

Propuesta de un modelo predictivo para monitorear el cumplimiento de las especificaciones del asfalto tipo exportación por grado de desempeño PG en GRB, aplicando análisis e inferencia de datos y correlación estadística.

Sandra Milena Barrera Jaimes

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero en Procesos de Refinación y Petroquímica

Director

Phd. Ronald Alfonso Mercado Ojeda

Codirector

Phd. Ramiro Martínez Rey

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico primero a Dios, porque siempre me acompaña en todos los momentos de mi vida, gracias a sus bendiciones he podido tener éxito en todos los proyectos que he realizado en mi vida. También dedico este trabajo a esta gran compañía Ecopetrol, la mejor compañía del mundo. Por darme herramientas para crecer profesionalmente y por brindarme oportunidades en el ámbito profesional y personal.

A toda mi familia, a mi esposo Paulo y mis hijos, por ser parte del proceso día a día y por la comprensión durante este periodo de formación. Este logro lo dedico especialmente a mis hijos Daniel Santiago y Matías Alejandro, quienes son el amor más grande en mi vida y son mi razón de ser, para dejar huella en ellos con ejemplo y así vivan la importancia de la disciplina en el crecimiento profesional y personal a través del aula y el conocimiento. ¡Los amo mucho!

A mi madre y hermana, aunque están lejos, siempre me están alentando en cada reto de mi vida, me apoyan, me acompañan y celebran conmigo, a mi padre que desde el cielo me cuida y sé que estaría orgulloso de mis triunfos.

Agradecimientos

Primero a Dios por darme la vida, llenarme de bendiciones y oportunidades para crecer cada día. A mi familia, por entender y acompañar en todo este proceso de formación, por su aceptación en los momentos de ausencias debido a los compromisos académicos adquiridos.

Al Departamento Inspección de Calidad, liderado por el Ingeniero Alvaro Nuñez Vargas, quien apalancó y gestionó un espacio para el área y con ello lograr la participación en la convocatoria de esta primera cohorte, pues cuando nació el programa no estaba planeado para el perfil de analista químico. Agradezco también a mis compañeros de trabajo, quienes estuvieron prestos al proceso.

Especialmente a la Empresa Colombiana de Petróleos ECOPETROL S.A. que representada por sus líderes Carlos Guillermo Garcia, Nelson Fernando Angulo, Arturo Saldarriaga Corrales, Angela Maria Corrales, Marggy Liliana Santos, Hamilton Cañas Acuña y Edison Campos Garzón quienes confiaron en mis capacidades y me dieron esta oportunidad de crecer profesionalmente con el objetivo de aportar hacia el logro de metas de la compañía.

A los profesores Ronald Alfonso Mercado Ojeda, Ramiro Martinez Rey y Luis Javier Lopez, quienes me apoyaron durante el proceso de elaboración de este trabajo de aplicación y me guiaron con su experiencia, amplios conocimientos, competencias técnicas, y además de sus sabios consejos. Gracias a todo el cuerpo docente y administrativo por su entrega y dedicación en el proceso.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo general	15
1.2 Objetivos específicos	15
2. Marco Conceptual	16
2.1.1 <i>Caracterización por grado de desempeño (PG)</i>	17
3. Estado del Arte	24
4. Metodología	27
5. Resultados	30
5.1 Datos Crudos	30
5.2 Datos Normalizados	34
5.3 Matriz Covarianza	34
5.4 Regresión de datos SVD y Cálculo de Betas	38
6. Conclusiones	49
7. Recomendaciones	51
Referencias Bibliográficas	52
Apéndices	55

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Demanda estimada de Asfalto tipo exportación</i>	13
Figura 2. <i>Curva de envejecimiento del asfalto.</i>	18
Figura 3. <i>Algoritmo del SVD.</i>	22
Figura 4. <i>Diagrama de bloques.</i>	27
Figura 5. <i>Cálculo de la matriz de covarianza.</i>	35
Figura 6. <i>Cálculo de los valores singulares.</i>	35
Figura 7. <i>Regresión de datos SVD y cálculo de betas.</i>	38
Figura 8. <i>Gráfica para validación del modelo.</i>	44

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Clasificación de Crudos</i>	31
Tabla 2. <i>Matriz de datos de entrenamiento</i>	32
Tabla 3. <i>Matriz de data para validar</i>	33
Tabla 4. <i>Matriz de datos de entrenamiento normalizada.</i>	34
Tabla 5. <i>Número de condición, K.</i>	36
Tabla 6. <i>Valores de Beta por variable de salida individual.</i>	39
Tabla 7. <i>Valores de Beta por variable de salida grupal.</i>	39
Tabla 8. <i>Valores predichos, validación #1.</i>	41
Tabla 9. <i>Valores predichos, validación #2.</i>	42
Tabla 10. <i>Valores predichos, validación #3.</i>	43
Tabla 11. <i>Las Betas seleccionadas</i>	45
Tabla 12. <i>Grado de correlación por variable.</i>	45
Tabla 13. <i>Predicción final</i>	47

Lista de Apéndice

	Pág.
Apéndice A. Especificación Técnica ECP, Asfalto PG 64-22	56
Apéndice B. Análisis de datos normalizados por covarianza y SVD	57
Apéndice C. Creación de matrices (combinaciones)	58
Apéndice D. Interfaz de Matlab. (Script)	99

Glosario

Algoritmo: procedimiento computacional definido que parte de un estado inicial y un conjunto de valores de entrada, a los cuales se les aplica una secuencia de pasos, produciendo una salida

Asf: asfalto

β Beta: coeficientes de correlación

COV: matriz de covarianza

IA: inteligencia artificial

GRB: Gerencia Refinería Barrancabermeja

Machine Learning: forma de inteligencia artificial

Orig: original

PCA: análisis de componentes principales

PG: performance grade, clasificación de asfalto por grado de desempeño

Reolog: reológico

Superpave: técnica de clasificación de asfaltos por desempeño

SVD: descomposición del valor singular

Temp: temperatura

Resumen

Título: Propuesta de un modelo predictivo para monitorear el cumplimiento de las especificaciones del asfalto tipo exportación por grado de desempeño PG en GRB, aplicando análisis e inferencia de datos y correlación estadística. *

Autor: Sandra Milena Barrera Jaimes. **

Palabras claves: asfalto, modelo predictivo, correlación, reología, grado de desempeño, descomposición de valores singulares, rigidez.

Descripción

En este trabajo se evaluó la calidad del asfalto grado desempeño (PG), desde un enfoque de la ciencia de datos; esto a través del estudio de las correlaciones estadísticas para la estimación de parámetros reológicos, físicos y mecánicos a partir del análisis de bases de datos existentes de la GRB. Para el desarrollo del proyecto, el modelamiento se realizó por medio del software MATLAB, aplicando machine learning con un algoritmo de aprendizaje automático, específicamente aprendizaje no supervisado por medio del algoritmo SVD. El objetivo principal del aprendizaje no supervisado es encontrar patrones en los datos de entrada que indiquen características potenciales; para luego aplicar las correlaciones a lugar y posteriormente poder obtener las predicciones de las propiedades correspondientes al estudio de la calidad del asfalto PG.

Inicialmente se realizó un pretratamiento de datos y luego se aplicó aprendizaje no supervisado, donde los resultados que se desean obtener del modelo se conocían previamente, y estos se usaron como datos de entrenamiento (validación). En este modelo se trabajó con dos tipos de datos; datos de entrenamiento provenientes de una matriz conformada por las caracterizaciones de asfalto PG tipo exportación, y datos de prueba conformados por una matriz proveniente de analítica del asfalto tipo exportación en GRB.

Para la validación del modelo se usó una matriz de datos de la cual se lograron predecir 4 propiedades del asfalto en la etapa de interés PAV (envejecimiento a largo plazo), etapa III de la caracterización asfalto grado PG 64-22. Las propiedades que se lograron predecir fueron: Temperatura de falla Asfalto Residuo PAV, Módulo Reológico a 64°C, Asfalto Residuo PAV, Rigidez a -12°C, Asfalto Residuo PAV y m(t) a -12°C, Asfalto Residuo PAV.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingenierías Químicas. Director: Ronald Alfonso Mercado Ojeda. PhD. Codirector: Ramiro Martínez Rey. PhD.

Abstract

Title: Proposal for a predictive model to monitor compliance with export-type asphalt specifications by performance grade PG in GRB, applying data analysis and inference and statistical verification. *

Author: Sandra Milena Barrera Jaimes. **

Keywords: asphalt, predictive model, consolidation, rheology, degree of performance, deterioration of singular values, stiffness.

Description

In this work, the quality of performance grade asphalt (PG) was evaluated from a data science approach; this through the study of statistical correlations for the estimation of rheological, physical and mechanical parameters from the analysis of existing GRB databases. For the development of the project, the modeling was carried out using MATLAB software, applying machine learning with an automatic learning algorithm, specifically unsupervised learning through the SVD algorithm. The main goal of unsupervised learning is to find patterns in the input data that indicate potential features; to then apply the correlations to the place and later be able to obtain the predictions of the properties corresponding to the study of the quality of the PG asphalt.

Initially, data pre-treatment was performed and then unsupervised learning was applied, where the desired results of the model were previously known, and these were used as training data (validation). In this model we worked with two types of data; training data from a matrix made up of export-type PG asphalt characterizations, and test data made up of a matrix from export-type asphalt analytics in GRB.

For the validation of the model, a data matrix was used from which it was possible to predict 4 asphalt properties in the PAV stage of interest (long-term aging), stage III of the PG 64-22 grade asphalt characterization. The properties that were predicted were: Asphalt Residue PAV failure temperature, Rheological Modulus at 64°C, Asphalt Residue PAV, Stiffness at -12°C, Asphalt Residue PAV and m(t) at -12°C, Asphalt Residue PAV.

* Degree work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Ronald Alfonso Mercado Ojeda. PhD. Co-director: Ramiro Martínez Rey. PhD.

Introducción

Actualmente el asfalto se continúa clasificando, basándose en propiedades que no son fundamentales (ejemplo; grado de penetración y viscosidad), mientras que existen otras caracterizaciones más completas como la caracterización (PG) grado de desempeño que incluyen pruebas físicas, (pérdida de masa), pruebas mecánicas, (envejecimiento a presión PAV, rigidez) y reológicas (viscosidad, curva de viscosidad, módulo elástico (G'), módulo viscoso (G''), módulo complejo (G^*) y ángulo de fase), las cuales son más certeras y cobran importancia frente a la clasificación tradicional.

Si bien las técnicas de caracterización (PG) están establecidas y normalizadas, la realización de todas ellas es una tarea titánica que, en muchos casos demandan hasta 72 horas para su realización. Esta situación impide dar una respuesta rápida a las plantas de proceso en donde se desarrollan mezclas y valorización de las fracciones pesadas. Gracias al histórico de datos de calidad realizados en la GRB (Departamento de Inspección de Calidad) y a las caracterizaciones grado desempeño (PG) del asfalto de la GRB realizadas por terceros, se puede aplicar ciencia de datos y construir un modelo capaz de predecir las propiedades que son de interés al momento de caracterizar el asfalto tipo exportación de la GRB (PG 64-22).

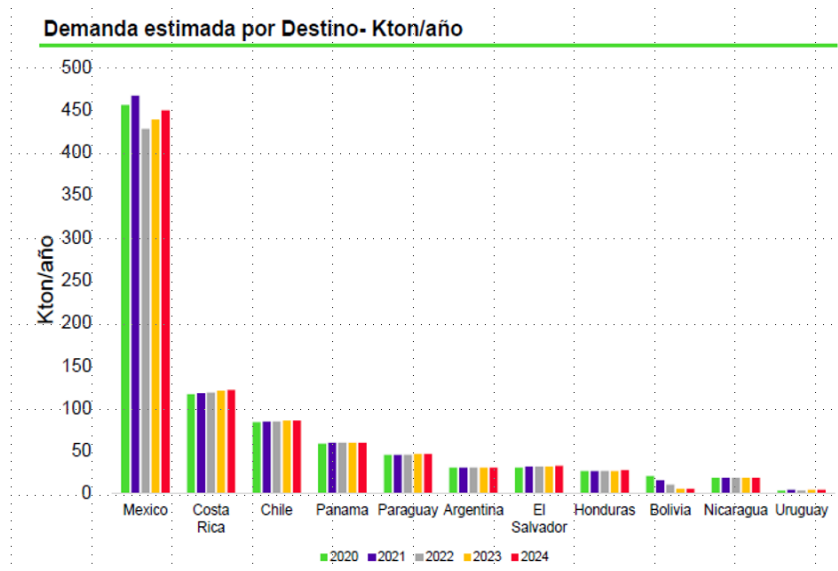
Actualmente el Departamento Inspección de calidad de la GRB, hace seguimiento a la calidad del asfalto (PG 64-22) con monitoreos en la preparación, pues la calidad del asfalto se relaciona directamente con la dieta de crudo, esto por la composición química que cada crudo posee. En cuanto al seguimiento de la calidad del asfalto como producto final, se cuenta con una base de datos correspondientes a las etapas 1 y 2 de la clasificación asfalto tipo exportación (PG

64-22), y aunque no se realiza en sitio la tercera etapa (PAV), para esto existe un vínculo comercial con un laboratorio especializado, quien emite los certificados de calidad (PG 64-22).

Ecopetrol S.A tiene como premisa económica maximizar valor, llegar a mercados con potencial comprobado por estudios de mercadeo que se pueden observar en la Figura 1. Para la empresa es una oportunidad con el asfalto tipo exportación grado de desempeño (PG 64-22). Vale la pena destacar que, en el mercado actual, el precio del asfalto tipo exportación (PG 64-22) supera al valor del asfalto tipo penetración. Con el desarrollo de este proyecto se logra contribuir al marco estratégico de la compañía. Al proponer un modelo para predecir las propiedades del asfalto tipo (PG) en la tercera etapa (PAV), y monitorear la calidad del asfalto de la GRB, se verifica el cumplimiento de las especificaciones deseadas como grado de desempeño PG 64-22.

Figura 1.

Demanda estimada de Asfalto tipo exportación



Nota: Ecopetrol S.A.

El aprendizaje no supervisado es un tipo de algoritmo de Machine Learning, y pertenece a la categoría de aprendizaje automático. El aprendizaje no supervisado tiene lugar cuando no se dispone de datos “etiquetados”, es decir sólo conocemos los datos de entrada, pero no existen datos de salida que correspondan a un determinado input. Por tanto, sólo podemos describir la estructura de los datos, para intentar encontrar algún tipo de organización que simplifique el análisis.

Los tipos de algoritmos más habituales en aprendizaje no supervisado son: algoritmos de clustering, análisis de componentes principales (PCA), Descomposición en Valores Singulares (SVD - singular value decomposition) y análisis de componentes independientes (Independent Component Analysis) (Raona, 2021).

Al hacer el estudio y selección de la información existente (datos de laboratorio), se estima trabajar en la inferencia de propiedades importantes que conduzcan a optimizar tiempo y dinero de forma confiable y segura.

En función de estos requerimientos, surge la siguiente pregunta: ¿Es posible la construcción de un modelo predictivo para inferir y monitorear las especificaciones grado desempeño (PG) 64-22, y además se lograrán predecir las propiedades de interés asfalto envejecido a largo plazo (PAV), tales como temperatura de falla asfalto residuo PAV, módulo reológico a 64°C asfalto residuo PAV, rigidez a -12°C, asfalto residuo PAV y $m(t)$ a -12°C asfalto residuo PAV? Para esto, se cuenta con la herramienta de cálculo matemático Matlab.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Proponer un modelo de inferencia estadística que permita la predicción de las características de los asfaltos tipo exportación producidos en la GRB, particularmente el asfalto grado desempeño (PG) 64-22.

1.2 Objetivos específicos

- Reconocer las ventanas operativas de las mezclas de los crudos base de preparación de asfalto grado desempeño (PG) 64-22 en la GRB, y diseñar la matriz de datos de entrenamiento con las caracterizaciones (PG) 64-22 para identificar las variables a trabajar en la herramienta predictiva (MATLAB).

- Crear un modelo predictivo a través de Machine learning, por medio del algoritmo desarrollado en Matlab y aplicando correlación estadística, se puede hacer la predicción de propiedades (PAV) que corresponden a la tercera etapa de la especificación del asfalto con calidad grado desempeño (PG) 64-22.

- Comprobar experimentalmente los valores predichos por el modelo y determinar el grado de predicción o capacidad predictiva del modelo planteado.

2. Marco Conceptual

El Asfalto es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes (Azaria Perez, 2020). El asfalto posee características tanto físicas como químicas, se considera un material termoplástico y se usa como aglomerante en mezclas asfálticas. Su composición química la conforman mayormente los asfaltenos, estructuras complejas de compuestos aromáticos que contienen además del carbono otros elementos químicos tales como nitrógeno, azufre y oxígeno y que en general, son compuestos polares, de alto peso molecular. Además, está compuesto por maltenos, estos son sustancias solubles en n-heptano; conformados por los saturados, resinas y aromáticos. Las propiedades reológicas son muy importantes en los productos asfálticos y permiten medir la variación de las propiedades del flujo en el tiempo como resultado de un esfuerzo; entre los descriptores reológicos más importantes se encuentran la viscosidad y elasticidad (SOL, 2010).

La clasificación grado de desempeño PG, (Performance Grade), se enuncia con las letras (PG) seguido del valor de la temperatura máxima de trabajo y separado por un guion el valor de la temperatura mínima de trabajo (normalmente bajo cero). Por lo tanto, un asfalto cuya clasificación es PG64-22, será un asfalto cuya máxima temperatura de trabajo es 64°C y su mínima temperatura de trabajo es -22°C; este es el rango de temperaturas, máxima a mínima, entre las que el asfalto se desempeña satisfactoriamente. Las temperaturas máximas y mínimas avanzan según sea necesario con incrementos estandarizados de seis (6) grados Celsius. Esta clasificación comenzó a utilizarse en Estados Unidos entre 1987 y 1993, a partir de la investigación sobre pavimentos y con el desarrollo de las pruebas realizadas por el SHRP, programa estratégico de investigación de carreteras del Departamento de Transporte de Estados Unidos de Norteamérica; usando la

Metodología SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements) (Hinrichs, 2012). Esta metodología ha suplantado las caracterizaciones tradicionales, puesto que da información más detallada del asfalto con ensayos orientados a medir las propiedades reológicas y a relacionarlas con el desempeño que tienen frente a los tres tipos de fallas clásicas que ocurren en los pavimentos durante su vida útil (ahuellamiento, agrietamiento por fatiga, y agrietamiento térmico).

