figura 284. Columna Estratigráfica del Campo Tenerife.



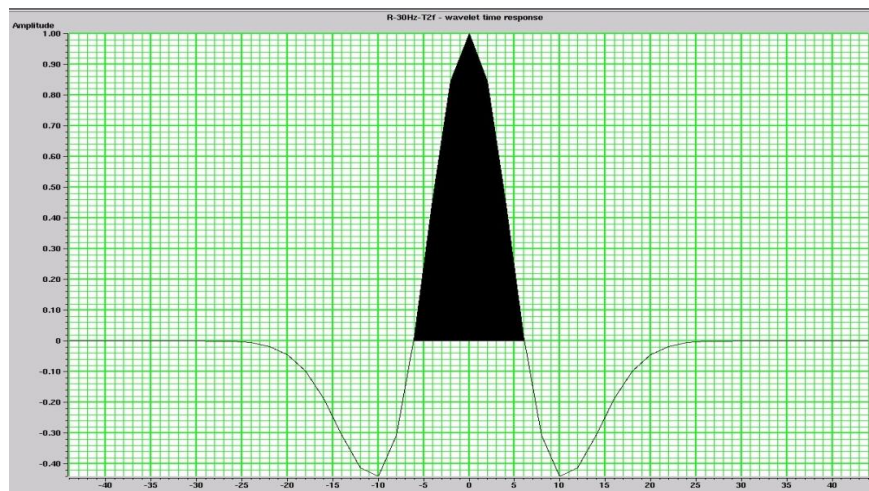
FUENTE: Ecopetrol S.A.

## 5.2 MODELADO

### 5.2.1 ELABORACION DE LOS SISMOGRAMAS SINTETICOS

Para generar los sismogramas de este estudio, se construyó una ondicula tipo Ricker de fase cero de 35 Hz (Figura 284); la frecuencia se extrajo de la sísmica del campo Tenerife.

**Figura 285. Ondicula tipo Ricker, fase cero, para la generación de sismogramas sintéticos 35Hz**



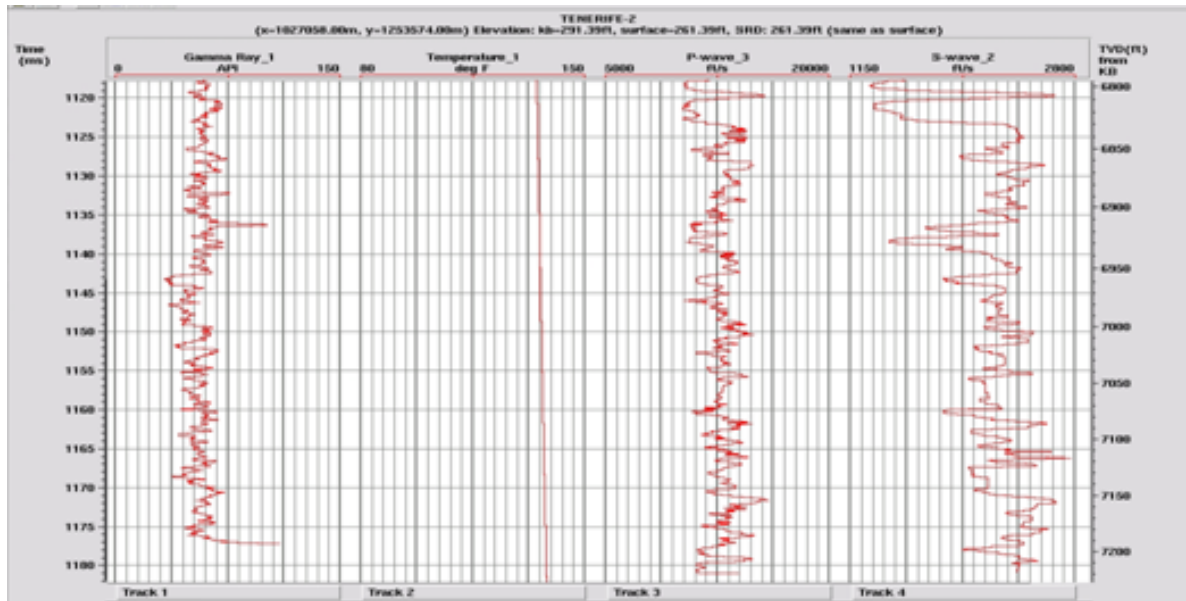
**FUENTE: Los Autores**

### 5.2.2 CAMPO TENERIFE: POZO TENERIFE 1 Y TENERIFE 2

Para el caso de este estudio, el pozo Tenerife 1 y Tenerife 2 cuentan con los registros de Temperatura, Gamma Ray, Velocidad de la onda P, y Velocidad de la onda S, a partir de los cuales se generaron tanto los registros como los

sismogramas que representan las características reales de la zona del yacimiento correspondiente a los pozos antes mencionados, razón por la cual, son tomados como el punto de partida en la comparación de la respuesta ante la presencia de las distintas variaciones.

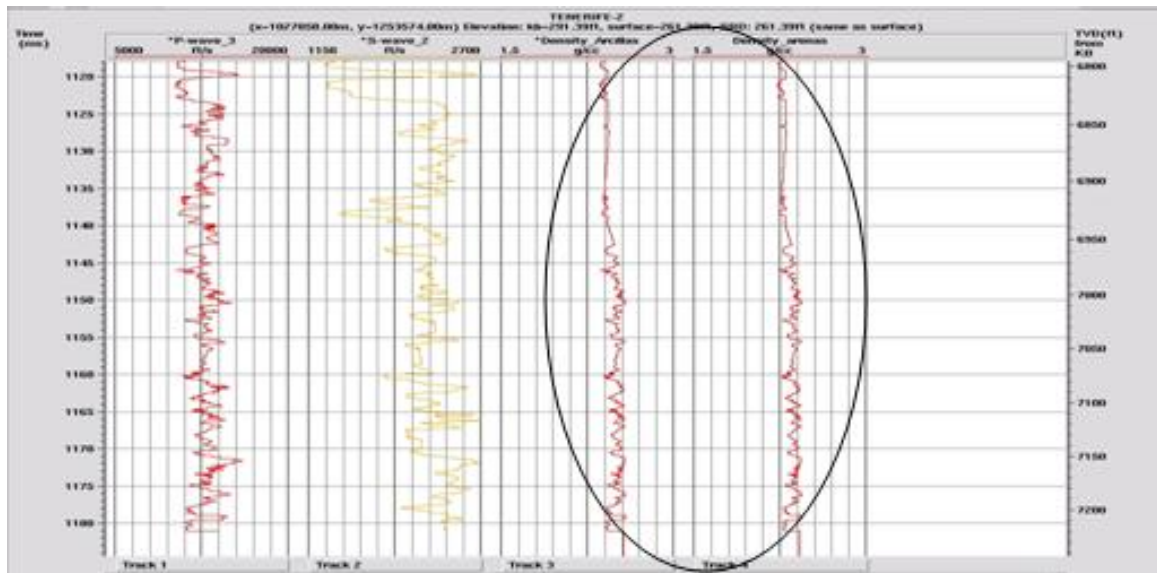
**Figura 286. Registros iniciales Pozo Tenerife 2**



FUENTE: Ecopetrol S.A.

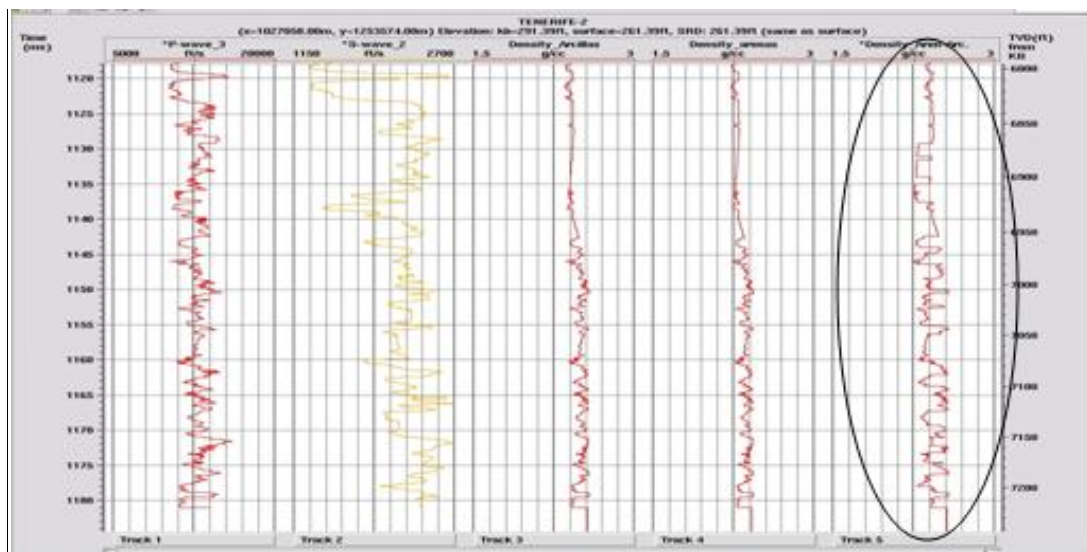
Con la ayuda de las ecuaciones de Castagna y el registro de Velocidad de la Onda P ( $V_p$ ) se procedió a analizar un registro sintético de densidad para las arcillas y para las arenas (Ver Figura 284), a partir de los cuales se generó un registro único que contiene según los intervalos de arenas reales, la densidad de cada uno de los estratos tal como se muestra en la figura 285.

**Figura 287. Registros sintéticos de densidad para arcillas y arenas.**



FUENTE: Los Autores

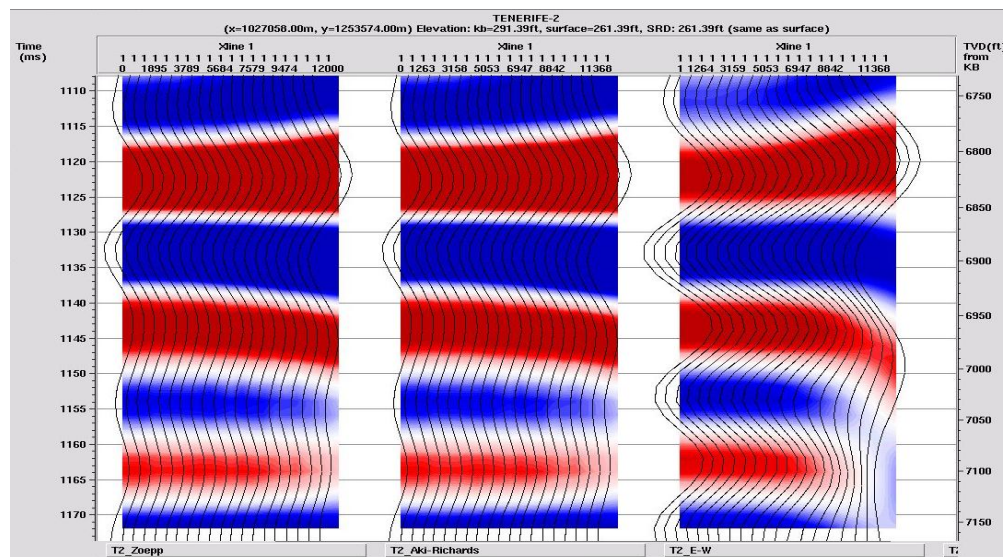
**Figura 288. Registro de densidad final.**



FUENTE: Los Autores

Una vez obtenido el registro de densidad, se generaron los sismogramas sintéticos por 3 modelados distintos (Zoeppritz, Aki-Richards, Onda elástica, figura 286) en pro de determinar cuál de los tres modelos genera el mejor ajuste o entrega la mayor cantidad de información de acuerdo a las características que presenta el yacimiento.

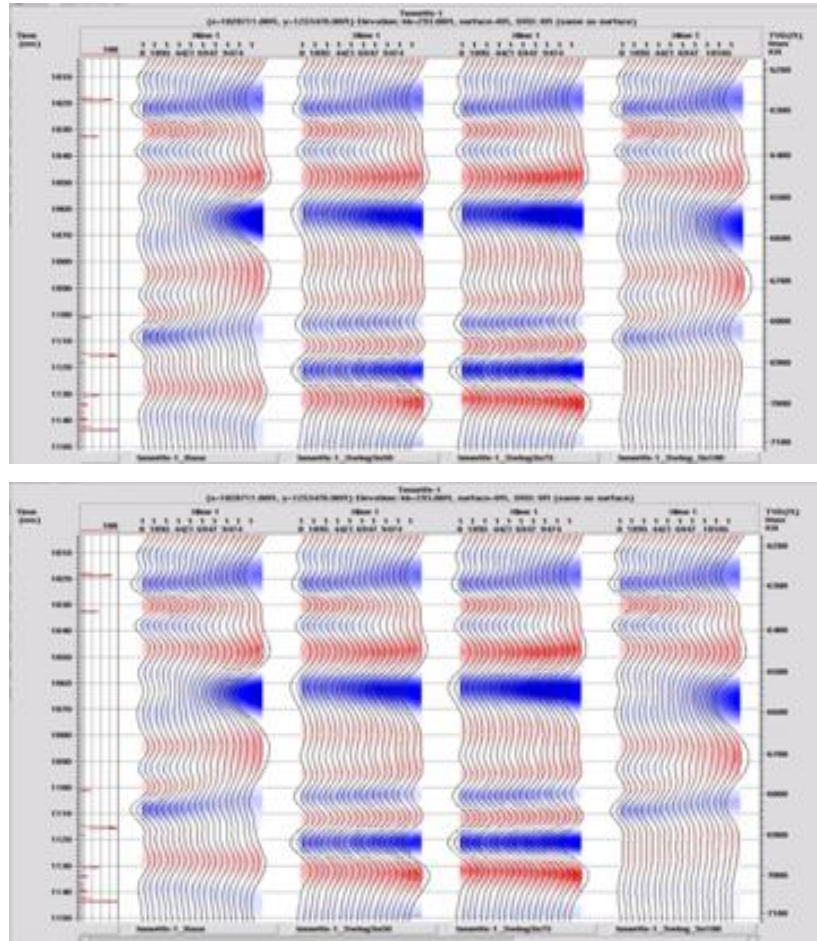
**Figura 289. Sismogramas sintéticos modelados con (de izquierda a derecha) Zoeppritz, Aki-Richards y Elastic-wave.**



FUENTE: Los Autores

De estos sismogramas se extrajeron las amplitudes, y se compararon con las de la sísmica real en la zona del pozo. Se concluyó que el modelo que presenta mayor ajuste para el caso de Tenerife fue el de Akí Richards. De lo cual se obtuvo lo que se muestra a continuación a diferentes saturaciones iniciales de aceite:

**Figura 290. Sismogramas sintéticos (de izquierda a derecha) Caso base,  $S_o=50\%$ ,  $S_o=75\%$  y  $S_o=100\%$  Tenerife 1 (Gráfica superior) y Tenerife 2 (Gráfica inferior)**