2.1.1 Caracterización por grado de desempeño (PG)

Al analizar las mezclas asfálticas se utilizan ensayos de laboratorio para simular el efecto del envejecimiento bajo diferentes escenarios, considerando condiciones como temperatura, radiación UV y humedad, obteniendo hallazgos que permiten comprender y comparar su comportamiento para diseñar pavimentos que no solo resistan cargas de tránsito, sino que también soporten este efecto inevitable, el cual se presenta en dos etapas: a corto y a largo plazo (Guerrero, 2020).

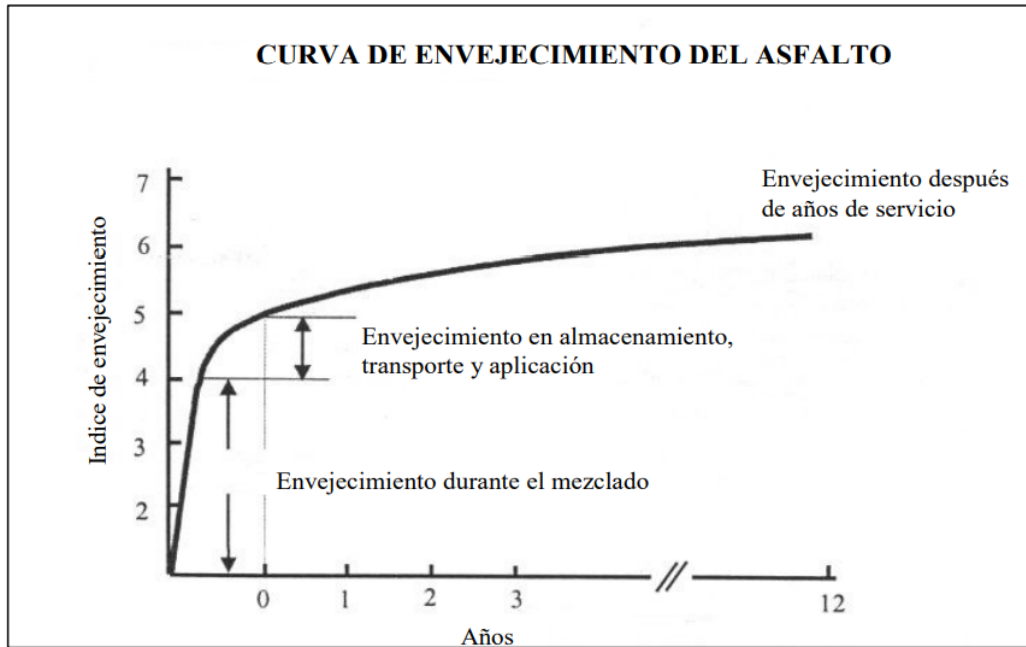
La caracterización por grado de desempeño PG (Performance Grade), aplicando la metodología ASTM D-6373, se puede apreciar en tres etapas. La primera etapa representa el transporte, almacenamiento y manejo del asfalto, en esta se realizan pruebas al asfalto bajo condiciones de asfalto original tales como: Viscosidad Brookfield ASTM D 4402, Punto de ignición mediante la copa abierta Cleveland ASTM D92, y la metodología ASTM D 7175 para determinar el Módulo complejo de corte dinámico, ángulo de fase y la temperatura de falla.

En la Figura 2, (Alvarenga, 2003), se puede apreciar la curva de envejecimiento del asfalto en sus diferentes etapas; estas inician con el manejo del producto en caliente, mezclado, almacenamiento, transporte y aplicación que se simulan con la prueba RTFOT y el envejecimiento

por años de servicio se simula con la prueba de envejecimiento PAV. El asfalto posee tendencia a oxidarse y esto afecta su calidad en el tiempo.

Figura 2.

Curva de envejecimiento del asfalto.



Nota: Exxon Mobil, Lubricants & Petroleum Specialities.

La segunda etapa representa el asfalto durante la producción, mezcla y construcción; en esta etapa se trabaja bajo condiciones del asfalto original, aplicando la Norma ASTM D2872 (RTFOT), la cual su principio se basa en someter una película delgada de asfalto por un tiempo de 85 min a calor constante (163°C) y un flujo de aire (4±1l/min) en un horno rotatorio de película delgada para simular el envejecimiento a corto plazo del asfalto, es decir durante su mezcla y construcción. Además, con el residuo obtenido inmediatamente del RTFOT se determina igualmente el módulo complejo de corte dinámico, ángulo de fase y temperatura de falla.

La tercera etapa representa el envejecimiento del cemento asfáltico desde que se instala la mezcla asfáltica, hasta el final de su vida útil, es decir el diseño para la cual fue planeado. En esta etapa se trabaja con el asfalto bajo condiciones de envejecimiento en el RTFOT, y se lleva al envejecimiento a presión (PAV), sometiéndolo a alta presión y temperatura. Esta etapa simula el envejecimiento a largo plazo, mediante la exposición de una muestra de 50 g de asfalto envejecido por el RTFOT (corto plazo) a alta temperatura (100°C) y alta presión (2.1 MPa) por un espacio de 20 horas para representar el envejecimiento del pavimento a lo largo de los años de servicio. Las tres etapas tienen en común que los ensayos de tipo reológico son realizados en un reómetro de corte dinámico (Dynamic Stress Rheometer- DSR), tanto al asfalto original, al asfalto envejecido RTFOT y al asfalto envejecido PAV.

El envejecimiento a largo plazo en un cemento asfáltico se puede determinar a través de la metodología ASTM D 6521, método estándar para determinar el envejecimiento acelerado del aglomerante asfáltico. Esta metodología simula el envejecimiento oxidativo por medio de aire a presión y temperatura elevada; el envejecimiento a largo plazo que ocurre durante el tiempo de servicio (entre 7-10 años de uso del pavimento). Una vez finaliza la prueba PAV, se realiza a ese asfalto la evaluación en el reómetro DSR. El envejecimiento de los ligantes asfálticos a largo plazo; se ve afectado por la temperatura ambiente y por las variables asociadas a la mezcla, como las proporciones volumétricas de la misma, su permeabilidad y las propiedades de los agregados, entre otros (Mogollón, 2021).

Para realizar la metodología (PAV) el punto de partida es el asfalto producto envejecido a corto plazo aplicando el método ASTM D2872 (RTFOT), también llamado método de prueba estándar para el efecto del calor y el aire en una película de asfalto en movimiento (prueba de horno de película delgada rodante).

Para conocer las propiedades reológicas de un material se debe medir la deformación resultante de un esfuerzo aplicado o la fuerza requerida para producir una deformación determinada. Esta propiedad se puede evaluar con la metodología ASTM D-7175, método de prueba estándar para determinar las propiedades reológicas del aglomerante asfáltico utilizando un reómetro DSR. Este método de prueba está diseñado para determinar las propiedades viscoelásticas lineales de los aglutinantes asfálticos, y permite conocer el ángulo de fase (δ) y el módulo complejo (G^*) usando una geometría de placas paralelas. Esta norma es aplicable a ligantes asfálticos que tienen valores de módulo de corte dinámico en el rango de 100 Pa a 10 MPa.

La predicción o inferencia de propiedades, hoy día es una necesidad en aspectos de optimización, por medio de algoritmos podemos aplicar minería de datos (o aprendizaje automático). La minería de datos es un conjunto de heurísticas y cálculos que permiten construir un modelo a partir de estos. Para la creación del modelo, el algoritmo analiza primero los datos proporcionados, en busca de tipos específicos de patrones o tendencias. La minería de datos se puede aplicar por medio del aprendizaje supervisado y el aprendizaje no supervisado, cada tipo de estos aprendizajes incluye diferentes clases de algoritmos. Machine Learning, es una rama de la Inteligencia Artificial que, a través de algoritmos, identifica patrones en datos masivos y elabora predicciones (análisis predictivo), (Santos, 2021).

Se puede aplicar Machine Learning a través de diversas herramientas como MATLAB, esta ofrece un poderoso lenguaje de programación, así como un entorno computacional interactivo. Es posible introducir comandos del lenguaje uno por uno en la línea de comandos de MATLAB, o en su lugar, escribir una serie de comandos en un archivo y luego ejecutarlo.

MATLAB es un entorno ideal para aplicar el aprendizaje automático a los análisis de datos, por medio del aprendizaje no supervisado, el aprendizaje no supervisado parte de una base de datos

(entradas) con un conocimiento previo de las características que conforman al elemento a predecir. El aprendizaje no supervisado es útil cuando una propiedad (característica) está disponible para un determinado conjunto de datos (conjunto de formación), pero debe predecirse para otras instancias. (MathWorks, Machine Learning with MATLAB, 2022).

El algoritmo SVD (Singular Value Decomposition), hace parte de Machine Learning, pertenece a la categoría de aprendizaje automático y es de tipo no supervisado, a través de este algoritmo desarrollamos I.A, (inteligencia artificial). En esta categoría al algoritmo no se le proporciona ninguna indicación previa, solo se le suministra los datos con las características propias de un objeto (por ejemplo, aspectos, propiedades o partes que lo conforman a un carro, a un televisor, o a un producto), así el algoritmo puede determinar qué es, a partir de la información entregada (Team, Data Science, 2021). El algoritmo SVD es una técnica estadística multivariante, similar a la introducida en 1956 por Edward Lorenz en la teoría de caos (Lorenz, 1956).

El SVD es útil para generar soluciones significativas para bases de datos de menor tamaño, contribuye a la regresión y clasificación de un conjunto de datos. En este algoritmo solo conocemos los datos de entrada, pero al describir su estructura, el algoritmo intenta encontrar la mejor organización y así determinar la respuesta. Este tipo de algoritmo es de carácter exploratorio, y desde el enfoque del álgebra lineal, el SVD es una factorización de una matriz compleja real, en tres matrices unitarias (Raona, 2021).

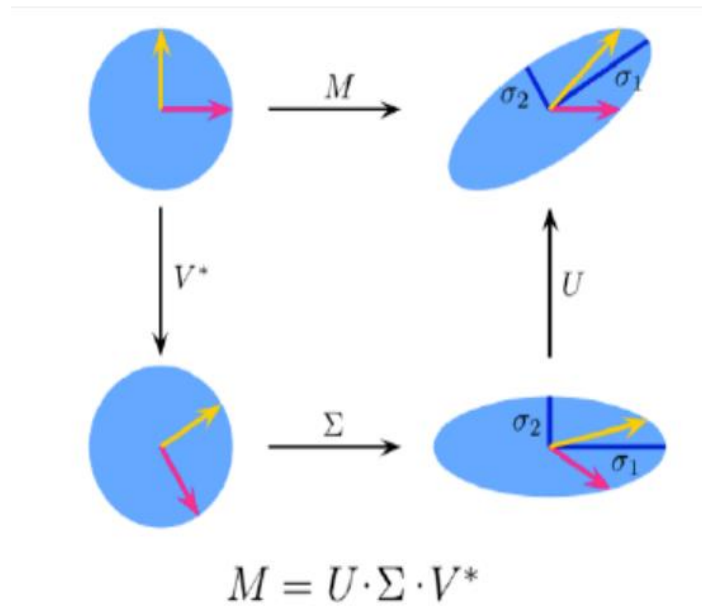
Este algoritmo aplica a una matriz $M = [m * n]$, donde existe una descomposición tal que:

$$M = U \Sigma V^* \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde U y V son matrices unitarias y Σ es una matriz diagonal, donde los elementos diagonales son los valores singulares positivos de la matriz M , V^* es el conjugado hermitiano de V . (Hermítica), 2022). Ver Figura 3.

Figura 3.

Algoritmo del SVD.



Nota: Raona-online.

El SVD no se utiliza para normalizar los datos, se usa para reducir la dimensionalidad (datos redundantes). Cuando existen dos variables con alta correlación, una no contribuye con información adicional útil para una tarea de regresión, entonces los valores propios del SVD, ayudan a determinar qué variables son más informativas y cuales no aportan al modelo para prescindir de ellas (Diego, 2012).

Un concepto importante en la etapa del pretratamiento de datos es la covarianza. La covarianza mide la relación lineal entre dos variables. La covarianza guarda similitud con la

correlación entre dos variables, pero se diferencian principalmente en que los coeficientes de correlación están normalizados. Por lo tanto, una relación lineal perfecta da como resultado un coeficiente de 1. Los valores de una covarianza pueden ser negativos o positivos, los positivos indican que valores por encima del promedio de una variable están asociados con valores por encima del promedio de la otra variable; y los negativos indican que valores por debajo del promedio de una variable están asociados con valores por debajo del promedio de la otra variable. (Algarra, 2006).

3. Estado del Arte

Estudios previos han demostrado experiencias exitosas en la predicción de propiedades usando correlaciones estadísticas e implementación de modelos, donde estos se han desarrollado a través de diversas herramientas usando Machine learning. En 2011 Chávez–Valencia y colaboradores (Chavez-Valencia et al, 2011), realizaron un modelado del envejecimiento de los pavimentos asfálticos, a través de la metodología de superficie de respuesta (MSR), esta metodología de modelado es un acercamiento holístico que permite postular la forma de la función objetivo, actualizar y limitar los valores de los parámetros, así como explorar la región cercana al óptimo estimado.

Por su parte, en 2013 Juliana Puello Méndez y colaboradores (Juliana Puello Méndez, 2013), en su estudio presentan correlaciones estadísticas para la estimación de parámetros reológicos a partir de parámetros químicos, usando dos asfaltos colombianos y un asfalto venezolano; evaluándolos, usando ensayos de envejecimiento a largo y corto plazo. La determinación de las propiedades reológicas se realizó a través de curvas maestras (análisis dinámico-mecánico), mientras que los parámetros químicos que trabajaron fueron la composición genérica (SARA), así como características estructurales y funcionales (análisis FTIR). Las correlaciones obtenidas mostraron que el índice reológico (R) puede ser estimado a partir del Índice de Inestabilidad Coloidal (Ic) y el Índice de Sulfóxidos (S=O), con un grado de correlación aproximadamente del 84%, mientras que la frecuencia de transición (ω_c) puede ser estimada a partir del Índice de Alifáticos (Al) y el índice de Sulfóxidos (S=O), con un grado de correlación aproximadamente del 82%.

En 2017, Liu Y y colaboradores (Yu Liua Xiaodong, 2017), trabajaron en un modelado y realizaron la simulación de elementos discretos de formas de partículas realistas en mezclas a través de un proceso de imágenes basado en MATLAB y códigos FISH basados en PFC5.0 Suite para lograr precisión y eficiencia. El desarrollo comprendió tres pasos principales, el software MATLAB para procesar imágenes CT de rayos X de agregados, un código FISH para generar modelos de elementos discretos de partículas agregadas individuales y un código FISH para crear la muestra virtual. Con el análisis paramétrico y la comparación de las eficiencias computacionales del modelo basado en bolas y el modelo basado en grupos, demostraron que tanto el método de procesamiento de imágenes basado en MATLAB como los códigos FISH de PFC5.0 fueron validados con alta precisión y eficiencia.

Recientemente, en 2020 Thanh-Hai Le y colaboradores (Thanh-Hai Le et al, 2020), diseñaron un modelo basado en inteligencia artificial para la predicción del módulo dinámico del asfalto de masilla de piedra. Este modelo híbrido (ANN-TLBO) se basó en un algoritmo de red neuronal artificial (ANN) y Técnica de Optimización Basada en el Aprendizaje de la Enseñanza (TLBO). Usaron una base de datos con pruebas experimentales (96 datos) para el desarrollo y evaluación del modelo ANN-TLBO. Los resultados experimentales demostraron que el algoritmo híbrido propuesto logró predecir con éxito el módulo dinámico con un coeficiente de determinación de 0.989 y 0.985 para los conjuntos de datos de entrenamiento y prueba, respectivamente.