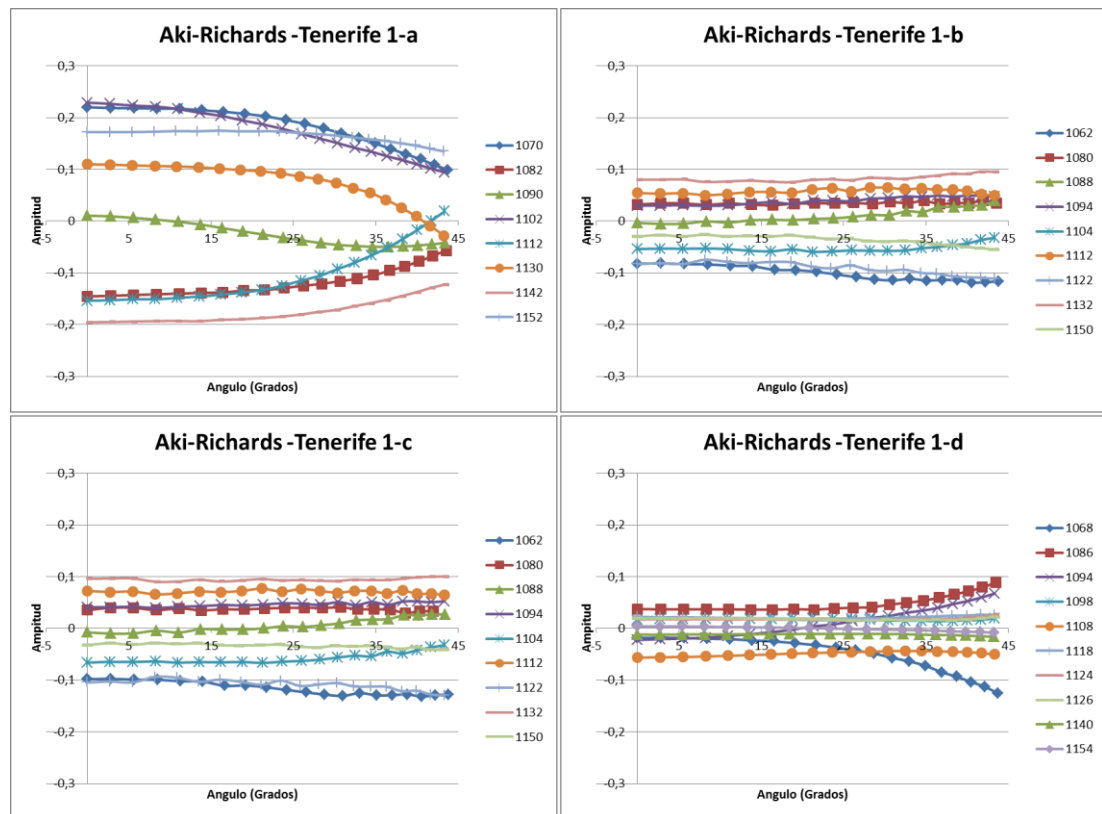


**FUENTE: Los Autores**

Finalmente se realizó el análisis de amplitudes en cada una de las zonas arenosas con el fin de observar el comportamiento de las de estas en el sector de interés en los cuatro escenarios planteados, el primero basado exclusivamente en condiciones actuales de saturación de fluidos (según registros de pozo) y las otras tres mediante la predicción de mejores condiciones de presencia de hidrocarburos

a través de la sustitución de fluidos con el fin de caracterizar la respuesta de estos , lo que mostró lo siguiente para el pozo Tenerife 1:

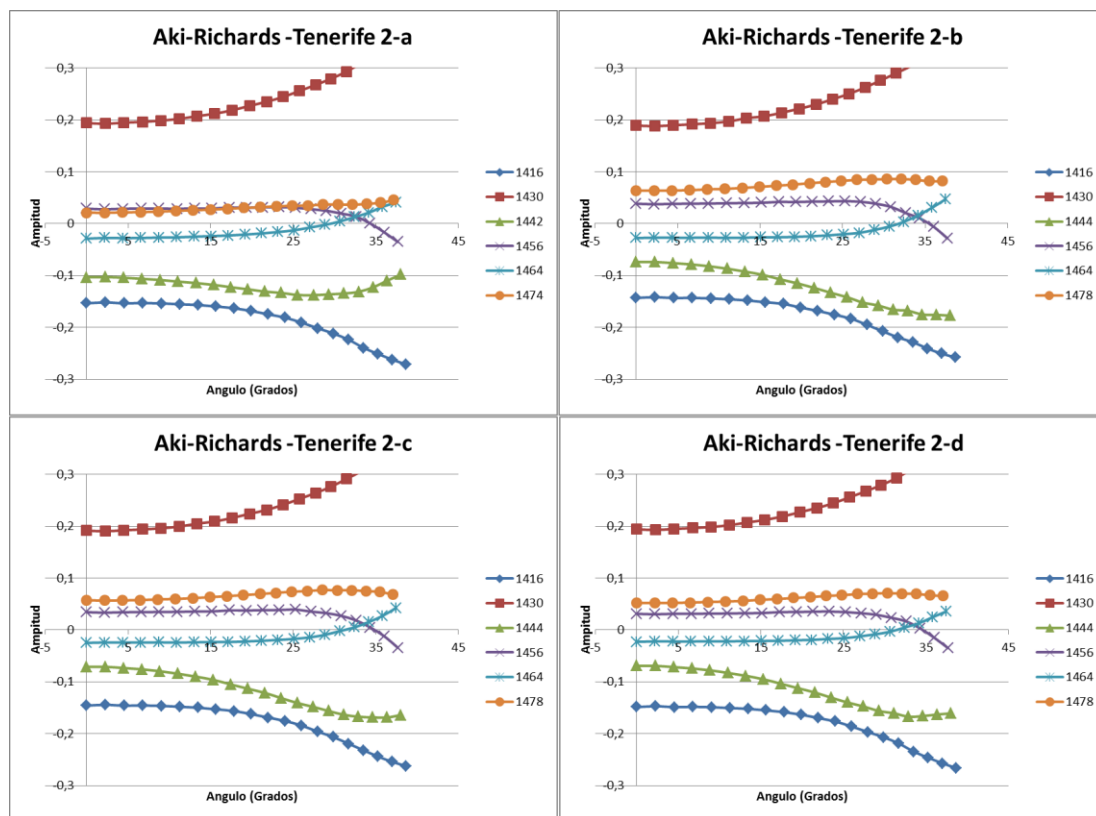
**Figura 291. Análisis de amplitudes pozo Tenerife 1 a-Caso Base b-Soi=50% c- Soi=75%y d- Soi=100%.**