Finalmente, en 2021 Xue B y colaboradores (Xue, 2021), realizaron una investigación sobre la respuesta micromecánica de la mezcla asfáltica durante la deformación permanente basada en la prueba de seguimiento virtual de ruedas en 3D, para predecir la formación de surcos en dos tipos de mezcla asfáltica y además se analizaron las respuestas micromecánicas dentro de las

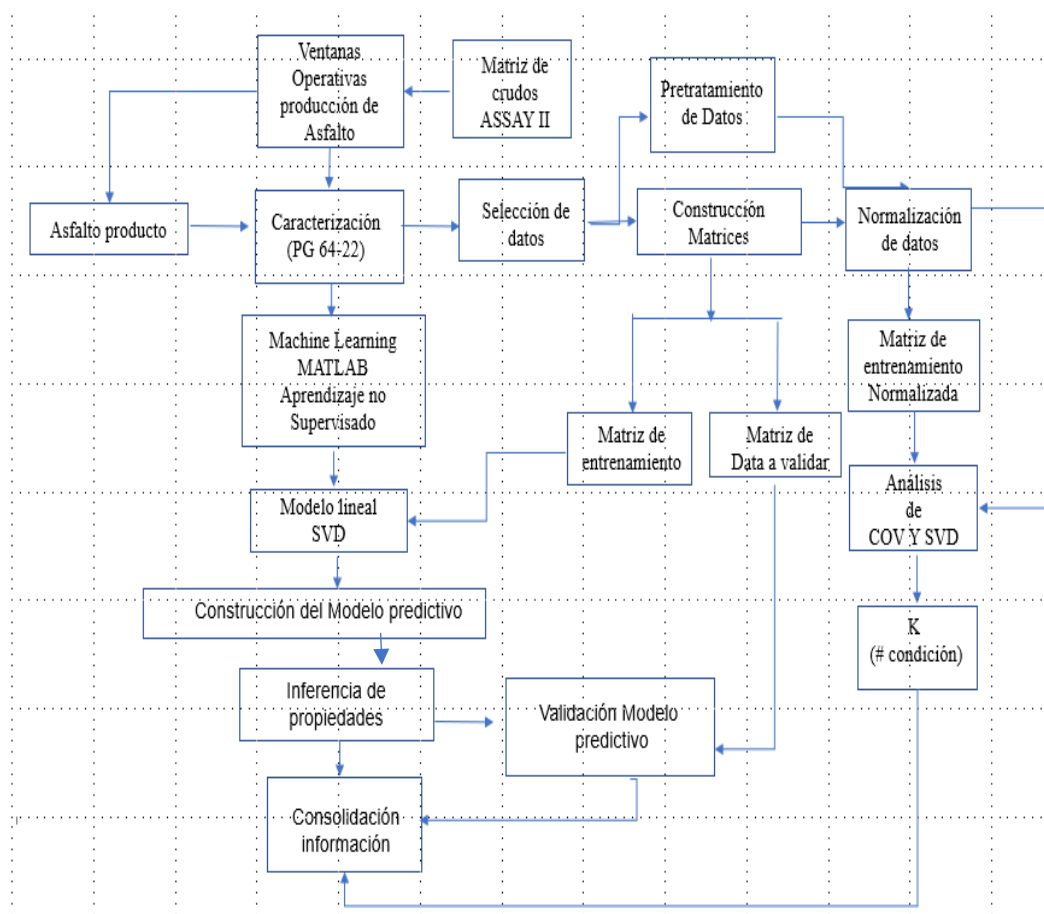
mezclas asfálticas durante el proceso de formación de surcos. En este trabajo, los investigadores usaron el método de elementos discretos (DEM). El objetivo fue construir un modelo de mezcla asfáltica mediante el uso de un algoritmo de generación de poliedros basado en MATLAB y códigos PFC5.0. El modelo de contacto lineal y el modelo de contacto de Burger se utilizaron para caracterizar las propiedades mecánicas de los agregados gruesos y la masilla asfáltica, respectivamente. Las pruebas de seguimiento de ruedas virtuales se construyeron mediante una suposición de carga equivalente simplificada y un espécimen a escala, y luego se verificaron mediante pruebas de laboratorio.

Estos estudios demuestran el alto grado de aplicación de las herramientas desarrolladas a través de inteligencia artificial. La construcción de modelos por medio de los diferentes algoritmos logra predecir las propiedades de interés, al tiempo que entrega un grado de correlación satisfactorio.

4. Metodología

La selección de la información existente (obtenida a partir de datos de laboratorio) fueron los datos de entrada para el modelo predictivo, cuyo objetivo es inferir propiedades importantes que conducen a optimización de tiempo y dinero de forma confiable y segura.

Figura 4. Diagrama de bloques.



En la figura 4 se aprecia la estructura aplicada para la propuesta del modelo predictivo y posterior se detallan aspectos y actividades del desarrollo del proyecto para lograr cumplir los objetivos planteados.

Al reconocer la matriz de crudos ASSAY, se logrará identificar las ventanas operativas con relación a la química asociada de los crudos en función de la calidad del asfalto (PG 64-22).

Para el presente trabajo se seleccionaron 24 datos de muestras de asfalto de la GRB, provenientes de caracterizaciones completas tipo (PG 64-22), se construyó una matriz de 24x13 (ver Tabla 2) y se identificó como matriz de datos de entrenamiento, esta es la variable de entrada al modelo. Además, se seleccionaron 82 muestras de asfalto de producción tipo (PG 64-22) de forma aleatoria de la base de datos existente en el Departamento Inspección de Calidad de la GRB, y se formó una matriz de 82x9 (ver Tabla 3) que se identificó como Matriz de data para validar, con esta matriz se evalúa el modelo para predecir las 4 variables de interés tales como; Temperatura de falla Asfalto Residuo PAV, Módulo Reológico a 64°C, Asfalto Residuo PAV, Rigidez a -12°C, Asfalto Residuo PAV y m(t) a -12°C, Asfalto Residuo PAV.

Con el pretratamiento de datos se construye la matriz de entrenamiento normalizada para luego aplicarle el análisis de COV y SVD. La normalización de los datos se realizó aplicando la ecuación 2 a toda la data de entrenamiento y luego se calculó el Número de condición (K) a las combinaciones realizadas del análisis COV y SVD.

$$Xi \text{ normalizada} = \frac{(Xi - X_{promedio})}{\sigma (xi \dots xn)} \quad Ec. (2)$$

El Número de condición (K), con la covarianza, nos dice si una variable la podemos despreciar o no a través de las correlaciones. Finalizado el análisis de COV y SVD, se aplica aprendizaje no supervisado de tipo lineal por medio del algoritmo SVD partiendo de la matriz de datos sin normalizar, se seleccionan las matrices a evaluar y se inicia la construcción del modelo

predictivo aplicando el algoritmo de Machine Learning SVD (Descomposición del valor singular), a las diferentes matrices seleccionadas para encontrar los valores singulares.

Posterior definimos la inversa del valor singular junto con la matriz de ceros, estableciendo el tamaño (size) de dicha matriz evaluada, y así poder obtener la inversa de la matriz, para calcular con la inversa del valor singular el valor de Beta. (Beers, 2007).

El siguiente paso está enmarcado en realizar la validación del modelo y consolidar la información detallada. La validación del modelo se estima con las betas obtenidas de mayor alto grado de correlación. Seleccionadas las Betas se realizan las validaciones necesarias para comprobar el modelo, esto se hace con la matriz de datos de entrenamiento, es decir con los datos No normalizados, en esta etapa se verifica también esa predicción con el cálculo del error. Posterior a esto se toma una muestra y se grafica el valor predicho en función del valor del valor real (conocido) y se verifica el comportamiento al tiempo que se estima el R^2 . Por último se realiza la predicción final con la matriz de datos para validar y así encontrar las variables predichas por el modelo.

5. Resultados

5.1 Datos Crudos

Para hablar de calidad de asfalto (cumplimiento de especificaciones), preliminarmente es necesario conocer la química asociada a su producción, es decir conocer qué tipos de crudos intervienen en su preparación. Por eso es importante hacer seguimiento a la calidad de los crudos.

Actualmente en el Departamento de Inspección de calidad se realiza monitoreo a la calidad de los crudos, y existe una matriz de caracterización de cargas con información detallada de los crudos que intervienen en la preparación del asfalto, dicha matriz incluye caracterización ASSAY tipo II.

Parte de esa información comprende los tipos de crudos utilizados para la preparación de asfalto, los cuales en la refinería de Barrancabermeja son: Casabe, LCT, Velázquez, crudo mezcla Vasconia y Caño Limón (con una proporción en la mezcla inferior a 15%). Las dietas de la refinería varían de acuerdo con la disponibilidad de crudo, disponibilidad operacional y/o planeación de la producción; está de acuerdo con el mercado y demanda comercial.

En la Tabla 1, se muestra la clasificación de los crudos por familias afines a la preparación de asfalto (PG 64-22). Previa clasificación contó con una evaluación de datos históricos de varios años, y esta en función del Índice de Correlación Bureau of Mines (ICBM). Este índice hace referencia a la respuesta de correlación de las propiedades por familia de crudos, esta correlación se obtuvo con Unscrambler, (CSIC. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, s.f.). El software Unscrambler es una herramienta integral para análisis multivariado, que incluye métodos poderosos como son: el PCA (Principal Components Analysis), PLS (Partial Least Squares),

clustering y clasificación. Su foco está en el análisis multivariado, encontrando varianza, covarianzas y demás relaciones internas en matrices de datos.

Tabla 1. *Clasificación de Crudos*

CRUDO	ICBM	TIPO DE FAMILIA
LCT	41.0-44.9	Nafténico - Aromático
Casabe	49.1-50.8	Nafténico - Aromático
Vasconia	32.7-61.2	Nafténico-Aromático
Velázquez	57.0-59.7	Aromático
Caño Limón L8" L14"	23.9-43.1	Parafinico – Nafténico- Aromático

Nota: Ecopetrol

Con el estudio de esta clasificación se logró reconocer las ventanas operativas del blending de crudos para la preparación de asfalto grado desempeño (PG 64-22) luego de evaluar una matriz de los crudos involucrados en la preparación del asfalto.

Tabla 2. Matriz de datos de entrenamiento

Inflamación °C	Viscosidad 135°C	Pérdida masa Asf Original	Temp Falla Asf Original	Mod Reolog a 64°C, Asf Original	Angulo de fase δ a 64°C Asf Original	Temp Falla Asf Resid RTFO	Mod Reolog a 64°C, Asf Resid RTFO	Angulo de fase δ a 64°C, Asf Resid RTFO	Temp Falla Asf Resid PAV	Mod Reolog a 64°C, Asf Resid PAV	Rigidez a - 12°C, Asf Resid RTFO	m(t) a - 12°C, Asf Resid RTFO
282	0.440	0.32	66.9	1.428	85.3	68.9	4.137	79.9	18.8	2219	140	0.34
294	0.433	0.50	67.5	1.519	85.2	69.0	4.202	79.6	19.8	2586	127	0.33
300	0.422	0.50	72.1	1.251	84.1	75.0	4.166	78.1	23.8	2800	123	0.32
312	0.385	0.70	67.1	1.408	84.9	70.8	2.382	82.0	23.5	4163	72	0.31
302	0.372	0.70	67.0	1.441	85.9	68.7	4.052	80.1	21.3	4555	120	0.33
302	0.374	0.80	66.7	1.398	86.0	69.2	4.362	80.4	23.7	4200	138	0.31
308	0.412	0.50	66.4	1.349	86.0	69.4	4.456	79.5	22.5	3500	86	0.32
295	0.351	0.35	67.0	1.46	86.0	68.4	3.980	80.1	22.5	3963	103	0.30
295	0.440	0.30	67.7	1.596	84.2	68.9	4.098	79.3	23.3	4039	103	0.34
310	0.377	0.40	67.2	1.492	85.3	66.9	3.196	81.8	19.8	2664	88	0.31
311	0.384	0.50	67.5	1.539	84.9	68.0	3.689	80.5	20.3	2743	96	0.31
310	0.362	0.20	67.1	1.482	85.0	69.3	4.447	79.4	20.5	2907	86	0.32
325	0.370	0.40	67.5	1.541	85.1	67.6	3.525	80.6	22.0	3389	118	0.31
296	0.368	0.30	67.5	1.384	85.1	68.5	3.971	80.4	17.9	2044	95	0.33
318	0.395	0.60	67.6	1.565	85.1	68.4	3.856	80.8	20.1	2642	92	0.34
310	0.372	0.40	66.3	1.427	84.8	68.9	4.231	78.7	19.2	2317	95	0.31
322	0.357	0.60	67.1	1.47	85.6	67.7	3.587	81.4	21.4	3148	113	0.34
305	0.381	0.20	66.8	1.43	84.8	69.3	4.387	79.3	16.9	1918	98	0.32
328	0.385	0.60	68.0	1.641	84.4	68.5	4.317	79.0	19.0	2208	70	0.32
312	0.330	0.40	65.9	1.262	85.9	68.2	3.886	80.6	20.5	2515	117	0.34
312	0.340	0.70	66.0	1.264	85.8	68.3	3.89	81.2	23.2	3979	133	0.33
302	0.372	0.70	67.0	1.441	85.9	68.7	4.052	80.1	21.3	4555	120	0.33
322	0.36	0.5	65.5	1.182	85.9	68	3.758	80.6	21.5	3194	145	0.32
328	0.322	0.3	65.4	1.158	85.7	68.7	3.534	81	23.3	4026	130	0.34

Tabla 3. Matriz de data para validar

PROPIEDAD/ MUESTRA	Inflamación °C	Viscosidad a 135°C Mpa.s	Pérdida masa Asf Original %	Temp Falla Asf Original °C	Mod Reolog a 64°C, Asf Original Kpa	Angulo de fase δ a 64°C Asf Original	Temp Falla Asf Resid RTFO °C	Mod Reolog a 64°C, Asf Resid RTFO Kpa	Angulo de fase δ a 64°C, Asf Resid RTFO
1	278	0.4025	0.280	67.7	1.509	82.32	69.9	4.726	78.72
2	282	0.3213	0.280	66.3	1.289	82.46	68.1	3.710	79.57
3	285	0.4025	0.440	67.0	1.405	83.10	69.9	4.715	78.38
4	292	0.4025	0.360	67.2	1.390	83.64	69.7	4.559	79.35
5	291	0.4025	0.270	66.7	1.317	83.42	68.0	3.675	80.19
6	290	0.4083	0.290	66.1	1.255	83.50	68.1	3.680	79.31
7	302	0.4083	0.344	66.3	1.294	83.05	69.0	4.145	79.60
8	286	0.3213	0.280	65.4	1.164	81.36	67.1	3.251	79.84
9	286	0.3213	0.280	65.7	1.199	84.86	67.7	3.513	81.10
10	304	0.4083	0.289	66.1	1.261	85.25	68.3	3.805	80.51
11	284	0.4083	0.280	66.8	1.355	82.76	67.8	3.556	82.00
12	296	0.3213	0.295	67.1	1.420	82.96	69.8	4.622	79.12
13	294	0.4083	0.280	66.8	1.331	83.94	69.9	4.718	79.23
14	276	0.3213	0.316	68.1	1.588	82.00	69.4	4.337	78.87
15	302	0.4083	0.280	66.8	1.369	82.92	68.3	3.797	80.35
16	304	0.3213	0.316	67.2	1.420	83.31	68.2	3.718	79.60
17	246	0.4083	0.800	66.8	1.355	82.76	67.8	3.556	82.00
18	296	0.4083	0.280	67.1	1.400	82.02	69.6	4.471	79.57
19	278	0.3588	0.372	66.2	1.249	82.98	68.9	4.094	80.01
20	286	0.3588	0.372	66.5	1.309	81.29	68.9	4.079	79.61
21	278	0.3588	0.372	65.2	1.139	82.56	66.8	3.136	81.44
22	288	0.3588	0.372	66.7	1.352	83.63	69.9	4.802	78.28
23	302	0.3588	0.372	67.6	1.474	83.76	69.0	4.198	79.01
24	286	0.3588	0.372	66.4	1.303	83.61	68.4	3.821	80.6
25	292	0.3588	0.372	67.3	1.454	82.79	68.1	3.678	80.05
26	292	0.3588	0.372	66.5	1.305	82.64	68.2	3.731	80.19
27	296	0.3588	0.372	66.1	1.244	83.61	67.5	3.428	81.05
28	296	0.3588	0.372	66.2	1.273	85.37	68.2	3.765	81.22
29	288	0.3213	0.316	66.0	1.233	83.87	67.5	3.438	80.60
30	294	0.3588	0.372	66.4	1.301	82.75	68.7	4.044	79.66
31	280	0.3150	0.346	67.1	1.391	82.91	69.1	4.175	78.59
32	290	0.3150	0.346	65.3	1.145	84.50	67.4	3.360	80.38
33	294	0.3588	0.370	66.4	1.277	83.9	66.7	3.044	81.63
34	286	0.3302	0.346	66.8	1.355	83.59	70.5	5.008	77.71
35	292	0.3150	0.350	67.0	1.386	83.22	69.4	4.314	78.67
36	282	0.3150	0.350	65.5	1.173	83.85	67.9	3.604	80.72
37	258	0.3302	0.350	65.3	1.140	84.18	67.9	3.603	79.74
38	282	0.3213	0.316	67.4	1.428	82.63	69.2	4.213	79.41
39	294	0.3225	0.360	67.2	1.409	82.89	70.5	5.052	76.86
40	305	0.3225	0.316	67.4	1.450	82.54	68.9	4.099	80.22
41	296	0.3225	0.360	66.2	1.273	85.37	68.2	3.765	81.22
42	284	0.3225	0.360	65.7	1.193	83.17	67.8	3.533	79.37
43	284	0.3225	0.360	64.8	1.089	84.49	67.4	3.366	81.20
44	292	0.3225	0.360	65.9	1.232	83.78	68.8	4.056	80.06
45	286	0.3225	0.360	66.4	1.314	85.32	70.1	4.810	79.08
46	288	0.3225	0.360	65.0	1.099	83.51	67.4	3.359	80.29
47	290	0.3225	0.360	65.9	1.216	83.30	68.4	3.852	79.44
48	288	0.3225	0.360	65.6	1.194	84.73	68.8	4.052	79.43
49	288	0.3225	0.370	66.2	1.257	81.84	68.0	3.622	79.63
50	292	0.3225	0.360	66.7	1.345	82.40	69.8	4.563	77.51
51	292	0.3213	0.316	66.1	1.246	83.22	68.0	3.632	79.50
52	301	0.3225	0.346	65.5	1.176	82.69	68.4	3.835	78.98
53	262	0.3225	0.360	66.0	1.232	83.09	68.7	3.933	78.47
54	298	0.3150	0.346	66.7	1.343	83.65	69.0	4.147	79.36
55	300	0.3225	0.350	66.7	1.336	83.15	68.3	3.759	80.16
56	296	0.3225	0.360	65.2	1.136	82.51	67.4	3.348	80.42
57	284	0.3188	0.337	65.8	1.212	83.47	69.7	4.563	78.96
58	296	0.3150	0.346	65.8	1.214	84.27	68.6	3.932	79.90
59	296	0.3150	0.346	66.2	1.259	83.62	67.8	3.531	80.45
60	304	0.3188	0.337	66.4	1.284	84.15	67.1	3.236	81.86
61	286	0.3438	0.268	65.1	1.123	84.53	67.3	3.293	80.23
62	296	0.3150	0.346	66.3	1.259	81.83	68.9	4.052	78.87
63	288	0.3438	0.268	66.1	1.241	83.27	68.3	3.745	79.97
64	280	0.3438	0.268	64.9	1.099	85.22	69.7	4.551	78.18
65	288	0.3188	0.337	64.5	1.055	84.99	69.2	4.319	80.12
66	282	0.3438	0.268	64.6	1.067	83.07	66.9	3.118	80.57
67	288	0.3438	0.268	65.6	1.195	84.98	66.5	3.000	81.87
68	284	0.3188	0.337	64.6	1.067	83.78	66.2	2.874	81.54
69	298	0.3188	0.327	66.3	1.270	83.35	67.9	3.566	79.43
70	292	0.3150	0.346	65.5	1.176	83.67	69.2	4.252	79.14
71	300	0.3188	0.327	65.9	1.228	82.37	67.7	3.480	79.63
72	300	0.3188	0.327	65.4	1.157	84.81	66.9	3.173	81.13
73	302	0.3188	0.327	65.3	1.147	82.44	68.7	3.954	79.26
74	285	0.3188	0.350	65.7	1.195	83.30	68.0	3.569	79.31
75	272	0.3200	0.327	66.6	1.318	83.36	69.1	4.145	79.17
76	286	0.3200	0.327	66.8	1.340	83.51	69.1	4.249	81.89
77	280	0.3188	0.346	66.9	1.366	80.95	70.7	5.231	79.30
78	275	0.3150	0.310	66.7	1.312	81.08	67.2	3.247	81.15
79	288	0.3200	0.462	67.1	1.406	83.13	69.6	4.445	78.62
80	282	0.3188	0.394	66.1	1.243	83.59	68.7	3.945	78.09
81	275	0.3200	0.630	66.8	1.342	82.48	68.7	3.936	79.94
82	286	0.3150	0.346	66.4	1.294	84.53	69.9	4.571	78.06

5.2 Datos Normalizados

Tabla 4. Matriz de datos de entrenamiento normalizada.

Inflamación °C	Viscosidad 135°C	Pérdida masa Asf Original	Temp Falla Asf Original	Mod Reolog a 64°C, Asf Original	Angulo de fase δ a 64°C Asf Original	Temp Falla Asf Resid RTFO	Mod Reolog a 64°C, Asf Resid RTFO	Angulo de fase δ a 64°C, Asf Resid RTFO	Temp Falla Asf Resid PAV	Mod Reolog a 64°C, Asf Resid PAV	Rigidez a -12°C, Asf Resid PAV	m(t) a -12°C, Asf Resid PAV
-2.2907284	1.95473049	-0.9499761	-0.1754196	0.0487409	0.02177862	0.03632717	0.47356973	-0.2992003	-1.2092188	-1.1784274	1.50035556	1.3536945
-1.2485012	1.72918466	0.13284627	0.31035773	0.78797795	-0.1524503	0.1033927	0.6176635	-0.6178753	-0.6805986	-0.7274939	0.87786762	0.51201916
-0.7273877	1.37475551	0.13284627	4.03465054	-1.3891158	-2.0689689	4.12732492	0.53785772	-2.2112499	1.43388244	-0.4645517	0.68633286	-0.3296562
0.31483944	0.18258472	1.33598227	-0.0134938	-0.1137288	-0.6751372	1.31057237	-3.4169622	1.93152414	1.27529637	1.21016891	-1.7557352	-1.1713315
-0.5536832	-0.2362861	1.33598227	-0.0944567	0.1543462	1.06715239	-0.0978039	0.28513941	-0.0867504	0.1123318	1.69182003	0.5426818	0.51201916
-0.5536832	-0.1718444	1.93755027	-0.3373454	-0.1949636	1.24138135	0.23752378	0.97235587	0.23192453	1.38102042	1.25563088	1.40458819	-1.1713315
-0.0325696	1.05254719	0.13284627	-0.580234	-0.5930143	1.24138135	0.37165485	1.18073764	-0.7665902	0.74667611	0.3955396	-1.0853636	-0.3296562
-1.161649	-0.9129236	-0.7695057	-0.0944567	0.30869239	1.24138135	-0.2990005	0.12552785	-0.0867504	0.74667611	0.96442855	-0.2713409	-1.6763367
-1.161649	1.95473049	-1.0702897	0.47228351	1.41348622	-1.89474	0.03632717	0.38711347	-0.9365502	1.16957232	1.05780989	-0.2713409	1.3536945
0.14113492	-0.0751819	-0.4687217	0.06746907	0.56864388	0.02177862	-1.3049836	-1.6124648	1.71907419	-0.6805986	-0.6316551	-0.9895962	-1.1713315
0.22798718	0.15036388	0.13284627	0.31035773	0.95044763	-0.6751372	-0.5672627	-0.5195689	0.33814951	-0.4162885	-0.5345877	-0.6065267	-1.1713315
0.14113492	-0.5584944	-1.6718577	-0.0134938	0.48740904	-0.5009083	0.30458931	1.16078619	-0.8303252	-0.3105644	-0.3330806	-1.0853636	-0.3296562
1.44391883	-0.3007278	-0.4687217	0.31035773	0.9666946	-0.3266793	-0.8355248	-0.8831286	0.44437448	0.48236598	0.25915369	0.44691442	-1.1713315
-1.0747967	-0.3651694	-1.0702897	0.31035773	-0.3086924	-0.3266793	-0.231935	0.1055764	0.23192453	-1.6849771	-1.3934503	-0.6544104	0.51201916
0.83595301	0.50479304	0.73441427	0.39132062	1.16165821	-0.3266793	-0.2990005	-0.1493587	0.65682443	-0.5220125	-0.6586866	-0.7980615	1.3536945
0.14113492	-0.2362861	-0.4687217	-0.6611969	0.04061742	-0.8493662	0.03632717	0.6819515	-1.5739001	-0.9977707	-1.0580147	-0.6544104	-1.1713315
1.18336205	-0.7195986	0.73441427	-0.0134938	0.38992723	0.54446551	-0.7684593	-0.7456853	1.29417429	0.16519383	-0.0369634	0.20749598	1.3536945
-0.2931264	0.05370139	-1.6718577	-0.2563825	0.06498787	-0.8493662	0.30458931	1.02777655	-0.9365502	-2.2135973	-1.5482667	-0.5107593	-0.3296562
1.70447561	0.18258472	0.73441427	0.71517217	1.779043	-1.546282	-0.231935	0.87259864	-1.2552251	-1.1034948	-1.1919432	-1.8515026	-0.3296562
0.31483944	-1.5895611	-0.4687217	-0.9850485	-1.2997574	1.06715239	-0.4331316	-0.0828539	0.44437448	-0.3105644	-0.8147317	0.39903073	1.3536945
0.31483944	-1.2673527	1.33598227	-0.9040856	-1.2835105	0.89292343	-0.3660661	-0.0739866	1.08172434	1.11671029	0.98408778	1.16516974	0.51201916
-0.5536832	-0.2362861	1.33598227	-0.0944567	0.1543462	1.06715239	-0.0978039	0.28513941	-0.0867504	0.1123318	1.69182003	0.5426818	0.51201916
1.18336205	-0.6229361	0.13284627	-1.3089	-1.9496362	1.06715239	-0.5672627	-0.3666078	0.44437448	0.21805586	0.01955684	1.739774	-0.3296562
1.70447561	-1.8473277	-1.0702897	-1.3898629	-2.1445998	0.71869447	-0.7684593	-0.8631771	0.86927438	1.16957232	1.04183676	1.02151868	1.3536945

5.3 Matriz Covarianza

Una vez seleccionada la matriz de entrenamiento para el modelo, se realiza la normalización de los datos para evitar la redundancia en ellos, ver ecuación 2 (Metodología), luego realizamos la Matriz de covarianza esta es simétrica, (Acervo Lima, 2021) y aplicamos el algoritmo SVD a las matrices construidas con las diferentes combinaciones usando como origen la matriz de datos de entrenamiento normalizada, ver Tabla 4. El cálculo de una matriz de

covarianza (A), si tenemos que: $A = x_1, x_2, \dots, x_n$, se estima como se muestra en la figura 5. La matriz covarianza es simétrica.

Figura 5. Cálculo de la matriz de covarianza.

$$COV(A) = \begin{bmatrix} \sigma_{x_1x_1} & \sigma_{x_1x_2} & \dots & \dots & \sigma_{x_1x_n} \\ \sigma_{x_2x_1} & \sigma_{x_2x_2} & \dots & \dots & \sigma_{x_2x_n} \\ \sigma_{x_nx_1} & \sigma_{x_nx_2} & \dots & \dots & \sigma_{x_nx_n} \end{bmatrix}$$

Cuando se realiza la covarianza y el SVD a la matriz normalizada en la herramienta Matlab, se obtienen los valores singulares S, como se aprecia en la sección de apéndices al final del documento, Apéndice B (Análisis de datos normalizados por covarianza y SVD), lo cual se puede observar en la Figura 6.

Figura 6. Cálculo de los valores singulares.

```
S =
    3.083984353866936         0         0         0         0         0         0
         0    1.684035153250323         0         0         0         0         0
         0         0    1.236169143873317         0         0         0         0
         0         0         0    0.510184122090693         0         0         0
         0         0         0         0    0.467027248124947         0         0
         0         0         0         0         0         0.224576307517500         0
         0         0         0         0         0         0         0.098371497363235
```

Al realizar el estudio de la covarianza y el SVD a los datos normalizados, se evidencia que el máximo valor singular, siempre se ubica en la primera posición tal como se aprecia en la Figura 6, y el valor mínimo está en la última posición, aunque pueden aparecer valores de 0 posteriores a este. Luego de encontrar los valores singulares (S) en las diferentes combinaciones, seleccionamos

los mejores valores singulares (S), tomando como valor aceptable las combinaciones de números (K) (Número de condición) mayor a 50, ver Tabla 5.

Tabla 5. *Número de condición, K.*

Combinación	Variable Interés	Variable Estudio	S (mayor)	S (menor)	K (# condición)
Amia4	m(t) -12°C PAV	Temperatura falla Orig	1.4015326	0.78815198	1.77825
		Mod Reológico Orig			
Amia5	m(t) -12°C PAV	Inflamación	3.77321152	0.0525297	71.83012
		Viscosidad			
		Pérdida de masa			
		Temperatura falla Orig			
		Mod Reológico Orig			
		Angulo de fase Orig			
		Mod Reológico RTFO			
		Angulo de fase RTFO			
		Temperatura falla RTFO			
Amia6	Rigidez -12°C PAV	Inflamación	3.812359	0.0464742	82.03173
		Viscosidad			
		Pérdida de masa			
		Temperatura falla Orig			
		Mod Reológico Orig			
		Angulo de fase Orig			
		Temperatura falla RTFO			
		Mod Reológico RTFO			
		Angulo de fase RTFO			

Como se evidencia en la matriz Amia4 podemos decir que el número de condición indica que el número de variables se correlacionan, pero son de un valor menor, por lo tanto, no se puede despreciar ninguna variable. En su defecto se deben adicionar mayor número de variables para que

el número K sea mejor y aumente la correlación entre las variables. Cuando el K es muy grande (orden de magnitud >5000), se pueden descartar la variable de menor valor.

Amia7	Modulo reológico PAV	Inflamación	3.9298497	0.05393393	72.86415
		Viscosidad			
		Pérdida de masa			
		Temperatura falla Orig			
		Mod Reológico Orig			
		Angulo de fase Orig			
		Temperatura falla RTFO			
		Mod Reológico RTFO			
		Angulo de fase RTFO			
		Amia8			
Viscosidad					
Pérdida de masa					
Temperatura falla Orig					
Mod Reológico Orig					
Angulo de fase Orig					
Temperatura falla RTFO					
Mod Reológico RTFO					
Angulo de fase RTFO					
Amia21	Temp Falla PAV, Modulo reológico PAV, Rigidez -12°C PAV y m(t) - 12°C PAV		Inflamación	4.108231	0.0388627
		Viscosidad			
		Pérdida de masa			
		Temperatura falla Orig			
		Mod Reológico Orig			
		Angulo de fase Orig			
		Temperatura falla RTFO			
		Temperatura falla RTFO			
Amia4	m(t) -12°C PAV	Temperatura falla Orig	1.4015326	0.78815198	1.77825
		Mod Reológico Orig			

5.4 Regresión de datos SVD y Cálculo de Betas

Figura 7. Regresión de datos SVD y cálculo de betas.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Propuesta de Modelo Predictivo para Asfalto de la GRB %
%Regresión de datos SVD y cálculo de betas %
%Correlación Asf Original, RTFO VS Temp falla asf PAV %
%Estudiante: Sandra Barrera %
% %
%Escuela de Ingeniería Química %
%Universidad Industrial de Santander %
%Julio 22, 2022 %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc
XA = xlsread('Datos2022 sin normalizar');
X = XA(:,1:9);
Y = XA(:,10);
[U, S, V] = svd(X);
S_inv = zeros(size(S'));
S_inv(1:9,1:9)= inv(S(1:9,1:9));
Beta = V*S_inv*U'*Y;
    