FUENTE: Los Autores

Para el pozo Tenerife 2

**Figura 292. Análisis de amplitudes pozo Tenerife 2 a-Caso Base b-Soi=50% c- Soi=75%y d- Soi=100%.**

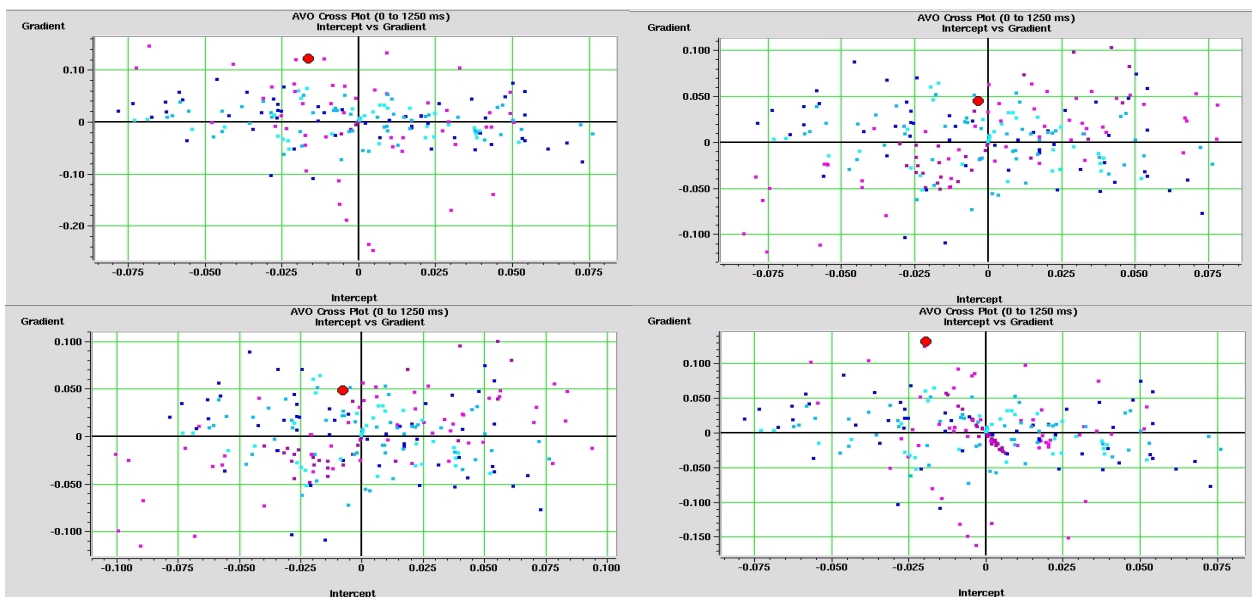


FUENTE: Los Autores

### 5.2.3 ANALISIS AVO (Amplitud Vs Offset)

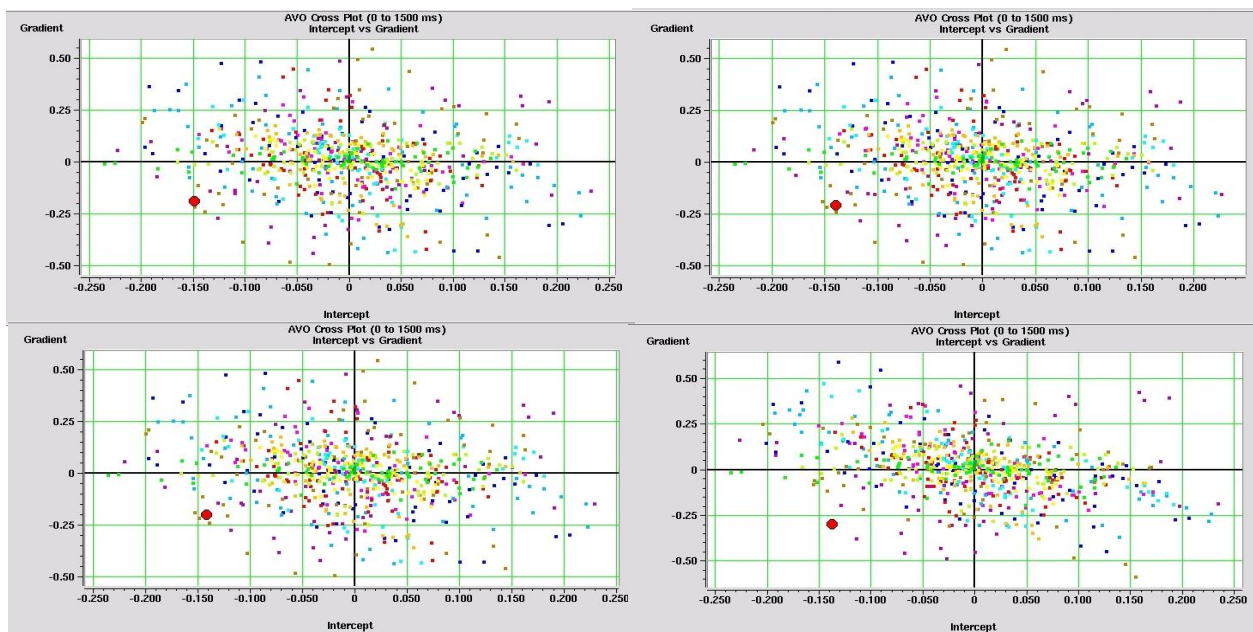
El análisis AVO consiste en observar el comportamiento de las amplitudes con el offset y determinar si este comportamiento se aleja de la tendencia normal, entendiendo como normal la respuesta ante arenas saturadas con salmuera conocido como tendencia húmeda (*wet trend*) (Calle 2010). Ver anexo 2 y 3.

**Figura 293. Crossplot Análisis de Gradiente A vs B Tenerife 1 arriba izquierda-Caso Base Arriba derecha-Soi=50% abajo izquierda- Soi=75%y abajo dererecha- Soi=100%.**



FUENTE: Los Autores

**Figura 294. Crossplot Análisis de Gradiente A vs B Tenerife 2 arriba izquierda-Caso Base Arriba derecha-Soi=50% abajo izquierda- Soi=75%y abajo dererecha- Soi=100%.**



FUENTE: Los Autores

Para el caso de saturación de fluidos actual de Tenerife 1 , Como se mencionó anteriormente las arenas están saturadas con salmuera y solo unas pocas trazas de petróleo lo que se ve reflejado en la tendencia lineal casi horizontal de la grafica 290 superior izquierda, seguidas por la respuesta obtenida al llevar por medio de la substitución de fluidos la saturación de aceite al 50%, 75 % y 100% respectivamente, observando como era de esperarse, una dispersión de los datos alejándose de la tendencia ligeramente marcada para el caso inicial como resultado de la presencia de hidrocarburos.

Para el pozo Tenerife 2, donde las arenas tiene altos niveles de saturación de petróleo se realizó el mismo procedimiento (Ver figura 289). Se observó inicialmente que el comportamiento de las amplitudes no presenta variaciones considerables entre los escenarios propuestos debido a la presencia de hidrocarburos en todos los casos, las diferencias (minimas) obedecen a la proporción en que se encuentran.

En consecuencia en el crossplot Ver figura 291, para todos los escenarios considerados se observa una nube de datos dispersa evidenciando la presencia de hidrocarburos.

#### **5.2.4 TENDENCIA DE VELOCIDADES COMPRESIONALES EN EL CAMPO TENERIFE**

Aplicando la metodología descrita, y partiendo de las características del yacimiento inferidas a través de los registros de pozo y demás información disponible, los resultados encontrados son los descritos a continuación.

**Tabla 15. Resultados de Vp y Vs para el campo TENERIFE, bajo diferentes valores de presión, y saturación inicial de aceite, con gravedad API=22,8.**

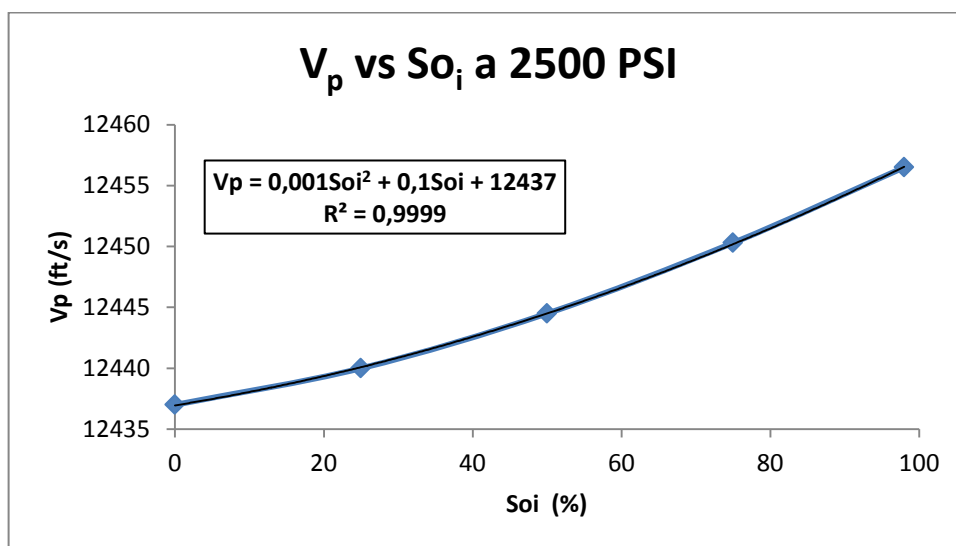
Soi	P	T ( C )	T ( F )	Vp (ft/s)	Vp (Km/s)	Vs (ft/s)	Vs (Km/s)
97,983	2500	58,33	137	12456,5	4,09297632	7025,14	2,31338018
97,983	3000	58,33	137	12456,5	4,09593288	7025,14	2,31338323
97,983	3500	58,33	137	12456,5	4,09891992	7025,14	2,31338323
75	2500	58,33	137	12450,3	4,09096464	7017,83	2,31356002
75	3000	58,33	137	12450,3	4,09312872	7017,83	2,31356002
75	3500	58,33	137	12450,3	4,09532328	7017,83	2,31356002
50	2500	58,33	137	12444,5	4,08898344	7009	2,3137368
50	3000	58,33	137	12444,5	4,090416	7009	2,31373985
50	3500	58,33	137	12444,5	4,09184856	7009	2,31373985
25	2500	58,33	137	12440	4,08703272	7002	2,31391663
25	3000	58,33	137	12440	4,08773376	7002	2,31391663
25	3500	58,33	137	12440	4,0884348	7002	2,31391663
0	2500	58,33	137	12437	4,08511248	6994	2,31409646
0	3000	58,33	137	12437	4,08511248	6994	2,31409646
0	3500	58,33	137	12437	4,08511248	6994	2,31409646

**FUENTE: Los Autores.**

En este caso no se generó la gráfica de  $V_p$  contra temperatura, debido a que la zona estudiada no presenta un espesor considerable que permita observar una variación de temperatura para extraer información, en lo referente a la presión, como se observó en las curvas tipo del capítulo 5, la presión no atenúa el tránsito de la onda a través del medio poroso.

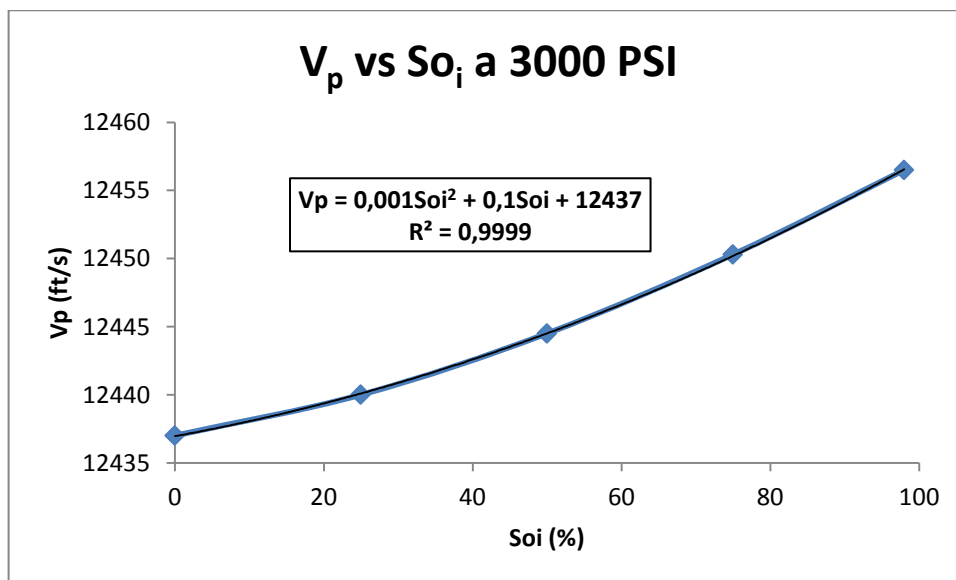
Graficando la velocidad compresional contra la saturación inicial se tienen los siguientes resultados:

**Figura 295. Variación de la velocidad de propagación de la onda P a diferentes valores de  $S_{oi}$ , a 2500 PSI**



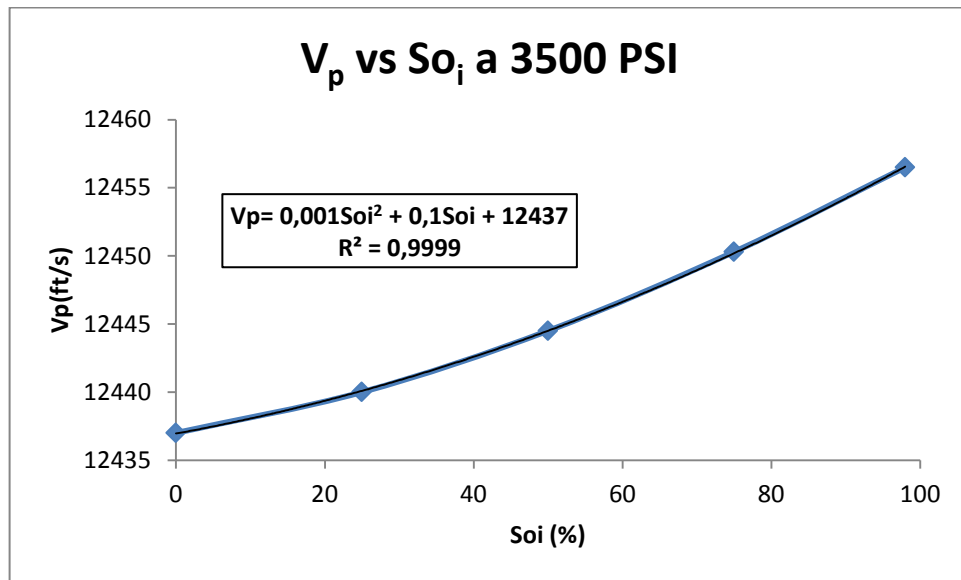
**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 296. Variación de la velocidad de propagación de la onda P a diferentes valores de  $S_{oi}$ , a 3000 PSI**



**FUENTE: Los Autores.**

**Figura 297. Variación de la velocidad de propagación de la onda P a diferentes valores de  $S_{oi}$ , a 3500 PSI**



**FUENTE: Los Autores.**

### 5.2.5 ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS

De acuerdo a las graficas de velocidad de onda P contra saturación de petróleo obtenidas en el numeral anterior para el campo Tenerife, el rango se encuentra entre 12437 ft/s para el caso de 0% de saturación hasta 12457 ft/s, valor que correspondería a un 100% de petróleo en el espacio poroso disponible, para intervalos con litología similar al estudiado.

Según el registro de velocidad ( $V_p$ ) para el pozo analizado, las curvas obtenidas presentan valores por encima de las reportadas en él en el orden de 80 ft/s, valor que deberá ser sustraído de las curvas para buscar el ajuste con el registro.

Las zonas que presentan ajuste con dichos valores se encuentran resaltadas en el anexo 4.

## **6. METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL EFECTO DE LAS PROPIEDADES PETROFÍSICAS EN LA RESPUESTA SÍSMICA**

A partir de las observaciones realizadas durante el desarrollo de este trabajo, se sugieren los siguientes pasos, en pro de determinar los rangos en los cuales oscilan los valores de la porosidad, la saturación inicial de petróleo, y la gravedad API del crudo encontrado en el yacimiento según la condiciones de presión y temperatura a las cuales este sometida la zona de interés.

### **6.1 IDENTIFICACION DE PROPIEDADES PETROFISICAS EN ZONAS CERCANAS A LA CARA DEL POZO**

- I. Seleccionar una zona que cuente con al menos un pozo, y sus respectivos registros.
- II. Determinar las velocidades de la onda P, así como la presión y la temperatura en el intervalo objeto de estudio, a partir de los registros existentes.
- III. Con la ayuda de los registros de pozo, y la información obtenida de los corazones y/o núcleos, establecer los minerales presentes en el yacimiento, y sus proporciones, así como la porosidad, la saturación de aceite y la gravedad API del petróleo presente.
- IV. Con la ayuda de una herramienta computacional, en este caso Hampson & Rusell®, generar los escenarios bajo las distintas condiciones y partiendo de ellas realizar graficas  $V_p$  contra temperatura, presión y saturación de aceite teniendo en cuenta tanto la litología del intervalo, sus proporciones así como el tipo y características de los fluidos presentes, la información

obtenida en este paso, será usada como punto de referencia para analizar las implicaciones de las posibles variaciones que se puedan dar a lo largo y ancho de la sección del yacimiento a estudiar.

- V. Basándose en la información de los numerales II, III y IV, concluir cuales parámetros presentan variaciones significativas y realizar variaciones en la litología y las substituciones de fluidos a las que haya lugar así como las graficas correspondientes con relación a la velocidad de propagación, en pro de determinar las tendencias que se generan para el sector específico del yacimiento.
- VI. Finalmente extrapolar dicha información a otros sectores del pozo para ser comparada con las velocidades reportadas en los registros, asumiéndose que las propiedades de las distintas zonas tendrán alta probabilidad de corresponder con las respectivas simulaciones que tengan como resultado la velocidad con la que existe ajuste.

## **6.2 IDENTIFICACION DE PROPIEDADES PETROFISICAS ENTRE POZOS**

- I. Seleccionar una zona que cuente con al menos dos pozos, y sus respectivos registros, así como con información de las velocidades compresionales en la porción del yacimiento que los contenga.
- II. Generar un mapa de velocidades en el volumen del yacimiento que se quiere estudiar.
- III. Con la ayuda de los registros de pozo, y la información obtenida de los corazones y/o núcleos, establecer los minerales presentes en el yacimiento,

y sus proporciones, así como la porosidad, la saturación de aceite y la gravedad API del petróleo presente.