```

Se realizaron varios análisis de regresión de datos SVD y de allí se obtuvieron los Betas para encontrar las variables de salida, a continuación, en las Tablas 6 y 7, se muestran los valores de Beta obtenidos de las diferentes regresiones. Los Betas se calculan de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Beta = V * S_{inv} * U' * Y \quad Ec. \quad (3)$$

Donde,

Y; son las variables que se quieren correlacionar.

Tabla 6. Valores de Beta por variable de salida individual.

VALORES DE BETA, POR VARIABLE DE INTERÉS INDIVIDUAL									
Beta	0.0091278	0.0388987	3.76537781	-0.099151	-2.33914663	0.6694856	0.38402738	-1.87335314	-0.62063321
Beta2	-14.685671	-6389.007	2082.56869	-228.1636	1628.539243	585.38804	178.249534	-1073.19767	-447.256886
Beta3	-0.3024732	213.1866	27.2537157	8.0215063	-164.409873	4.4410245	-10.344636	11.15204111	1.166824853
Beta4	0.0000730	0.1537331	-0.00271662	0.0000178	-0.04623509	-0.0088632	-0.0010396	0.024079085	0.01299539
Beta6	0.0115274	-0.063356	2.90407808	-0.21559	-0.33819083	1.0788443	0.46966509	-2.70282125	-1.03067375
Beta7	-0.0023996	0.1022546	0.8612997	0.1164391	-2.0009558	-0.4093587	-0.0856377	0.8294681	0.4100405
Beta8	-8.3617956	-34.85755	1628.68035	-97.97715	-165.154119	767.2329	11.9725302	-1389.5477	-611.186214
Beta9	-0.4056204	-0.345296	14.4471098	-3.649354	-1.73021216	12.849602	0.78603258	-8.23244515	-8.02395441
Beta10	-0.0000486	0.0002849	-0.01505664	-0.001648	0.001154694	-0.0037102	0.00158875	0.013186869	0.007610446
Beta11	-6.3238753	-6354.149	453.888335	-130.1864	1793.693361	-181.84485	166.277003	316.3500316	163.9293287

Tabla 7. Valores de Beta por variable de salida grupal.

VALORES DE BETA5, PARA LAS 4 VARIABLES DE INTERÉS PAV									
Temp de Falla Asf Resid	0.00912781	0.03889874	3.76537781	-0.0991507	-2.3391466	0.66948561	0.38402738	-1.8733531	-0.6206332
Mod Reologico a 64°C	-14.685671	-6389.0068	2082.56869	-228.16357	1628.53924	585.388043	178.249534	-1073.1977	-447.25689
Rigidez a - 12°C	-0.3024732	213.186597	27.2537157	8.02150631	-164.40987	4.44102448	-10.344636	11.1520411	1.16682485
m(t) a -12°C	0.0000730	0.1537331	-0.0027166	0.0000178	-0.0462351	-0.0088632	-0.0010396	0.02407909	0.01299539

Una vez se tienen los valores de los Beta, se valida el modelo con la matriz de datos de entrenamiento y calculamos la propiedad a predecir (y), que es la variable de salida.

Este modelo es de tipo lineal de la siguiente forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1\theta_1 + \beta_2\theta_2 + \beta_3\theta_3 + \beta_4\theta_4 + \dots + \beta_n\theta_n \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde “y” es la variable de salida y corresponde al valor que predice el modelo; “ β ”; es el valor de Beta obtenido al aplicar el algoritmo y “ θ ” corresponde a la variable de estudio, que en este caso se trata de las variables correspondientes a las etapas de asfalto original y asfalto RTFOT de la matriz de datos de entrenamiento, que se aprecian en la Tabla 1. En nuestro caso asumimos que $\beta_0 = 0$ y $\beta_1 = \text{Beta}$.

Aplicando los valores de las betas obtenidas en el modelo, se realiza la predicción de cada una de las variables de interés, y además se calcula el % error para cada variable. Las correlaciones obtenidas mostraron que la mayoría de las variables estudiadas guardan correlación entre ellas, por lo tanto, el módulo complejo a 64°C asfalto residuo PAV, la temperatura de falla asfalto residuo PAV, la rigidez a -12°C asfalto residuo PAV y $m(t)$ a -12°C asfalto Residuo PAV, pueden ser estimadas a partir de las correlaciones de una matriz conformada por las propiedades del asfalto original, tales como punto de inflamación, pérdida de masa, viscosidad 135°C, temperatura de falla, módulo complejo a 64°C, ángulo de fase a 64°C, junto a propiedades RTFOT como temperatura de falla, módulo complejo a 64°C y ángulo de fase a 64°C, ver las Tablas 8, 9 y 10.

Tabla 8. *Valores predichos, validación #1.*

Validación #1 del Modelo con los Datos de Prueba.											
	VARIABLES DE ESTUDIO (entrada)									Valor Real	VARIABLES DE INTERÉS (salida)
MUESTRA 1	282	0.440	0.32	66.9	1.428	85.3	68.9	4.137	79.9	18.8	Temperatura de Falla Asf Resid PAV. Dato entrenamiento
Predicho Beta	2.5740425	0.0171154	1.2049209	-6.633184	-3.34030139	57.107123	26.4594868	-7.75006194	-49.5885931	20.1	Temperatura de Falla Asf Resid PAV. Dato prueba
										6.65	% Error Relativo
MUESTRA 1	282	0.440	0.32	66.9	1.428	85.3	68.9	4.137	79.9	2219	Mod Reologico a 64°C, Asf Resid PAV.Dato entrenamiento
Predicho Beta2	-4141.3592	-2811.163	666.42198	-15264.14	2325.554038	49933.6	12281.3929	-4439.81875	-35735.8252	2815	Mod Reologico a 64°C, Asf Resid PAV. Dato prueba
										26.84	% Error Relativo
MUESTRA 1	282	0.440	0.32	66.9	1.428	85.3	68.9	4.137	79.9	140	Rigidez a -12°C, Asf Resid PAV.Dato entrenamiento
Predicho Beta3	-85.297435	93.802103	8.72118902	536.63877	-234.777299	378.81939	-712.74543	46.13599407	93.22930573	125	Rigidez a -12°C, Asf Resid PAV. Dato prueba
										11.05	% Error Relativo
MUESTRA 1	282	0.440	0.32	66.9	1.428	85.3	68.9	4.137	79.9	0.34	m(t) a -12°C, Asf Resid PAV.Dato entrenamiento
Predicho Beta4	0.0206	0.0676426	-0.00086932	0.0011931	-0.0660237	-0.7560295	-0.0716265	0.099615176	1.038331697	0.33	m(t) a -12°C, Asf Resid PAV. Dato prueba
										2.11	% Error Relativo

Tabla 9. Valores predichos, validación #2.

Validación #2 del Modelo con los Datos de Prueba.											
	VARIABLES DE ESTUDIO (entrada)									Valor Real	VARIABLES DE INTERÉS (salida)
MUESTRA 1	282	0.440	0.32	66.9	1.428	85.3	68.9	4.137	79.9	18.8	Temperatura de Falla Asf Resid PAV. Dato entrenamiento
Predicho Beta's	2.5740425	0.0171154	1.2049209	-6.633184	-3.34030139	57.107123	26.4594868	-7.75006194	-49.5885931	20.1	Temperatura de Falla Asf Resid PAV. Dato prueba
										6.65	% Error Relativo
MUESTRA 1	282	0.440	0.32	66.9	1.428	85.3	68.9	4.137	79.9	2219	Mod Reologico a 64°C, Asf Resid PAV. Dato entrenamiento
Predicho Beta's	-4141.3592	-2811.163	666.42198	-15264.14	2325.554038	49933.6	12281.3929	-4439.81875	-35735.8252	2815	Mod Reologico a 64°C, Asf Resid PAV. Dato prueba
										26.84	% Error Relativo
MUESTRA 1	282	0.440	0.32	66.9	1.428	85.3	68.9	4.137	79.9	140	Rigidez a -12°C, Asf Resid PAV. Dato entrenamiento
Predicho Beta's	-85.297435	93.802103	8.72118902	536.63877	-234.777299	378.81939	-712.74543	46.13599407	93.22930573	125	Rigidez a -12°C, Asf Resid PAV. Dato prueba
										11.05	% Error Relativo
MUESTRA 1	282	0.440	0.32	66.9	1.428	85.3	68.9	4.137	79.9	0.34	m(t) a -12°C, Asf Resid PAV. Dato entrenamiento
Predicho Beta's	0.020591	0.067643	-0.000869	0.001193	-0.066024	-0.756030	-0.071627	0.099615	1.038332	0.33	m(t) a -12°C, Asf Resid PAV. Dato prueba
										2.11	% Error Relativo

Como se observa en las tablas 8, 9 y 10, la validación del modelo se realizó con la matriz de datos crudos, y se estimaron las variables de salida (conocidas) usando las Betas obtenidas. Algunas Betas no lograron buena respuesta, esto se evidencia con el valor obtenido de la variable de salida (y), además del cálculo del error relativo, este error se estima con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Error relativo} = \frac{\text{Valor real} - \text{Valor inferido}}{\text{Valor real}} \times 100 \quad \text{Ec. (5)}$$

Tabla 10. Valores predichos, validación #3.

Validación #3 del Modelo con los Datos de Prueba.											
MUESTRA 1	282	0.440	0.32	66.9	1.428	85.3	68.9	4.137	79.9	18.8	Temperatura de Falla Asf Resid PAV. Dato entrenamiento
Predicho Beta6	3.2507	-0.0279	0.9293	-14.4230	-0.4829	92.0254	32.3599	-11.1816	-82.3508	20.1	Temperatura de Falla Asf Resid PAV. Dato prueba
										6.91	% Error Relativo
MUESTRA 1	282	0.440	0.32	66.9	1.428	85.3	68.9	4.137	79.9	18.8	Temperatura de Falla Asf Resid PAV. Dato entrenamiento
Predicho Beta7	-0.677	0.045	0.276	7.790	-2.857	-34.918	-5.900	3.432	32.762	-0.049	Temperatura de Falla Asf Resid PAV. Dato prueba
										100.26	% Error Relativo (No valida el resultado) OUTLIER
MUESTRA 1	282	0.440	0.32	66.9	1.428	85.3	68.9	4.137	79.9	2219	Mod Reologico a 64°C, Asf Resid PAV.Dato entrenamiento
Predicho Beta8	-2358.0264	-15.3373	521.1777	-6554.6713	-235.8401	65444.9661	824.9073	-5748.5588	-48833.7785	3045	Mod Reologico a 64°C, Asf Resid PAV. Dato prueba
										-37.22	% Error Relativo (error alto vs otros) No recomendada
MUESTRA 1	282	0.440	0.32	66.9	1.428	85.3	68.9	4.137	79.9	140.00	Rigidez a -12°C, Asf Resid PAV.Dato entrenamiento
Predicho Beta9	-114.3849	-0.1519	4.6231	-244.1418	-2.4707	1096.0710	54.1576	-34.0576	-641.1140	118.53	Rigidez a -12°C, Asf Resid PAV. Dato prueba
										15	% Error Relativo
MUESTRA 1	282	0.440	0.32	66.9	1.428	85.3	68.9	4.137	79.9	0.34	m(t) a -12°C, Asf Resid PAV.Dato entrenamiento
Predicho Beta10	-0.0137	0.0001	-0.0048	-0.1102	0.0016	-0.3165	0.1095	0.0546	0.6081	0.33	m(t) a -12°C, Asf Resid PAV. Dato prueba
										3.35	% Error Relativo
MUESTRA 1	282	0.440	0.32	66.9	1.428	85.3	68.9	4.137	79.9	2219	Mod Reologico a 64°C, Asf Resid PAV.Dato entrenamiento
Predicho Beta11	-1783.3328	-2795.8257	145.2443	-8709.4719	2561.3941	-15511.366	11456.4855	1308.7401	13097.9534	-230	Mod Reologico a 64°C, Asf Resid PAV. Dato prueba
										110.37	% Error Relativo (No valida el resultado) OUTLIER

En resumen, se muestran las siguientes propiedades que no guardan correlación exitosa y por ende no cumplen con la validación del modelo:

- Asfalto RTFOT (temperatura de falla, modulo reológico y ángulo de fase) en función de Temperatura de falla asfalto PAV, **(Beta7) OUTLIER.**

- Asfalto RTFOT (temperatura de falla, modulo reológico y ángulo de fase) en función de Módulo complejo, Asfalto Residuo PAV, **(Beta 11) OUTLIER.**

- Asfalto en estado Original (inflamación, viscosidad, pérdida de masa, temperatura de falla, módulo complejo y ángulo de fase) en función de Módulo complejo, Asfalto Residuo PAV, **(Beta8),** alto error.

En total se realizaron (11) correlaciones donde 7 funcionan de forma efectiva, otras 2 son OUTLIER y 1 correlación presenta alto error en su predicción. Las Betas seleccionadas para calcular la variable de salida en la predicción se pueden apreciar en la Tabla 11.

La validación del modelo se aprecia en la Figura 8, para esta validación se tomó un dato de entrenamiento y se estimaron las variables de interés (salida) con las Betas seleccionadas para cada propiedad a predecir. Se grafican los valores predichos en función de los valores reales, y se obtuvo una predicción con alto grado de confiabilidad pues el valor de R^2 indica que el modelo de regresión se ajusta satisfactoriamente a los datos predichos.

Figura 8. *Gráfica para validación del modelo.*

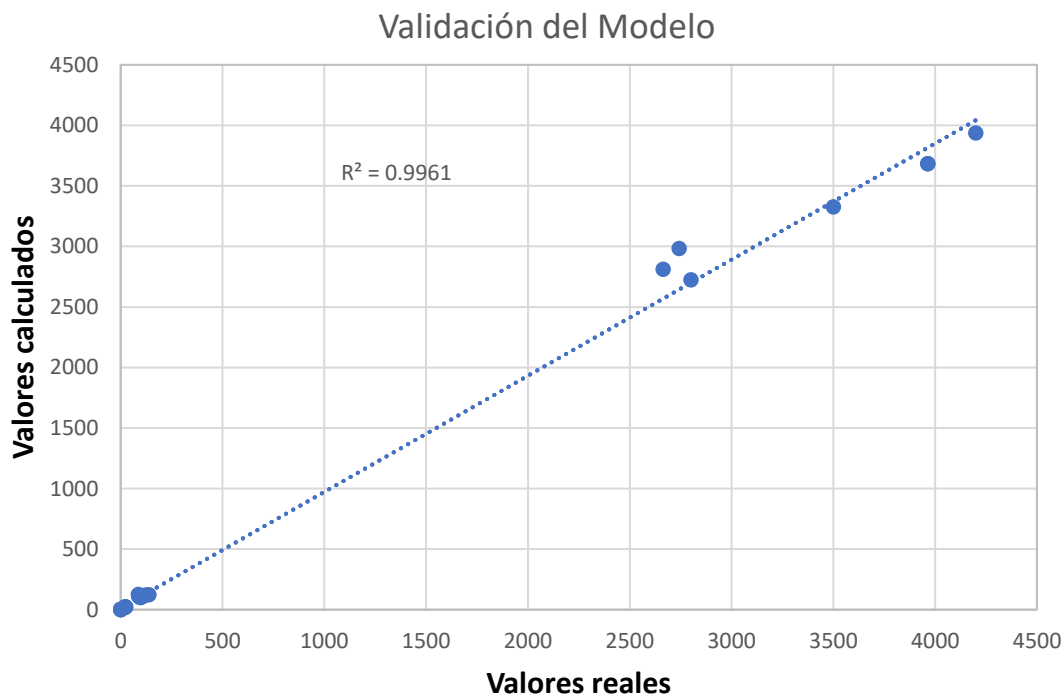


Tabla 11. *Las Betas seleccionadas*

BETAS SELECCIONADOS PARA LA VALIDACIÓN DEL MODELO									
Beta	0.00912781	0.03889874	3.76537781	-0.0991507	-2.3391466	0.66948561	0.38402738	-1.8733531	-0.6206332
Beta2	-14.685671	-6389.0068	2082.56869	-228.16357	1628.53924	585.388043	178.249534	-1073.1977	-447.25689
Beta3	-0.3024732	213.186597	27.2537157	8.02150631	-164.40987	4.44102448	-10.344636	11.1520411	1.16682485
Beta4	0.0000730	0.1537331	-0.0027166	0.0000178	-0.0462351	-0.0088632	-0.0010396	0.02407909	0.01299539

Tabla 12. *Grado de correlación por variable.*

Matriz	Variable entrada	Variable Predicha	Grado de correlación
Beta	Asfalto Original Asfalto RTFOT	Temperatura de Falla PAV	93.4%
Beta5	Asfalto Original Asfalto RTFOT		93.4%
Beta6	Asfalto Original		93.1%

Beta2	Asfalto Original Asfalto RTFOT	Modulo reologico PAV	73.2%
Beta5	Asfalto Original Asfalto RTFOT		73.2%
Beta5	Asfalto Original Asfalto RTFOT	Temperatura de Falla PAV	93.4%
		Modulo reologico PAV	73.2%
		Rigidez PAV	89.0%
		m(t) -12°C PAV	97.9%
Beta3	Asfalto Original Asfalto RTFOT	Rigidez PAV	89.0%
Beta5	Asfalto Original Asfalto RTFOT		89.0%
Beta9	Asfalto Original		85.0%
Beta4	Asfalto Original Asfalto RTFOT	m(t) a -12°C PAV	97.9%
Beta5	Asfalto Original Asfalto RTFOT		97.9%
Beta10	Asfalto Original		96.7%

Los grados de correlación obtenidos por variable de interés se aprecian en la tabla 12, su lectura indica que a medida que se haga interactuar un mayor número de variables, mejor será la respuesta en el modelo. En la predicción final, se concluye que la temperatura de falla PAV, el Módulo complejo a 64°C PAV, la rigidez y m(t)-12°C pueden ser inferidos a partir del modelo creado, aplicando las Betas obtenidas con mayor grado de correlación. Ver Tabla 13.

Tabla 13. Predicción final

PROPIEDAD/ MUESTRA	Inflamación °C	Viscosidad a 135°C Mpa.s	Pérdida masa Asf Original %	Temp Falla Asf Original °C	Mod Reolog a 64°C, Asf Original Kpa	Angulo de fase δ a 64°C Asf Original	Temp Falla Asf Resid RTFO °C	Mod Reolog a 64°C, Asf Resid RTFO Kpa	Angulo de fase δ a 64°C, Asf Resid RTFO	Predicho con Beta para Temp Falla Asf Resid PAV °C	Predicho con Beta2 Modulo Reolog a 64°C, Asf Resid PAV Kpa	Predicho con Beta3 Rigidez a - 12°C, Asf Resid RTFO Mpa	Predicho con Beta4 m(t) a - 12°C, Asf Resid RTFO
1	278	0.4025	0.280	67.7	1.509	82.32	69.9	4.726	78.72	17.61	1309	91	0.35
2	282	0.3213	0.280	66.3	1.289	82.46	68.1	3.710	79.57	19.08	2201	107	0.33
3	285	0.4025	0.440	67.0	1.405	83.10	69.9	4.715	78.38	19.34	2150	108	0.34
4	292	0.4025	0.360	67.2	1.390	83.64	69.7	4.559	79.35	19.10	1824	112	0.35
5	291	0.4025	0.270	66.7	1.317	83.42	68.0	3.675	80.19	19.30	1788	125	0.34
6	290	0.4083	0.290	66.1	1.255	83.50	68.1	3.680	79.31	20.20	2296	131	0.33
7	302	0.4083	0.344	66.3	1.294	83.05	69.0	4.145	79.60	19.40	1518	118	0.35
8	286	0.3213	0.280	65.4	1.164	81.36	67.1	3.251	79.84	19.07	1694	119	0.34
9	286	0.3213	0.280	65.7	1.199	84.86	67.7	3.513	81.10	20.26	2993	130	0.33
10	304	0.4083	0.289	66.1	1.261	85.25	68.3	3.805	80.51	20.58	2487	134	0.34
11	284	0.4083	0.280	66.8	1.355	82.76	67.8	3.556	82.00	17.76	810	123	0.37
12	296	0.3213	0.295	67.1	1.420	82.96	69.8	4.622	79.12	18.43	1876	82	0.34
13	294	0.4083	0.280	66.8	1.331	83.94	69.9	4.718	79.23	19.05	1681	118	0.35
14	276	0.3213	0.316	68.1	1.588	82.00	69.4	4.337	78.87	17.73	2043	65	0.33
15	302	0.4083	0.280	66.8	1.369	82.92	68.3	3.797	80.35	18.76	1230	112	0.35
16	304	0.3213	0.316	67.2	1.420	83.31	68.2	3.718	79.60	19.59	2454	90	0.32
17	246	0.4083	0.800	66.8	1.355	82.76	67.8	3.556	82.00	19.37	2451	149	0.36
18	296	0.4083	0.280	67.1	1.400	82.02	69.6	4.471	79.57	17.72	631	100	0.36
19	278	0.3588	0.372	66.2	1.249	82.98	68.9	4.094	80.01	19.15	2008	123	0.35
20	286	0.3588	0.372	66.5	1.309	81.29	68.9	4.079	79.61	18.20	1125	105	0.36
21	278	0.3588	0.372	65.2	1.139	82.56	66.8	3.136	81.44	19.33	1825	144	0.36
22	288	0.3588	0.372	66.7	1.352	83.63	69.9	4.802	78.28	19.52	2487	105	0.33
23	302	0.3588	0.372	67.6	1.474	83.76	69.0	4.198	79.01	19.69	2512	92	0.32
24	286	0.3588	0.372	66.4	1.303	83.61	68.4	3.821	80.6	19.46	2241	119	0.34
25	292	0.3588	0.372	67.3	1.454	82.79	68.1	3.678	80.05	19.01	2060	97	0.33

26	292	0.3588	0.372	66.5	1.305	82.64	68.2	3.731	80.19	19.19	1810	114	0.34
27	296	0.3588	0.372	66.1	1.244	83.61	67.5	3.428	81.05	19.83	2127	129	0.34
28	296	0.3588	0.372	66.2	1.273	85.37	68.2	3.765	81.22	20.46	2868	129	0.34
29	288	0.3213	0.316	66.0	1.233	83.87	67.5	3.438	80.60	20.01	2715	123	0.33
30	294	0.3588	0.372	66.4	1.301	82.75	68.7	4.044	79.66	19.24	1852	111	0.34
31	280	0.3150	0.346	67.1	1.391	82.91	69.1	4.175	78.59	19.41	2773	93	0.32
32	290	0.3150	0.346	65.3	1.145	84.50	67.4	3.360	80.38	21.08	3338	134	0.32
33	294	0.3588	0.370	66.4	1.277	83.9	66.7	3.044	81.63	19.94	2317	132	0.34
34	286	0.3302	0.346	66.8	1.355	83.59	70.5	5.008	77.71	19.56	2744	95	0.33
35	292	0.3150	0.350	67.0	1.386	83.22	69.4	4.314	78.67	19.57	2669	90	0.32
36	282	0.3150	0.350	65.5	1.173	83.85	67.9	3.604	80.72	20.03	2758	128	0.34
37	258	0.3302	0.350	65.3	1.140	84.18	67.9	3.603	79.74	20.74	3638	143	0.32
38	282	0.3213	0.316	67.4	1.428	82.63	69.2	4.213	79.41	18.47	2079	88	0.33
39	294	0.3225	0.360	67.2	1.409	82.89	70.5	5.052	76.86	19.49	2625	82	0.32
40	305	0.3225	0.316	67.4	1.450	82.54	68.9	4.099	80.22	18.16	1423	80	0.34
41	296	0.3225	0.360	66.2	1.273	85.37	68.2	3.765	81.22	20.41	3075	121	0.33
42	284	0.3225	0.360	65.7	1.193	83.17	67.8	3.533	79.37	20.50	2953	124	0.32
43	284	0.3225	0.360	64.8	1.089	84.49	67.4	3.366	81.20	20.74	3051	144	0.34
44	292	0.3225	0.360	65.9	1.232	83.78	68.8	4.056	80.06	19.84	2519	115	0.34
45	286	0.3225	0.360	66.4	1.314	85.32	70.1	4.810	79.08	20.27	3388	108	0.32
46	288	0.3225	0.360	65.0	1.099	83.51	67.4	3.359	80.29	20.65	2804	137	0.33
47	290	0.3225	0.360	65.9	1.216	83.30	68.4	3.852	79.44	20.15	2666	118	0.33
48	288	0.3225	0.360	65.6	1.194	84.73	68.8	4.052	79.43	20.96	3426	124	0.32
49	288	0.3225	0.370	66.2	1.257	81.84	68.0	3.622	79.63	19.23	1950	109	0.34
50	292	0.3225	0.360	66.7	1.345	82.40	69.8	4.563	77.51	19.59	2487	89	0.32
51	292	0.3213	0.316	66.1	1.246	83.22	68.0	3.632	79.50	20.08	2647	114	0.33
52	301	0.3225	0.346	65.5	1.176	82.69	68.4	3.835	78.98	20.24	2368	114	0.33
53	262	0.3225	0.360	66.0	1.232	83.09	68.7	3.933	78.47	20.28	3358	120	0.32
54	298	0.3150	0.346	66.7	1.343	83.65	69.0	4.147	79.36	19.76	2622	97	0.33
55	300	0.3225	0.350	66.7	1.336	83.15	68.3	3.759	80.16	19.44	2183	101	0.33
56	296	0.3225	0.360	65.2	1.136	82.51	67.4	3.348	80.42	19.89	2069	126	0.34
57	284	0.3188	0.337	65.8	1.212	83.47	69.7	4.563	78.96	19.61	2529	112	0.34
58	296	0.3150	0.346	65.8	1.214	84.27	68.6	3.932	79.90	20.46	2928	117	0.33
59	296	0.3150	0.346	66.2	1.259	83.62	67.8	3.531	80.45	19.98	2571	114	0.33
60	304	0.3188	0.337	66.4	1.284	84.15	67.1	3.236	81.86	19.71	2277	118	0.34
61	286	0.3438	0.268	65.1	1.123	84.53	67.3	3.293	80.23	21.03	3198	141	0.32
62	296	0.3150	0.346	66.3	1.259	81.83	68.9	4.052	78.87	19.20	1844	100	0.34
63	288	0.3438	0.268	66.1	1.241	83.27	68.3	3.745	79.97	19.52	2205	118	0.34
64	280	0.3438	0.268	64.9	1.099	85.22	69.7	4.551	78.18	21.35	3692	135	0.32
65	288	0.3188	0.337	64.5	1.055	84.99	69.2	4.319	80.12	20.71	3055	137	0.34
66	282	0.3438	0.268	64.6	1.067	83.07	66.9	3.118	80.57	20.16	2390	144	0.34
67	288	0.3438	0.268	65.6	1.195	84.98	66.5	3.000	81.87	20.35	2874	142	0.33
68	284	0.3188	0.337	64.6	1.067	83.78	66.2	2.874	81.54	20.49	2783	148	0.34
69	298	0.3188	0.327	66.3	1.270	83.35	67.9	3.566	79.43	20.32	2751	110	0.32
70	292	0.3150	0.346	65.5	1.176	83.67	69.2	4.252	79.14	20.24	2745	116	0.33
71	300	0.3188	0.327	65.9	1.228	82.37	67.7	3.480	79.63	19.78	2138	110	0.33
72	300	0.3188	0.327	65.4	1.157	84.81	66.9	3.173	81.13	20.97	3081	135	0.33
73	302	0.3188	0.327	65.3	1.147	82.44	68.7	3.954	79.26	19.82	1990	113	0.34
74	285	0.3188	0.350	65.7	1.195	83.30	68.0	3.569	79.31	20.60	3044	121	0.32
75	272	0.3200	0.327	66.6	1.318	83.36	69.1	4.145	79.17	19.48	2850	106	0.33
76	286	0.3200	0.327	66.8	1.340	83.51	69.1	4.249	81.89	17.76	1394	105	0.36
77	280	0.3188	0.346	66.9	1.366	80.95	70.7	5.231	79.30	16.37	440	84	0.37
78	275	0.3150	0.310	66.7	1.312	81.08	67.2	3.247	81.15	17.65	1175	108	0.35
79	288	0.3200	0.462	67.1	1.406	83.13	69.6	4.445	78.62	19.70	2804	91	0.32
80	282	0.3188	0.394	66.1	1.243	83.59	68.7	3.945	78.09	21.10	3603	115	0.31
81	275	0.3200	0.630	66.8	1.342	82.48	68.7	3.936	79.94	19.75	2724	110	0.34
82	286	0.3150	0.346	66.4	1.294	84.53	69.9	4.571	78.06	20.74	3589	104	0.31

6. Conclusiones

Al estudiar la matriz de crudos ASSAY tipo II y conocer el esquema de preparación del asfalto por disponibilidad y química asociada de los crudos, se logran reconocer las ventanas operativas de las mezclas de los crudos en función de la calidad del asfalto grado desempeño (PG 64-22). Concluyendo que en la preparación de asfalto en GRB, se utilizan en mayor proporción los crudos nafténico-aromáticos y aromáticos por favorecer al cumplimiento de especificación deseada. La matriz de entrenamiento fue creada con las caracterizaciones PG 64-22 y fue la data de entrada a la herramienta Matlab.

Los resultados de la validación del modelo y la predicción de las propiedades de la tercera etapa de caracterización de asfaltos grado desempeño (PG) 64-22 (PAV), dieron como resultado valores típicos dentro de tendencia para cada propiedad inferida. El modelo de regresión se ajusta a los datos predichos.

Con la predicción de las propiedades de interés; temperatura de falla asfalto residuo PAV, modulo reológico a 64°C asfalto residuo PAV, rigidez a -12°C asfalto residuo PAV y $m(t)$ a -12°C asfalto residuo PAV, se logra tener información en corto tiempo y así confirmar la calidad del asfalto grado desempeño para el cumplimiento de especificación PG 64-22 en ECP.

El proyecto cubrió análisis de datos de las tres etapas de la caracterización (PG), estas son: asfalto original, asfalto envejecido a corto plazo (RTFOT) y asfalto envejecido a largo plazo (PAV). Queda evidencia en los resultados de validación obtenidos que la respuesta del modelo mejora cuando se realiza una mayor interrelación entre el número de variables y al implementar este modelo predictivo desarrollado en Matlab, se logró establecer medidas de calidad alternas para anticipar la calidad del asfalto grado desempeño PG64-22, producido en la GRB, mediante la

aplicación de un modelo predictivo desarrollado en Matlab a través de aprendizaje no supervisado usando el algoritmo SVD (Descomposición del Valor Singular). Es importante tener presente que el modelo queda habilitado y se puede actualizar de forma periódica con una matriz de datos de entrenamiento de mayor tamaño.

7. Recomendaciones

Este modelo predictivo implementado para asfalto grado desempeño PG 64-22, se podría aplicar a futuras correlaciones en diferentes etapas del proceso, y productos. Teniendo en cuenta la premisa de lograr maximizar valor en la compañía, se recomienda dar continuidad a estudios de correlación para inferir propiedades críticas en las diferentes etapas del proceso como en productos terminados.

Se recomienda implementar este modelo predictivo en esquemas de preparación de maximización de fondos de vacío, dando solución y aumentando el margen de refinación en la GRB, trabajando de forma experimental con fondos Demex y algunas mezclas de solventes para encontrar especificaciones de mayor margen.

A nivel de laboratorio, es decir en el Departamento inspección de Calidad, se podrían crear modelos para inferir propiedades haciendo foco en predicción de características cuyas marchas analíticas sean muy extensas.

Referencias Bibliográficas

- Acervo Lima.* (27 de 12 de 2021). Obtenido de <https://es.acervolima.com/como-calcular-la-covarianza-en-matlab/>
- Raona.* (31 de julio de 2021). Obtenido de MACHINE LEARNING_TRENDS: <https://www.raona.com/los-10-algoritmos-esenciales-machine-learning/>
- Algarra, P. S. (2006). Métodos Estadísticos Aplicados. En P. S. Algarra, *Métodos Estadísticos Aplicados*. Barcelona.
- Alvarenga, E. R. (Septiembre de 2003). *Incidencia de los ciclos de calentamiento-enfriamiento en las propiedades físicas del Cemento Asfáltico*. Salvador.
- Azaria Perez, e. a. (2020). *Academia.edu*. Obtenido de https://www.academia.edu/36430065/ASFALTO_EN_CONSTRUCCION_3_
- Beers, K. J. (2007). *Numerical Methods for Chemical Engineering. Applications in Matlab*. Cambridge.
- Chavez-Valencia et al, 2. (2011). Modelación del envejecimiento de los pavimentos asfálticos con la metodología de la superficie de respuesta. *Scielo*.
- CSIC. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.* (s.f.). Obtenido de <https://sitios.csic.es/web/calculo-cientifico/unsrambler>
- Diego. (6 de Marzo de 2012). *wake-up-neo.net*. Obtenido de <https://www.wake-up-neo.net/es/machine-learning/importancia-de-pca-o-svd-en-el-aprendizaje-automatico/942192650/>

- Ecopetrol S.A. Vicepresidencia de refinación y petroquímica. (26 de Febrero de 2009). Manual de descripción de procesos de la unidad FCCU-UOP1 (FCCC/VRU). Barrancabermeja, Santander, Colombia: Ecopetrol S.A.
- Guerrero, S. B. (2020). Efecto del envejecimiento de mezclas asfálticas en el ciclo de vida del pavimento desde el aspecto técnico y ambiental. Revisión del estado de conocimiento. *Revista Vínculos*, <https://doi.org/10.14483/2322939X.16227>.
- Hermítica), M. H. (2022). *matricesydeterminantes.com*. Obtenido de <https://www.matricesydeterminantes.com/matrices/tipos-de-matrices/matriz-hermitiana-o-hermitica/>
- Hinrichs, R. L. (2012). Metodología SUPERPAVE para el desarrollo de Pavimentos Asfálticos de Alto Desempeño. *EMB Construcción*.
- Juliana Puello Méndez, N. A. (2013). *Correlaciones estadísticas para la estimación de propiedades reológicas de asfaltos en estado original y envejecido*. Bucaramanga.
- Lorenz, E. (1956). https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/684812/EM_7_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Obtenido de https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/684812/EM_7_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- MathWorks. (2022). Cree modelos predictivos a partir de datos de entrada y respuesta conocidos con técnicas de Machine Learning.
- MathWorks. (2022). Machine Learning with MATLAB. *MATLAB and Simulink*.
- Mogollón, J. M. (2021). ENVEJECIMIENTO DE ASFALTOS Y MEZCLAS ASFÁLTICAS: REVISIÓN TEÓRICA.

- perez, A. (s.f.). *www.academia.edu*. Obtenido de https://www.academia.edu/36430065/ASFALTO_EN_CONSTRUCCION_3_
- perez, j. (2009). *estado del arte* (Vol. 2). medellin.
- Santos, P. R. (2 de Diciembre de 2021). Tipos de aprendizaje en Machine Learning: supervisado y no supervisado.
- SOL. (2010). <http://www.solpetroleo.com/fisico-quimica-del-asfalto>.
- Team, Data Science. (2021). Aprendizaje automático - Descomposición del valor singular. *Data Science*, <https://datascience.eu/es/aprendizaje-automatico/descomposicion-del-valor-singular/>.
- Thanh-Hai Le et al, 2. (2020). Modelo basado en inteligencia artificial par la predicción del módulo dinámico drl asfalto de masilla de piedra.
- Xue, e. a. (2021). Investigación sobre la respuesta micromecánica de la mezcla asfáltica durante la deformación permanente basada en la prueba de seguimiento virtual de ruedas en 3D. *Construcción y Materiales para la construcción*.
- Yu Liua Xiaodong, Z. Z. (2017). Modelado de elementos discretos de formas de partículas realistas en mezclas a base de piedra mediante un proceso de generación de imágenes basado en MATLAB. *ELSEVIER*.

Apéndices

Apéndice A. Especificación Técnica ECP, Asfalto PG 64-22

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	NORMA DE ENSAYO ASTM D 6373-16	NORMA DE ENSAYO AASHTO M 320-10	Especificación	
				Mín.	Máx.
Asfalto Original					
Punto de ignición mediante la copa abierta Cleveland	°C	ASTM D 92	AASHTO T 48	230	-
Viscosidad Brookfield 135°C	cP	ASTM D 4402	AASHTO T 316	-	3000
Temperatura de falla, (G*/senδ=1.0 kPa)	°C	ASTM D 7175	AASHTO T 315	REPORTAR	
Módulo reológico de corte dinámico a 64°C, (G*/senδ)	kPa	ASTM D 7175	AASHTO T 315	1.0	-
Ángulo de fase δ a 64°C	°	ASTM D 7175	AASHTO T 315	REPORTAR	
Asfalto residuo de la prueba de película delgada					
Pérdida de masa por calentamiento	%	ASTM D 2872	AASHTO T 240	-	1.0
Temperatura de falla, (G*/senδ=2.2 kPa)	°C	ASTM D 7175	AASHTO T 315	REPORTAR	
Módulo reológico de corte dinámico a 64°C, (G*/senδ)	kPa	ASTM D 7175	AASHTO T 315	2.2	-
Ángulo de fase δ a 64°C	°	ASTM D 7175	AASHTO T 315	REPORTAR	
Asfalto residuo de la prueba envejecimiento a presión					
Temperatura de falla, (G*senδ=5000 kPa) ¹	°C	ASTM D 7175	AASHTO T 315	REPORTAR	
Módulo reológico de corte dinámico a 25°C, (G*senδ)	kPa	ASTM D 7175	AASHTO T 315	-	5000
Rigidez en CREEP a -12°C, 60 s. S(t) ²	MPa	ASTM D6648	AASHTO T 313	-	300
Valor m(t) a -12°C, 60s. S(t)	-	ASTM D6648	AASHTO T 313	0.3	-
CUMPLIMIENTO					
GRADO DE DESEMPEÑO: ASFALTO PG 64 -22					

Notas: ¹Temperatura de falla (G*senδ=5000 kPa) es un indicativo del comportamiento a la fatiga del pavimento en su último ciclo de vida.

Nota: Ecopetrol. Especificación Técnica del Catálogo de Productos de Ecopetrol S.A. Asfalto PG 64-22

Apéndice B. Análisis de datos normalizados por covarianza y SVD

```

Editor - C:\Users\pacev\OneDrive\Documentos2\MATLAB\Sandra2.m
Command Window

Anormal =

Columns 1 through 11

-2.2907    1.9547   -0.9500   -0.1754    0.0487    0.0218    0.0363    0.4736   -0.2992   -1.2092   -1.1784
-1.2485    1.7292    0.1328    0.3104    0.7880   -0.1525    0.1034    0.6177   -0.6179   -0.6806   -0.7275
-0.7274    1.3748    0.1328    4.0347   -1.3891   -2.0690    4.1273    0.5379   -2.2112    1.4339   -0.4646
 0.3148    0.1826    1.3360   -0.0135   -0.1137   -0.6751    1.3106   -3.4170    1.9315    1.2753    1.2102
-0.5537   -0.2363    1.3360   -0.0945    0.1543    1.0672   -0.0978    0.2851   -0.0868    0.1123    1.6918
-0.5537   -0.1718    1.9376   -0.3373   -0.1950    1.2414    0.2375    0.9724    0.2319    1.3810    1.2556
-0.0326    1.0525    0.1328   -0.5802   -0.5930    1.2414    0.3717    1.1807   -0.7666    0.7467    0.3955
-1.1616   -0.9129   -0.7695   -0.0945    0.3087    1.2414   -0.2990    0.1255   -0.0868    0.7467    0.9644
-1.1616    1.9547   -1.0703    0.4723    1.4135   -1.8947    0.0363    0.3871   -0.9366    1.1696    1.0578
 0.1411   -0.0752   -0.4687    0.0675    0.5686    0.0218   -1.3050   -1.6125    1.7191   -0.6806   -0.6317
 0.2280    0.1504    0.1328    0.3104    0.9504   -0.6751   -0.5673   -0.5196    0.3381   -0.4163   -0.5346
 0.1411   -0.5585   -1.6719   -0.0135    0.4874   -0.5009    0.3046    1.1608   -0.8303   -0.3106   -0.3331
 1.4439   -0.3007   -0.4687    0.3104    0.9667   -0.3267   -0.8355   -0.8831    0.4444    0.4824    0.2592
-1.0748   -0.3652   -1.0703    0.3104   -0.3087   -0.3267   -0.2319    0.1056    0.2319   -1.6850   -1.3935
 0.8360    0.5048    0.7344    0.3913    1.1617   -0.3267   -0.2990   -0.1494    0.6568   -0.5220   -0.6587
 0.1411   -0.2363   -0.4687   -0.6612    0.0406   -0.8494    0.0363    0.6820   -1.5739   -0.9978   -1.0580
 1.1834   -0.7196    0.7344   -0.0135    0.3899    0.5445   -0.7685   -0.7457    1.2942    0.1652   -0.0370
-0.2931    0.0537   -1.6719   -0.2564    0.0650   -0.8494    0.3046    1.0278   -0.9366   -2.2136   -1.5483
 1.7045    0.1826    0.7344    0.7152    1.7790   -1.5463   -0.2319    0.8726   -1.2552   -1.1035   -1.1919
 0.3148   -1.5896   -0.4687   -0.9850   -1.2998    1.0672   -0.4331   -0.0829    0.4444   -0.3106   -0.8147
 0.3148   -1.2674    1.3360   -0.9041   -1.2835    0.8929   -0.3661   -0.0740    1.0817    1.1167    0.9841
-0.5537   -0.2363    1.3360   -0.0945    0.1543    1.0672   -0.0978    0.2851   -0.0868    0.1123    1.6918
 1.1834   -0.6229    0.1328   -1.3089   -1.9496    1.0672   -0.5673   -0.3666    0.4444    0.2181    0.0196
 1.7045   -1.8473   -1.0703   -1.3899   -2.1446    0.7187   -0.7685   -0.8632    0.8693    1.1696    1.0418

Columns 12 through 13

 1.5004    1.3537
 0.8779    0.5120
 0.6863   -0.3297
-1.7557   -1.1713
 0.5427    0.5120
 1.4046   -1.1713
-1.0854   -0.3297
-0.2713   -1.6763
-0.2713    1.3537
-0.9896   -1.1713
-0.6065   -1.1713
-1.0854   -0.3297
 0.4469   -1.1713
-0.6544    0.5120
-0.7981    1.3537
-0.6544   -1.1713
 0.2075    1.3537
-0.5108   -0.3297
-1.8515   -0.3297
 0.3990    1.3537
 1.1652    0.5120
 0.5427    0.5120
 1.7398   -0.3297
 1.0215    1.3537
    
```

Apéndice C. Creación de matrices (combinaciones)

Una vez con la información de las caracterizaciones de Asfalto grado PG, se tabulo, se normalizó y se importó desde Excel al software Matlab, siendo este el software usado para el desarrollo del proyecto. Posteriormente se crean las matrices a evaluar. Se realizan diferentes análisis creando matrices para encontrar la mejor correlación de las propiedades.

Matriz Amia: conformada por las matrices **AA1** y **matriz AA2**. Con los datos de la caracterización asfalto grado desempeño PG de la GRB, analizando cinco propiedades de la primera etapa (asfalto original) tales como viscosidad a 135°C, pérdida de masa, temperatura de falla, modulo reológico a 64°C, ángulo de fase a 64°C, una propiedad de la segunda etapa (asfalto RTFO), temperatura de falla en relación con una propiedad de la tercera etapa (asfalto PAV) Modulo reológico a 64°C.