- IV. Basándose en la información anterior y utilizando una herramienta computacional, en este caso Hampson & Rusell®, realizar simulaciones variando la temperatura y la presión en intervalos escogidos según el tamaño y las condiciones esperadas del yacimiento, para determinar el rango de las velocidades a dichas condiciones.
- V. Graficar  $V_p$  vs P, y  $V_p$  vs T, a la condición de saturación del yacimiento para determinar la tendencia que presenta y definirla a través de una correlación propia del yacimiento analizado, la cual va a servir de tendencia base.
- VI. Una vez se obtienen los datos de las variaciones anteriores, se realizan substituciones de fluidos a valores diferentes de saturación inicial de aceite, y a cada una de ellas, someterlas al proceso descrito a partir del numeral IV.
- VII. Identificar en el mapa de velocidades los valores que correspondan a los escenarios simulados, asumiéndose que existe un alto grado de probabilidad de que corresponda al escenario con el que presente ajuste de velocidades.

## CONCLUSIONES

- Se observó a partir de la implementación de esta metodología, que si el petróleo saturante es de tipo pesado, permitirá mayores velocidades de tránsito de la onda compresional comparado con lo mostrado por uno de mayor gravedad API tal y como se evidencia en las figuras 263 a 265.
- Se determinó al comparar los casos uno, cuatro y siete con los casos dos, tres, cinco, seis, ocho y nueve del capítulo cinco respectivamente que las variaciones de temperatura generan mayor atenuación a la onda P, cuando el petróleo encontrado al interior del medio poroso presenta bajas gravedades API.
- Se encontró que la presión no causa grandes diferencias en las magnitudes de la velocidad compresional, bajo ninguno de los escenarios estudiados (Ver graficas 266 a 269).
- La onda tipo S, no sufre variaciones significativas por cambios de presión o por los niveles de saturación de petróleo, sin embargo, bajo esta metodología presenta leves variaciones ante cambios de temperatura o por el tipo de petróleo que lo satura (pesado o liviano).
- Se comprobó que el principal medio de transmisión de la onda P, es la matriz de la roca, por lo tanto los niveles de atenuación están en gran medida influenciados por los niveles de porosidad y el tipo de litología presentes en la muestra lo que se puede comprobar analizando las graficas 274 a 276.

- A partir del comportamiento mostrado por petróleos de diferentes gravedades API ante los cambios de temperatura, así como la tendencia que se observa al comparar la velocidad de la onda P en medios de diferentes porosidades, se infirió que la variación de los parámetros ensayados afectan la densidad total del medio analizado, convirtiéndose esta propiedad en el parámetro determinante de la atenuación que pueda llegar a sufrir la onda estudiada.
- Se dedujo de la realización de este trabajo que los parámetros que en distinto grado afectan el tránsito de las ondas a través del medio son la porosidad, como la de mayor impacto, seguida por la gravedad API del fluido contenido en el medio poroso y la temperatura, posteriormente los niveles de saturación de petróleo y la de menor grado es la presión.

## RECOMENDACIONES

- Las correlaciones presentadas en este trabajo son validas en los intervalos evaluados, la utilización de ellas fuera de los valores mostrados debe realizarse con las debidas precauciones.
- La onda de cizalla puede llegar a aportar información valiosa como discrimínate del tipo de fluido existente en el yacimiento, sería conveniente diseñar una metodología que permitiera extraer una mayor información de dicho tipo de onda.
- Este trabajo puede ser aplicado no solo en zonas inexploradas, también puede implementarse en campos que están siendo sometidos a procesos de recobro mejorado o que son candidatos a serlo para determinar las zonas más prospectivas.

## BIBLIOGRAFÍA

1. AVSET, PER. MUKERJI, TAPAN. Y MAVKO, GARY.: Quantitative Seismic Interpretation. Primera Edición. Cambridge: 2005.
2. AVSETH, PER. et al.: Shale rock physics and implications for AVO analysis: A North Sea demonstration. En: The Leading Edge (Junio 2008) p788-792.
3. CASTAGNA, JOHN. Y BACKUS, MILO. Offset dependent reflectivity- Theory and practice of AVO Analysis, Tulsa-Oklahoma: SEG 1993.
4. DVORKIN, JACK.: Seismic reflections of rock properties. En E&P (Noviembre 2004) p 59-61.
5. FARMER, I.W. : Engineering Properties of Rocks. Primera Edición. Londres: 1968.
6. FERNÁNDEZ, S., GONZÁLEZ, E. Y REGUEIRO, J.: Impedancia acústica y elástica para la identificación de litología y de fluidos: Aplicación en el campo Chimire-Boca. En: XI Congreso Venezolano de Geofísica(2002).
7. GALLANT, E.V.Y LAWTON, D.C.: Synthetic rock for seismic modeling. En: CREWES Research Report (1993).
8. GIRALDO, LORENA.: Tesis de pregrado, Integración de las técnicas de evaluación de atributos AVO y de modelado de substitucion de fluidos para la discriminación de zonas de gas fizz y de gas comercial en el caribe colombiano, (2010).

9. LONDOÑO, FERNANDO: Análisis Petrofísicos. Notas de Clase (2009).
10. MAVKO, GARY. MUKERJI, TAPAN. Y DVORKIN, JACK. : The Rock Physics Handbook. Segunda Edición. Cambridge: 2003.
11. PENNINGTON, WAYNE D.: Seismic Petrophysics. Course Notes (2004).
12. PLATA, MARÍA.: Tesis de pregrado, Análisis de variación de la amplitud sísmica con la distancia fuente-receptor en calizas de la formación jimol, guajira costa afuera, (Marzo. 2009).
13. REYES J.P. y RUBIANO J. (1996), Modelo Estratigráfico y Estructural del Campo Tenerife, Valle Medio del Magdalena
14. SERRA, OBERTO.: Fundamentals of well-log interpretation. Primera Edición. Amsterdam:1984.
15. SERWAY, RAYMOND A.: Física Tomo II. Cuarta Edición
16. SHERIFF, R.E. Y GELDART, L.P.: Exploración Sismológica. Volumen 1. Historia, teoría y obtención de datos. Limusa, Mexico:1991.
17. SMITH, tAD, SONDERGELD, Carl, and RAI, Chandra. Gassmann Fluid Substitutions: A tutorial. En: Geophysics, Vol. 68, No. 2 ( Marzo -Abril 2003), p 430-440.

18. VALERA, L.C. et al.: Caracterización de la anisotropía de medios porosos a partir de la medición de velocidades acústicas en la formación tabor. En: Congreso Colombiano de Petróleo y Gas, Bogotá (2005).

## **ANEXOS**

## A.1 MEDICIONES GEOMETRICAS DE MASA Y VOLUMEN DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS EN EL LABORATORIO