```
>> Amia
Amia =
-1.1784    1.9547   -0.9500   -0.1754    0.0487    0.0218    0.0363
-0.7275    1.7292    0.1328    0.3104    0.7880   -0.1525    0.1034
-0.4646    1.3748    0.1328    4.0347   -1.3891   -2.0690    4.1273
 1.2102    0.1826    1.3360   -0.0135   -0.1137   -0.6751    1.3106
 1.6918   -0.2363    1.3360   -0.0945    0.1543    1.0672   -0.0978
 1.2556   -0.1718    1.9376   -0.3373   -0.1950    1.2414    0.2375
 0.3955    1.0525    0.1328   -0.5802   -0.5930    1.2414    0.3717
 0.9644   -0.9129   -0.7695   -0.0945    0.3087    1.2414   -0.2990
 1.0578    1.9547   -1.0703    0.4723    1.4135   -1.8947    0.0363
-0.6317   -0.0752   -0.4687    0.0675    0.5686    0.0218   -1.3050
-0.5346    0.1504    0.1328    0.3104    0.9504   -0.6751   -0.5673
-0.3331   -0.5585   -1.6719   -0.0135    0.4874   -0.5009    0.3046
 0.2592   -0.3007   -0.4687    0.3104    0.9667   -0.3267   -0.8355
-1.3935   -0.3652   -1.0703    0.3104   -0.3087   -0.3267   -0.2319
-0.6587    0.5048    0.7344    0.3913    1.1617   -0.3267   -0.2990
-1.0580   -0.2363   -0.4687   -0.6612    0.0406   -0.8494    0.0363
-0.0370   -0.7196    0.7344   -0.0135    0.3899    0.5445   -0.7685
-1.5483    0.0537   -1.6719   -0.2564    0.0650   -0.8494    0.3046
-1.1919    0.1826    0.7344    0.7152    1.7790   -1.5463   -0.2319
-0.8147   -1.5896   -0.4687   -0.9850   -1.2998    1.0672   -0.4331
 0.9841   -1.2674    1.3360   -0.9041   -1.2835    0.8929   -0.3661
 1.6918   -0.2363    1.3360   -0.0945    0.1543    1.0672   -0.0978
 0.0196   -0.6229    0.1328   -1.3089   -1.9496    1.0672   -0.5673
 1.0418   -1.8473   -1.0703   -1.3899   -2.1446    0.7187   -0.7685
```


Matriz Amia2.

Modulo Reológico PAV, con viscosidad y pérdida de masa Asf original.

Amia2 =

-1.2092	1.9547	-0.9500
-0.6806	1.7292	0.1328
1.4339	1.3748	0.1328
1.2753	0.1826	1.3360
0.1123	-0.2363	1.3360
1.3810	-0.1718	1.9376
0.7467	1.0525	0.1328
0.7467	-0.9129	-0.7695
1.1696	1.9547	-1.0703
-0.6806	-0.0752	-0.4687
-0.4163	0.1504	0.1328
-0.3106	-0.5585	-1.6719
0.4824	-0.3007	-0.4687
-1.6850	-0.3652	-1.0703
-0.5220	0.5048	0.7344
-0.9978	-0.2363	-0.4687
0.1652	-0.7196	0.7344
-2.2136	0.0537	-1.6719
-1.1035	0.1826	0.7344
-0.3106	-1.5896	-0.4687
1.1167	-1.2674	1.3360
0.1123	-0.2363	1.3360
0.2181	-0.6229	0.1328
1.1696	-1.8473	-1.0703

Acov2 =

1.0435	-0.0995	0.4379
-0.0995	1.0435	-0.0413
0.4379	-0.0413	1.0435

S2 =

1.630882768636938	0	0
0	1.014243511373198	0
0	0	0.485308502598555

Matriz Amia3.

m (t) -12°C PAV, con viscosidad, pérdida de masa, temp falla, modulo reolog, ángulo de fase Asf original.