*Figura A 1 Tabla de mediciones Roca Berea.*

MEDICIÓN DE GEOMETRÍA, MASA Y VOLUMEN EN MUESTRAS DE ROCA													
SERVICIOS DE LABORATORIO Y PLANTA PILOTO													
LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS													
UST-151-F-002				Elaborado 18/01/2011			Versión 7						
I. INFORMACIÓN GENERAL													
Fecha (DD/MM/YYYY):	01/03/2011			Sample ID:	200504362			Submission ID:	100103418				
# SCCPL:				Nombre del Pozo:									
Nombre del Proyecto:	TX DIN TEMPERATURA ANDRES CALLE				Profundidad (ft):	N/A		Formación:	Berea/Sintetica				
Registrado por:	Enk Cifuentes Buitrago			# Registro:	C-3879		Firma:	Enk Cifuentes					
ANTES DE PULIR			DESPUÉS DE PULIR			MASA							
Posición	LONGITUD-A	DIAMETRO-B	Posición	LONGITUD-	DIAMETRO-B	Posición	Final (gr)						
	Inicial (mm)	Inicial (mm)		Final (mm)	Final (mm)		Final (gr)	Final (gr)					
1	67.49	37.98	1	66.66	37.98	1	163.68						
2	67.57	37.99	2	66.67	37.99	2	163.68						
3	67.56	37.97	3	66.67	37.97	3	163.68						
4	67.61	37.97	4	66.66	37.97	4	163.68						
5	67.48	37.99	5	66.67	37.99	5	163.68						
6	67.55	37.98	6	66.66	37.98	Promedio	163.68						
7	67.66	37.99	7	66.67	37.99	Desviación	0.000						
8	67.77	37.99	8	66.66	37.99								
Promedio	67.586		Promedio	66.665									
Desviación	0.065		Desviación	0.009									
ANTES DE PULIR			DESPUÉS DE PULIR			VOLUMEN (cc)							
Posición	PLANITUD	CILINDRICIDAD		Posición	PLANITUD	CILINDRICIDAD							
	Diferencial (mm)	Inicial (mm)	Final (mm)		Diferencial (mm)	Diferencial (mm)	Inicial (mm)	Final (mm)	Diferencial (mm)				
1	-0.08	-0.04	-0.06	0.02	1	0	-0.03	0.02	0.05				
2	-0.05	-0.02	-0.01	0.01	2	-0.005	-0.02	0.05	0.07				
3	-0.01	-0.05	-0.02	0.03	3	-0.01	-0.01	0	0.01				
4	-0.08	-0.04	-0.06	0.02	4	0.005	0	-0.02	0.02				
5	-0.09	-0.04	0.02	0.06	5	0.005	-0.01	0.04	0.05				
6	-0.1	-0.06	0.01	0.07	6	0.01	-0.05	0.04	0.09				
7	0.02	-0.08	0.05	0.13	7	0	-0.07	0.04	0.11				
8	0	-0.11	0.03	0.14	8	0.01	-0.07	0.01	0.08				
Máximo	0.120		0.140		Máximo	0.020		0.110					

**FUENTE: Laboratorio de Mecánica de Rocas ICP**

Figura A 2. Tabla de mediciones roca sintética.

MEDICIÓN DE GEOMETRÍA, MASA Y VOLUMEN EN MUESTRAS DE ROCA									
SERVICIOS DE LABORATORIO Y PLANTA PILOTO									
LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS									
UST-LMR-F-002				Elaborado 18/01/2011			Versión 7		
I. INFORMACIÓN GENERAL									
Fecha (DD/MM/YYYY):	27/02/2011		Sample ID:	200601881		Submission ID:	100103418		
# SCCPL:						Nombre del Pozo:			
Nombre del Proyecto:	TX DIN TEMPERATURA ANDRES CALLE				Profundidad (ft):			Formación:	Berea
Registrado por:	HERNAN MANTILLA			# Registro:	C4651	Firma:	HERNAN MANTILLA		
ANTES DE PULIR			DESPUÉS DE PULIR			MASA		VOLUMEN (cc)	
Posición	LONGITUD-A	DIAMETRO-B	Posición	LONGITUD-	DIAMETRO-B	Posición	Final (gr)		VOLUMEN (cc)
	Inicial (mm)	Inicial (mm)		Final (mm)	Final (mm)		Final (gr)	Final (gr)	
1	73.79	37.3	1	72.4	37.31	1	144.75		79.368
2	73.46	37.47	2	72.39	37.39	2	144.77		
3	73.41	37.41	3	72.4	37.38	3	144.78		
4	73.39	37.37	4	72.4	37.32	4	144.76		
5	73.2	37.45	5	72.44	37.38	5	144.76		
6	73.38	37.37	6	72.44	37.4	Promedio		144.78	
7	73.74	37.34	7	72.47	37.33	Desviación		0.007	
8	73.97	37.31	8	72.46	37.32				
Promedio	73.543	37.378	Promedio	72.425	37.354				
Desviación	0.260	0.062	Desviación	0.031	0.037				
ANTES DE PULIR					DESPUÉS DE PULIR				
Posición	PLANITUD	CILINDRICIDAD			Posición	PLANITUD	CILINDRICIDAD		
	Diferencial (mm)	Inicial (mm)	Final (mm)	Diferencial (mm)		Diferencial (mm)	Inicial (mm)	Final (mm)	Diferencial (mm)
1	0.35	0	0.01	0.01	1	0	0	0.01	0.01
2	0.05	0	-0.3	0.3	2	-0.015	0	-0.3	0.3
3	-0.3	0	-0.1	0.1	3	-0.015	0	-0.15	0.15
4	-0.35	0	0.18	0.18	4	-0.015	0	0.14	0.14
5	-0.3	0	0.1	0.1	5	0	0	-0.05	0.05
6	-0.1	0	-0.35	0.35	6	0	0	-0.3	0.3
7	0.25	0	-0.15	0.15	7	0.01	0	-0.2	0.2
8	0.42	0	0.1	0.1	8	0.01	0	0.1	0.1
Máximo	0.770			0.350	Máximo	0.026			0.300

FUENTE: Laboratorio de Mecánica de Rocas ICP

## A.2 ECUACION DE SHUEY

Es una aproximación lineal de la ecuación de Zoeppritz presentada por SHUEY (1985). Cada término de ésta ecuación describe un diferente rango angular de la curva del offset (Distancia fuente receptor) el primer término de la ecuación A 2.1 describe el coeficiente de reflexión para incidencia normal, el segundo término para ángulos intermedios y el tercer término es para ángulos cercanos al crítico. Para ángulos restringidos menores del ángulo crítico (menores a  $25^\circ$ ) se utiliza los dos primero términos dando como resultado una ecuación lineal en  $\text{sen}^2\theta$ , ecuación A 2.2 (Giraldo 2010)

$$R_{PP} = A + B\text{sen}^2\theta + C\text{sen}^2\theta\tan^2\theta \quad \text{Ec. A 2.1}$$

$$R_{PP} = A + B\text{sen}^2\theta \quad \text{Ec. A 2.2}$$

El intercepto AVO (A) y el gradiente AVO (B) y son útiles para hacer el análisis AVO mediante Cross-plot.

Donde:

$$A = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 - \rho_2 V_2}$$

$$B = \frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_p} - 2 \left( \frac{V_s}{V_p} \right)^2 \left( 2 \frac{\Delta V_s}{V_s} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right)$$

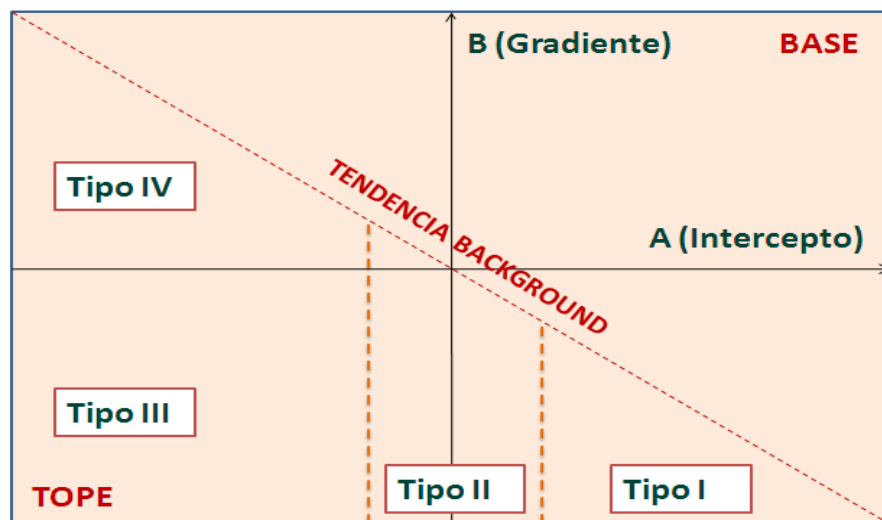
$$C = \frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_p}$$

### A.3 INTERCEPTO Y GRADIENTE

Los dos términos de la ecuación de Shuey representan la dependencia angular de los coeficientes de reflexión con dos parámetros: El intercepto AVO (A) y el gradiente AVO (B). En la práctica el intercepto AVO es una medida de banda limitada de amplitud de la incidencia normal, mientras que el gradiente es una medida de la variación de la amplitud con el offset. (Giraldo 2010)

Una forma práctica de interpretar las variaciones de amplitud con el offset fue propuesta por CASTAGNA (1997), graficando A vs B, se observó que las amplitudes y los intercepto de arenas saturadas de salmuera y las arcillas (sellos) muestran una tendencia base bien definida, La desviación de esta tendencia base define lo que se conoce como anomalías AVO que pueden relacionarse a hidrocarburos o a factores litológicos. Ver Figura A 3.1

**Figura A 3.1 Análisis AVO - anomalías**



**FUENTE: CASTAGNA J. Framework for AVO gradient and intercept interpretation.1998.**

#### A.4 VALORES REGISTRO ONDA P POZO TENERIFE

Profundidad	Vp (ft/s)	Profundidad	Vp (ft/s)	Profundidad	Vp (ft/s)
6507.00	11333.48	6560.00	11200.42	6639.50	12817.11
6507.50	11333.48	6560.50	10390.70	6640.00	12557.38
6508.00	11878.61	6561.00	10390.70	6640.50	12294.84
6508.50	11167.10	6561.50	10674.41	6641.00	11821.05
6509.00	11421.56	6562.00	11034.03	6641.50	11882.25
6509.50	11202.06	6562.50	12310.87	6642.00	12409.65
6510.00	12188.46	6563.00	12621.86	6642.50	11886.47
6510.50	12451.17	6563.50	12621.86	6643.00	11872.31
6511.00	12923.66	6564.00	12621.86	6643.50	11966.61
6511.50	12076.82	6564.50	12348.44	6644.00	12285.72
6512.00	11377.93	6565.00	12295.66	6644.50	12400.73
6512.50	11206.39	6565.50	12244.27	6645.00	13293.51
6513.00	11206.39	6566.00	12365.15	6645.50	13293.51
6513.50	11322.49	6566.50	12326.12	6646.00	13293.51
6514.00	12551.40	6567.00	12425.27	6646.50	12420.95
6514.50	13112.69	6567.50	12463.79	6647.00	11393.18
6515.00	12885.57	6568.00	13203.47	6647.50	11206.39
6515.50	13339.65	6568.50	13283.91	6648.00	11607.04
6516.00	14204.84	6569.00	12637.45	6648.50	12120.75
6516.50	14619.72	6569.50	13699.27	6649.00	12176.55
6517.00	11237.54	6570.00	12797.16	6649.50	12547.96
6517.50	13058.09	6570.50	12859.25	6650.00	12735.29
6518.00	13167.51	6571.00	13286.77	6650.50	12116.38
6518.50	14072.21	6571.50	12574.63	6651.00	12835.85
6519.00	13421.45	6572.00	12861.23	6651.50	12678.46
6519.50	12877.70	6572.50	13586.43	6652.00	12235.82
6520.00	12483.15	6573.00	13321.17	6652.50	12175.48
6520.50	12248.13	6573.50	13543.85	6653.00	12508.42
6521.00	12738.82	6574.00	13707.46	6653.50	12269.52
6521.50	12402.19	6574.50	13690.70	6654.00	13066.03
6522.00	12367.09	6575.00	13857.55	6654.50	13027.38
6522.50	12380.54	6575.50	13168.74	6655.00	13338.65
6523.00	12590.80	6576.00	12621.86	6655.50	12672.35
6523.50	12720.07	6576.50	12621.86	6656.00	13374.75
6524.00	12998.48	6577.00	12621.86	6656.50	13179.90
6524.50	13145.31	6577.50	13656.86	6657.00	13173.87

Profundidad	Vp (ft/s)	Profundidad	Vp (ft/s)	Profundidad	Vp (ft/s)
6842.50	13059.64	6894.50	14354.86	6949.50	12861.44
6843.00	13750.52	6895.00	14210.95	6950.00	12835.40
6843.50	14319.05	6895.50	13492.95	6950.50	12944.18
6844.00	13655.33	6896.00	13101.14	6951.00	13148.94
6844.50	13618.52	6896.50	13021.25	6951.50	13415.32
6845.00	14266.34	6897.00	12942.32	6952.00	13367.77
6845.50	14195.36	6897.50	12864.35	6952.50	13700.05
6846.00	13447.70	6898.00	12849.15	6953.00	13739.83
6846.50	12972.62	6898.50	12605.43	6953.50	13888.44
6847.00	13084.56	6899.00	12371.90	6954.00	13489.30
6847.50	12441.24	6899.50	12371.90	6954.50	12927.53
6848.00	12230.15	6900.00	12371.90	6955.00	12596.35
6848.50	12407.19	6900.50	12371.90	6955.50	12379.14
6849.00	12351.87	6901.00	12371.90	6956.00	11936.98
6849.50	12821.60	6901.50	12371.90	6956.50	11737.24
6850.00	12816.40	6902.00	12371.90	6957.00	11355.20
6850.50	11453.59	6902.50	11999.50	6957.50	11211.18
6851.00	11425.50	6903.00	12232.48	6958.00	11074.23
6851.50	10788.53	6903.50	12556.82	6958.50	11048.28
6852.00	10716.41	6904.00	11973.30	6959.00	11069.77
6852.50	10952.93	6904.50	11697.88	6959.50	11075.94
6853.00	11249.91	6905.00	11860.93	6960.00	11069.43
6853.50	12166.87	6905.50	12096.52	6960.50	11059.88
6854.00	12156.51	6906.00	12783.57	6961.00	11098.78
6854.50	11859.11	6906.50	12560.74	6961.50	11106.54
6855.00	13207.30	6907.00	13098.99	6962.00	11245.17
6855.50	13152.74	6907.50	12712.82	6962.50	11428.48
6856.00	12943.55	6908.00	12348.77	6963.00	11567.89
6856.50	11485.14	6908.50	11928.32	6963.50	11816.55
6857.00	11726.19	6909.00	11954.80	6964.00	12443.86
6857.50	12083.14	6909.50	12735.24	6964.50	12661.47
6858.00	12100.48	6910.00	12901.04	6965.00	12782.18
6858.50	11984.53	6910.50	12621.04	6965.50	12790.77
6859.00	12007.55	6911.00	12742.00	6966.00	12760.17
6859.50	11917.47	6911.50	13191.65	6966.50	12607.78
6860.00	11906.98	6912.00	13558.57	6967.00	12490.84
6860.50	11728.16	6912.50	12955.60	6967.50	12290.85
6861.00	12193.09	6913.00	12319.09	6968.00	12337.55

Profundidad	Vp (ft/s)	Profundidad	Vp (ft/s)	
7125.00	13247.77	7169.00	12679.51	
7125.50	13174.68	7169.50	13320.54	
7126.00	13026.18	7170.00	13401.12	
7126.50	12865.39	7170.50	13194.97	
7127.00	12816.73	7171.00	13034.31	
7127.50	12793.13	7171.50	13168.83	
7128.00	12759.81	7172.00	13003.67	
7128.50	12735.28	7172.50	12881.59	
7129.00	12524.70	7173.00	12665.50	
7129.50	12376.48	7173.50	12513.15	
7130.00	12157.12	7174.00	12382.49	
7130.50	11865.62	7174.50	12350.46	
7131.00	11827.42	7175.00	13298.34	
7131.50	11861.30	7175.50	13306.32	
7132.00	11948.25	7176.00	12598.22	
7132.50	12116.54	7176.50	13123.90	
7133.00	12209.42	7177.00	12387.83	
7133.50	12221.21	7177.50	11463.50	
7134.00	12432.21	7178.00	11414.49	
7134.50	12512.06	7178.50	11815.47	
7135.00	12664.91	7179.00	11680.14	
7135.50	12885.83	7179.50	12160.46	
7136.00	12998.76	7180.00	12360.96	
7136.50	13188.63	7180.50	12387.84	
7137.00	13321.21	7181.00	12956.50	
7137.50	13237.09	7181.50	12923.19	
7138.00	13124.67	7182.00	13038.31	
7138.50	13139.35	7182.50	13155.92	
7139.00	12988.97	7183.00	13247.13	
7139.50	12785.72	7183.50	13373.40	
7140.00	12583.13	7184.00	14005.99	
7140.50	12870.50	7184.50	14108.26	
7141.00	13082.71	7185.00	14058.01	
7141.50	13405.19	7185.50	14325.02	
7142.00	13755.88	7186.00	14633.67	
7142.50	13601.66	7186.50	14869.12	
7143.00	13635.38	7187.00	14637.71	
7143.50	13611.61	7187.50	14228.53	