```
>> Amia3

Amia3 =

    1.3537    1.9547   -0.9500   -0.1754    0.0487    0.0218
    0.5120    1.7292    0.1328    0.3104    0.7880   -0.1525
   -0.3297    1.3748    0.1328    4.0347   -1.3891   -2.0690
   -1.1713    0.1826    1.3360   -0.0135   -0.1137   -0.6751
    0.5120   -0.2363    1.3360   -0.0945    0.1543    1.0672
   -1.1713   -0.1718    1.9376   -0.3373   -0.1950    1.2414
   -0.3297    1.0525    0.1328   -0.5802   -0.5930    1.2414
   -1.6763   -0.9129   -0.7695   -0.0945    0.3087    1.2414
    1.3537    1.9547   -1.0703    0.4723    1.4135   -1.8947
   -1.1713   -0.0752   -0.4687    0.0675    0.5686    0.0218
   -1.1713    0.1504    0.1328    0.3104    0.9504   -0.6751
   -0.3297   -0.5585   -1.6719   -0.0135    0.4874   -0.5009
   -1.1713   -0.3007   -0.4687    0.3104    0.9667   -0.3267
    0.5120   -0.3652   -1.0703    0.3104   -0.3087   -0.3267
    1.3537    0.5048    0.7344    0.3913    1.1617   -0.3267
   -1.1713   -0.2363   -0.4687   -0.6612    0.0406   -0.8494
    1.3537   -0.7196    0.7344   -0.0135    0.3899    0.5445
   -0.3297    0.0537   -1.6719   -0.2564    0.0650   -0.8494
   -0.3297    0.1826    0.7344    0.7152    1.7790   -1.5463
    1.3537   -1.5896   -0.4687   -0.9850   -1.2998    1.0672
    0.5120   -1.2674    1.3360   -0.9041   -1.2835    0.8929
    0.5120   -0.2363    1.3360   -0.0945    0.1543    1.0672
   -0.3297   -0.6229    0.1328   -1.3089   -1.9496    1.0672
    1.3537   -1.8473   -1.0703   -1.3899   -2.1446    0.7187
```


Matriz Amia4.

m (t) -12°C PAV, con temperatura falla y modulo reológico Asf original.

Amia4 =

1.3537	-0.1754	0.0487
0.5120	0.3104	0.7880
-0.3297	4.0347	-1.3891
-1.1713	-0.0135	-0.1137
0.5120	-0.0945	0.1543
-1.1713	-0.3373	-0.1950
-0.3297	-0.5802	-0.5930
-1.6763	-0.0945	0.3087
1.3537	0.4723	1.4135
-1.1713	0.0675	0.5686
-1.1713	0.3104	0.9504
-0.3297	-0.0135	0.4874
-1.1713	0.3104	0.9667
0.5120	0.3104	-0.3087
1.3537	0.3913	1.1617
-1.1713	-0.6612	0.0406
1.3537	-0.0135	0.3899
-0.3297	-0.2564	0.0650
-0.3297	0.7152	1.7790
1.3537	-0.9850	-1.2998
0.5120	-0.9041	-1.2835
0.5120	-0.0945	0.1543
-0.3297	-1.3089	-1.9496
1.3537	-1.3899	-2.1446

S4 =

Acov4 =

			1.401532628016801	0	0
1.0435	-0.1243	-0.1489	0	0.940750172275163	0
-0.1243	1.0435	0.2537	0	0	0.788151982316732
-0.1489	0.2537	1.0435			

Matriz Amia5.

m (t) -12°C PAV, con inflamación, viscosidad, perdida masa, temperatura de falla, modulo reológico, ángulo fase asfalto original, Temperatura de falla, mod reológico, ángulo de fase RTFO.

Amia5 =

1.3537	-2.2907	1.9547	-0.9500	-0.1754	0.0487	0.0218	0.0363	0.4736	-0.2992
0.5120	-1.2485	1.7292	0.1328	0.3104	0.7880	-0.1525	0.1034	0.6177	-0.6179
-0.3297	-0.7274	1.3748	0.1328	4.0347	-1.3891	-2.0690	4.1273	0.5379	-2.2112
-1.1713	0.3148	0.1826	1.3360	-0.0135	-0.1137	-0.6751	1.3106	-3.4170	1.9315
0.5120	-0.5537	-0.2363	1.3360	-0.0945	0.1543	1.0672	-0.0978	0.2851	-0.0868
-1.1713	-0.5537	-0.1718	1.9376	-0.3373	-0.1950	1.2414	0.2375	0.9724	0.2319
-0.3297	-0.0326	1.0525	0.1328	-0.5802	-0.5930	1.2414	0.3717	1.1807	-0.7666
-1.6763	-1.1616	-0.9129	-0.7695	-0.0945	0.3087	1.2414	-0.2990	0.1255	-0.0868
1.3537	-1.1616	1.9547	-1.0703	0.4723	1.4135	-1.8947	0.0363	0.3871	-0.9366
-1.1713	0.1411	-0.0752	-0.4687	0.0675	0.5686	0.0218	-1.3050	-1.6125	1.7191
-1.1713	0.2280	0.1504	0.1328	0.3104	0.9504	-0.6751	-0.5673	-0.5196	0.3381
-0.3297	0.1411	-0.5585	-1.6719	-0.0135	0.4874	-0.5009	0.3046	1.1608	-0.8303
-1.1713	1.4439	-0.3007	-0.4687	0.3104	0.9667	-0.3267	-0.8355	-0.8831	0.4444
0.5120	-1.0748	-0.3652	-1.0703	0.3104	-0.3087	-0.3267	-0.2319	0.1056	0.2319
1.3537	0.8360	0.5048	0.7344	0.3913	1.1617	-0.3267	-0.2990	-0.1494	0.6568
-1.1713	0.1411	-0.2363	-0.4687	-0.6612	0.0406	-0.8494	0.0363	0.6820	-1.5739
1.3537	1.1834	-0.7196	0.7344	-0.0135	0.3899	0.5445	-0.7685	-0.7457	1.2942
-0.3297	-0.2931	0.0537	-1.6719	-0.2564	0.0650	-0.8494	0.3046	1.0278	-0.9366
-0.3297	1.7045	0.1826	0.7344	0.7152	1.7790	-1.5463	-0.2319	0.8726	-1.2552
1.3537	0.3148	-1.5896	-0.4687	-0.9850	-1.2998	1.0672	-0.4331	-0.0829	0.4444
0.5120	0.3148	-1.2674	1.3360	-0.9041	-1.2835	0.8929	-0.3661	-0.0740	1.0817
0.5120	-0.5537	-0.2363	1.3360	-0.0945	0.1543	1.0672	-0.0978	0.2851	-0.0868
-0.3297	1.1834	-0.6229	0.1328	-1.3089	-1.9496	1.0672	-0.5673	-0.3666	0.4444
1.3537	1.7045	-1.8473	-1.0703	-1.3899	-2.1446	0.7187	-0.7685	-0.8632	0.8693

Acov5 =

1.0435	-0.0659	0.0751	-0.0688	-0.1243	-0.1489	0.0764	-0.1274	0.1404	0.0596
-0.0659	1.0435	-0.5877	0.1688	-0.2548	-0.1042	0.0396	-0.3318	-0.3505	0.3448
0.0751	-0.5877	1.0435	-0.0413	0.5503	0.4560	-0.5455	0.4511	0.2555	-0.4869
-0.0688	0.1688	-0.0413	1.0435	0.0423	0.0043	0.3228	0.1028	-0.2070	0.3054
-0.1243	-0.2548	0.5503	0.0423	1.0435	0.2537	-0.6897	0.7836	0.1127	-0.4904
-0.1489	-0.1042	0.4560	0.0043	0.2537	1.0435	-0.4506	-0.2286	0.0937	-0.1370
0.0764	0.0396	-0.5455	0.3228	-0.6897	-0.4506	1.0435	-0.4774	-0.0227	0.4906
-0.1274	-0.3318	0.4511	0.1028	0.7836	-0.2286	-0.4774	1.0435	0.1551	-0.5546
0.1404	-0.3505	0.2555	-0.2070	0.1127	0.0937	-0.0227	0.1551	1.0435	-0.8226
0.0596	0.3448	-0.4869	0.3054	-0.4904	-0.1370	0.4906	-0.5546	-0.8226	1.0435

S5 =

Columns 1 through 7

3.773211525946505	0	0	0	0	0	0
0	1.667809781635723	0	0	0	0	0
0	0	1.398970809067219	0	0	0	0
0	0	0	1.147659189656414	0	0	0
0	0	0	0	1.015140183158480	0	0
0	0	0	0	0	0.845113357599924	0
0	0	0	0	0	0	0.300743665115865
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

Columns 8 through 10

0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0.157662462467358	0	0
0	0.075941968650971	0
0	0	0.052529665397205

Matriz Amia6

Rigidez a -12°C PAV, con inflamación, viscosidad, perdida masa, Temp-falla orig, modulo reo original, ángulo fase asf orig, Temp falla, mod reolog, ángulo de fase RTFO.

Amia6 =

1.5004	-2.2907	1.9547	-0.9500	-0.1754	0.0487	0.0218	0.0363	0.4736	-0.2992
0.8779	-1.2485	1.7292	0.1328	0.3104	0.7880	-0.1525	0.1034	0.6177	-0.6179
0.6863	-0.7274	1.3748	0.1328	4.0347	-1.3891	-2.0690	4.1273	0.5379	-2.2112
-1.7557	0.3148	0.1826	1.3360	-0.0135	-0.1137	-0.6751	1.3106	-3.4170	1.9315
0.5427	-0.5537	-0.2363	1.3360	-0.0945	0.1543	1.0672	-0.0978	0.2851	-0.0868
1.4046	-0.5537	-0.1718	1.9376	-0.3373	-0.1950	1.2414	0.2375	0.9724	0.2319
-1.0854	-0.0326	1.0525	0.1328	-0.5802	-0.5930	1.2414	0.3717	1.1807	-0.7666
-0.2713	-1.1616	-0.9129	-0.7695	-0.0945	0.3087	1.2414	-0.2990	0.1255	-0.0868
-0.2713	-1.1616	1.9547	-1.0703	0.4723	1.4135	-1.8947	0.0363	0.3871	-0.9366
-0.9896	0.1411	-0.0752	-0.4687	0.0675	0.5686	0.0218	-1.3050	-1.6125	1.7191
-0.6065	0.2280	0.1504	0.1328	0.3104	0.9504	-0.6751	-0.5673	-0.5196	0.3381
-1.0854	0.1411	-0.5585	-1.6719	-0.0135	0.4874	-0.5009	0.3046	1.1608	-0.8303
0.4469	1.4439	-0.3007	-0.4687	0.3104	0.9667	-0.3267	-0.8355	-0.8831	0.4444
-0.6544	-1.0748	-0.3652	-1.0703	0.3104	-0.3087	-0.3267	-0.2319	0.1056	0.2319
-0.7981	0.8360	0.5048	0.7344	0.3913	1.1617	-0.3267	-0.2990	-0.1494	0.6568
-0.6544	0.1411	-0.2363	-0.4687	-0.6612	0.0406	-0.8494	0.0363	0.6820	-1.5739
0.2075	1.1834	-0.7196	0.7344	-0.0135	0.3899	0.5445	-0.7685	-0.7457	1.2942
-0.5108	-0.2931	0.0537	-1.6719	-0.2564	0.0650	-0.8494	0.3046	1.0278	-0.9366
-1.8515	1.7045	0.1826	0.7344	0.7152	1.7790	-1.5463	-0.2319	0.8726	-1.2552
0.3990	0.3148	-1.5896	-0.4687	-0.9850	-1.2998	1.0672	-0.4331	-0.0829	0.4444
1.1652	0.3148	-1.2674	1.3360	-0.9041	-1.2835	0.8929	-0.3661	-0.0740	1.0817
0.5427	-0.5537	-0.2363	1.3360	-0.0945	0.1543	1.0672	-0.0978	0.2851	-0.0868
1.7398	1.1834	-0.6229	0.1328	-1.3089	-1.9496	1.0672	-0.5673	-0.3666	0.4444
1.0215	1.7045	-1.8473	-1.0703	-1.3899	-2.1446	0.7187	-0.7685	-0.8632	0.8693

Acov6 =

1.0435	-0.2003	-0.0870	0.1533	-0.1639	-0.5543	0.4643	-0.0168	0.1653	0.0504
-0.2003	1.0435	-0.5877	0.1688	-0.2548	-0.1042	0.0396	-0.3318	-0.3505	0.3448
-0.0870	-0.5877	1.0435	-0.0413	0.5503	0.4560	-0.5455	0.4511	0.2555	-0.4869
0.1533	0.1688	-0.0413	1.0435	0.0423	0.0043	0.3228	0.1028	-0.2070	0.3054
-0.1639	-0.2548	0.5503	0.0423	1.0435	0.2537	-0.6897	0.7836	0.1127	-0.4904
-0.5543	-0.1042	0.4560	0.0043	0.2537	1.0435	-0.4506	-0.2286	0.0937	-0.1370
0.4643	0.0396	-0.5455	0.3228	-0.6897	-0.4506	1.0435	-0.4774	-0.0227	0.4906
-0.0168	-0.3318	0.4511	0.1028	0.7836	-0.2286	-0.4774	1.0435	0.1551	-0.5546
0.1653	-0.3505	0.2555	-0.2070	0.1127	0.0937	-0.0227	0.1551	1.0435	-0.8226
0.0504	0.3448	-0.4869	0.3054	-0.4904	-0.1370	0.4906	-0.5546	-0.8226	1.0435

S6 =

Columns 1 through 7

3.812359214745734	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1.983802026693285	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1.509183443233012	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1.160914682064813	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0.895201029599300	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0.498454937352141	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0.306520011384940	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

Columns 8 through 10

0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0.149165075824787	0	0
0	0.072707997076223	0
0	0	0.046474190721425

Matriz Amia7

Mod reológico PAV, con inflamación, viscosidad, perdida masa, temperatura de falla, modulo reológico, ángulo original, Temperatura de falla, mod reológico ángulo de fase RTFO.

Acov7 =

1.0435	0.0235	-0.2197	0.5280	-0.2002	-0.1807	0.4782	-0.0122	-0.2528	0.3190
0.0235	1.0435	-0.5877	0.1688	-0.2548	-0.1042	0.0396	-0.3318	-0.3505	0.3448
-0.2197	-0.5877	1.0435	-0.0413	0.5503	0.4560	-0.5455	0.4511	0.2555	-0.4869
0.5280	0.1688	-0.0413	1.0435	0.0423	0.0043	0.3228	0.1028	-0.2070	0.3054
-0.2002	-0.2548	0.5503	0.0423	1.0435	0.2537	-0.6897	0.7836	0.1127	-0.4904
-0.1807	-0.1042	0.4560	0.0043	0.2537	1.0435	-0.4506	-0.2286	0.0937	-0.1370
0.4782	0.0396	-0.5455	0.3228	-0.6897	-0.4506	1.0435	-0.4774	-0.0227	0.4906
-0.0122	-0.3318	0.4511	0.1028	0.7836	-0.2286	-0.4774	1.0435	0.1551	-0.5546
-0.2528	-0.3505	0.2555	-0.2070	0.1127	0.0937	-0.0227	0.1551	1.0435	-0.8226
0.3190	0.3448	-0.4869	0.3054	-0.4904	-0.1370	0.4906	-0.5546	-0.8226	1.0435

Amia7 =

-1.1784	-2.2907	1.9547	-0.9500	-0.1754	0.0487	0.0218	0.0363	0.4736	-0.2992
-0.7275	-1.2485	1.7292	0.1328	0.3104	0.7880	-0.1525	0.1034	0.6177	-0.6179
-0.4646	-0.7274	1.3748	0.1328	4.0347	-1.3891	-2.0690	4.1273	0.5379	-2.2112
1.2102	0.3148	0.1826	1.3360	-0.0135	-0.1137	-0.6751	1.3106	-3.4170	1.9315
1.6918	-0.5537	-0.2363	1.3360	-0.0945	0.1543	1.0672	-0.0978	0.2851	-0.0868
1.2556	-0.5537	-0.1718	1.9376	-0.3373	-0.1950	1.2414	0.2375	0.9724	0.2319
0.3955	-0.0326	1.0525	0.1328	-0.5802	-0.5930	1.2414	0.3717	1.1807	-0.7666
0.9644	-1.1616	-0.9129	-0.7695	-0.0945	0.3087	1.2414	-0.2990	0.1255	-0.0868
1.0578	-1.1616	1.9547	-1.0703	0.4723	1.4135	-1.8947	0.0363	0.3871	-0.9366
-0.6317	0.1411	-0.0752	-0.4687	0.0675	0.5686	0.0218	-1.3050	-1.6125	1.7191
-0.5346	0.2280	0.1504	0.1328	0.3104	0.9504	-0.6751	-0.5673	-0.5196	0.3381
-0.3331	0.1411	-0.5585	-1.6719	-0.0135	0.4874	-0.5009	0.3046	1.1608	-0.8303
0.2592	1.4439	-0.3007	-0.4687	0.3104	0.9667	-0.3267	-0.8355	-0.8831	0.4444
-1.3935	-1.0748	-0.3652	-1.0703	0.3104	-0.3087	-0.3267	-0.2319	0.1056	0.2319
-0.6587	0.8360	0.5048	0.7344	0.3913	1.1617	-0.3267	-0.2990	-0.1494	0.6568
-1.0580	0.1411	-0.2363	-0.4687	-0.6612	0.0406	-0.8494	0.0363	0.6820	-1.5739
-0.0370	1.1834	-0.7196	0.7344	-0.0135	0.3899	0.5445	-0.7685	-0.7457	1.2942
-1.5483	-0.2931	0.0537	-1.6719	-0.2564	0.0650	-0.8494	0.3046	1.0278	-0.9366
-1.1919	1.7045	0.1826	0.7344	0.7152	1.7790	-1.5463	-0.2319	0.8726	-1.2552
-0.8147	0.3148	-1.5896	-0.4687	-0.9850	-1.2998	1.0672	-0.4331	-0.0829	0.4444
0.9841	0.3148	-1.2674	1.3360	-0.9041	-1.2835	0.8929	-0.3661	-0.0740	1.0817
1.6918	-0.5537	-0.2363	1.3360	-0.0945	0.1543	1.0672	-0.0978	0.2851	-0.0868
0.0196	1.1834	-0.6229	0.1328	-1.3089	-1.9496	1.0672	-0.5673	-0.3666	0.4444
1.0418	1.7045	-1.8473	-1.0703	-1.3899	-2.1446	0.7187	-0.7685	-0.8632	0.8693

S7 =

Columns 1 through 7

3.929849734548438	0	0	0	0	0	0
0	1.738798075585158	0	0	0	0	0
0	0	1.543333152885349	0	0	0	0
0	0	0	1.245783156706630	0	0	0
0	0	0	0	0.888537481916560	0	0
0	0	0	0	0	0.483177848358734	0
0	0	0	0	0	0	0.311576479609339
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

Columns 8 through 10

0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0.158949555298060	0	0
0	0.080843196122552	0
0	0	0.053933927664840

Matriz Amia8

Temp falla PAV, con inflamación, viscosidad, perdida masa, Temp-falla orig, modulo reo original, ángulo fase asf orig, Temp falla, mod reolog, ángulo de fase RTFO.

Amia8 =

-1.2092	-2.2907	1.9547	-0.9500	-0.1754	0.0487	0.0218	0.0363	0.4736	-0.2992
-0.6806	-1.2485	1.7292	0.1328	0.3104	0.7880	-0.1525	0.1034	0.6177	-0.6179
1.4339	-0.7274	1.3748	0.1328	4.0347	-1.3891	-2.0690	4.1273	0.5379	-2.2112
1.2753	0.3148	0.1826	1.3360	-0.0135	-0.1137	-0.6751	1.3106	-3.4170	1.9315
0.1123	-0.5537	-0.2363	1.3360	-0.0945	0.1543	1.0672	-0.0978	0.2851	-0.0868
1.3810	-0.5537	-0.1718	1.9376	-0.3373	-0.1950	1.2414	0.2375	0.9724	0.2319
0.7467	-0.0326	1.0525	0.1328	-0.5802	-0.5930	1.2414	0.3717	1.1807	-0.7666
0.7467	-1.1616	-0.9129	-0.7695	-0.0945	0.3087	1.2414	-0.2990	0.1255	-0.0868
1.1696	-1.1616	1.9547	-1.0703	0.4723	1.4135	-1.8947	0.0363	0.3871	-0.9366
-0.6806	0.1411	-0.0752	-0.4687	0.0675	0.5686	0.0218	-1.3050	-1.6125	1.7191
-0.4163	0.2280	0.1504	0.1328	0.3104	0.9504	-0.6751	-0.5673	-0.5196	0.3381
-0.3106	0.1411	-0.5585	-1.6719	-0.0135	0.4874	-0.5009	0.3046	1.1608	-0.8303
0.4824	1.4439	-0.3007	-0.4687	0.3104	0.9667	-0.3267	-0.8355	-0.8831	0.4444
-1.6850	-1.0748	-0.3652	-1.0703	0.3104	-0.3087	-0.3267	-0.2319	0.1056	0.2319
-0.5220	0.8360	0.5048	0.7344	0.3913	1.1617	-0.3267	-0.2990	-0.1494	0.6568
-0.9978	0.1411	-0.2363	-0.4687	-0.6612	0.0406	-0.8494	0.0363	0.6820	-1.5739
0.1652	1.1834	-0.7196	0.7344	-0.0135	0.3899	0.5445	-0.7685	-0.7457	1.2942
-2.2136	-0.2931	0.0537	-1.6719	-0.2564	0.0650	-0.8494	0.3046	1.0278	-0.9366
-1.1035	1.7045	0.1826	0.7344	0.7152	1.7790	-1.5463	-0.2319	0.8726	-1.2552
-0.3106	0.3148	-1.5896	-0.4687	-0.9850	-1.2998	1.0672	-0.4331	-0.0829	0.4444
1.1167	0.3148	-1.2674	1.3360	-0.9041	-1.2835	0.8929	-0.3661	-0.0740	1.0817
0.1123	-0.5537	-0.2363	1.3360	-0.0945	0.1543	1.0672	-0.0978	0.2851	-0.0868
0.2181	1.1834	-0.6229	0.1328	-1.3089	-1.9496	1.0672	-0.5673	-0.3666	0.4444
1.1696	1.7045	-1.8473	-1.0703	-1.3899	-2.1446	0.7187	-0.7685	-0.8632	0.8693

Acov8 =

1.0435	0.1306	-0.0995	0.4379	0.1045	-0.3533	0.2213	0.3119	-0.2828	0.1955
0.1306	1.0435	-0.5877	0.1688	-0.2548	-0.1042	0.0396	-0.3318	-0.3505	0.3448
-0.0995	-0.5877	1.0435	-0.0413	0.5503	0.4560	-0.5455	0.4511	0.2555	-0.4869
0.4379	0.1688	-0.0413	1.0435	0.0423	0.0043	0.3228	0.1028	-0.2070	0.3054
0.1045	-0.2548	0.5503	0.0423	1.0435	0.2537	-0.6897	0.7836	0.1127	-0.4904
-0.3533	-0.1042	0.4560	0.0043	0.2537	1.0435	-0.4506	-0.2286	0.0937	-0.1370
0.2213	0.0396	-0.5455	0.3228	-0.6897	-0.4506	1.0435	-0.4774	-0.0227	0.4906
0.3119	-0.3318	0.4511	0.1028	0.7836	-0.2286	-0.4774	1.0435	0.1551	-0.5546
-0.2828	-0.3505	0.2555	-0.2070	0.1127	0.0937	-0.0227	0.1551	1.0435	-0.8226
0.1955	0.3448	-0.4869	0.3054	-0.4904	-0.1370	0.4906	-0.5546	-0.8226	1.0435

S8 =

Columns 1 through 7

3.800268338318983	0	0	0	0	0	0
0	1.998449928189227	0	0	0	0	0
0	0	1.529080511240737	0	0	0	0
0	0	0	1.135082741237258	0	0	0
0	0	0	0	0.885940087448964	0	0
0	0	0	0	0	0.473570768357609	0
0	0	0	0	0	0	0.309993682168049
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

Columns 8 through 10

0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0.161738239611647	0	0
0	0.085545597471179	0
0	0	0.055112714652011

Matriz Amia9

Temp falla PAV, con inflamación, viscosidad, perdida masa, Temp-falla orig, modulo reo original, ángulo fase asf orig.

Amia9 =

-1.2092	-2.2907	1.9547	-0.9500	-0.1754	0.0487	0.0218
-0.6806	-1.2485	1.7292	0.1328	0.3104	0.7880	-0.1525
1.4339	-0.7274	1.3748	0.1328	4.0347	-1.3891	-2.0690
1.2753	0.3148	0.1826	1.3360	-0.0135	-0.1137	-0.6751
0.1123	-0.5537	-0.2363	1.3360	-0.0945	0.1543	1.0672
1.3810	-0.5537	-0.1718	1.9376	-0.3373	-0.1950	1.2414
0.7467	-0.0326	1.0525	0.1328	-0.5802	-0.5930	1.2414
0.7467	-1.1616	-0.9129	-0.7695	-0.0945	0.3087	1.2414
1.1696	-1.1616	1.9547	-1.0703	0.4723	1.4135	-1.8947
-0.6806	0.1411	-0.0752	-0.4687	0.0675	0.5686	0.0218
-0.4163	0.2280	0.1504	0.1328	0.3104	0.9504	-0.6751
-0.3106	0.1411	-0.5585	-1.6719	-0.0135	0.4874	-0.5009
0.4824	1.4439	-0.3007	-0.4687	0.3104	0.9667	-0.3267
-1.6850	-1.0748	-0.3652	-1.0703	0.3104	-0.3087	-0.3267
-0.5220	0.8360	0.5048	0.7344	0.3913	1.1617	-0.3267
-0.9978	0.1411	-0.2363	-0.4687	-0.6612	0.0406	-0.8494
0.1652	1.1834	-0.7196	0.7344	-0.0135	0.3899	0.5445
-2.2136	-0.2931	0.0537	-1.6719	-0.2564	0.0650	-0.8494
-1.1035	1.7045	0.1826	0.7344	0.7152	1.7790	-1.5463
-0.3106	0.3148	-1.5896	-0.4687	-0.9850	-1.2998	1.0672
1.1167	0.3148	-1.2674	1.3360	-0.9041	-1.2835	0.8929
0.1123	-0.5537	-0.2363	1.3360	-0.0945	0.1543	1.0672
0.2181	1.1834	-0.6229	0.1328	-1.3089	-1.9496	1.0672
1.1696	1.7045	-1.8473	-1.0703	-1.3899	-2.1446	0.7187

Acov9 =

1.0435	0.1306	-0.0995	0.4379	0.1045	-0.3533	0.2213
0.1306	1.0435	-0.5877	0.1688	-0.2548	-0.1042	0.0396
-0.0995	-0.5877	1.0435	-0.0413	0.5503	0.4560	-0.5455
0.4379	0.1688	-0.0413	1.0435	0.0423	0.0043	0.3228
0.1045	-0.2548	0.5503	0.0423	1.0435	0.2537	-0.6897
-0.3533	-0.1042	0.4560	0.0043	0.2537	1.0435	-0.4506
0.2213	0.0396	-0.5455	0.3228	-0.6897	-0.4506	1.0435

Matriz Amia10

Modulo reolog PAV, con inflamación, viscosidad, perdida masa, Temp-falla orig, modulo reo original, ángulo fase asf orig.

Amia10 =

-1.1784	-2.2907	1.9547	-0.9500	-0.1754	0.0487	0.0218
-0.7275	-1.2485	1.7292	0.1328	0.3104	0.7880	-0.1525
-0.4646	-0.7274	1.3748	0.1328	4.0347	-1.3891	-2.0690
1.2102	0.3148	0.1826	1.3360	-0.0135	-0.1137	-0.6751
1.6918	-0.5537	-0.2363	1.3360	-0.0945	0.1543	1.0672
1.2556	-0.5537	-0.1718	1.9376	-0.3373	-0.1950	1.2414
0.3955	-0.0326	1.0525	0.1328	-0.5802	-0.5930	1.2414
0.9644	-1.1616	-0.9129	-0.7695	-0.0945	0.3087	1.2414
1.0578	-1.1616	1.9547	-1.0703	0.4723	1.4135	-1.8947
-0.6317	0.1411	-0.0752	-0.4687	0.0675	0.5686	0.0218
-0.5346	0.2280	0.1504	0.1328	0.3104	0.9504	-0.6751
-0.3331	0.1411	-0.5585	-1.6719	-0.0135	0.4874	-0.5009
0.2592	1.4439	-0.3007	-0.4687	0.3104	0.9667	-0.3267
-1.3935	-1.0748	-0.3652	-1.0703	0.3104	-0.3087	-0.3267
-0.6587	0.8360	0.5048	0.7344	0.3913	1.1617	-0.3267
-1.0580	0.1411	-0.2363	-0.4687	-0.6612	0.0406	-0.8494
-0.0370	1.1834	-0.7196	0.7344	-0.0135	0.3899	0.5445
-1.5483	-0.2931	0.0537	-1.6719	-0.2564	0.0650	-0.8494
-1.1919	1.7045	0.1826	0.7344	0.7152	1.7790	-1.5463
-0.8147	0.3148	-1.5896	-0.4687	-0.9850	-1.2998	1.0672
0.9841	0.3148	-1.2674	1.3360	-0.9041	-1.2835	0.8929
1.6918	-0.5537	-0.2363	1.3360	-0.0945	0.1543	1.0672
0.0196	1.1834	-0.6229	0.1328	-1.3089	-1.9496	1.0672
1.0418	1.7045	-1.8473	-1.0703	-1.3899	-2.1446	0.7187

Acov10 =

1.0435	0.0235	-0.2197	0.5280	-0.2002	-0.1807	0.4782
0.0235	1.0435	-0.5877	0.1688	-0.2548	-0.1042	0.0396
-0.2197	-0.5877	1.0435	-0.0413	0.5503	0.4560	-0.5455
0.5280	0.1688	-0.0413	1.0435	0.0423	0.0043	0.3228
-0.2002	-0.2548	0.5503	0.0423	1.0435	0.2537	-0.6897
-0.1807	-0.1042	0.4560	0.0043	0.2537	1.0435	-0.4506
0.4782	0.0396	-0.5455	0.3228	-0.6897	-0.4506	1.0435

S10 =

2.923366580602367	0	0	0	0	0	0
0	1.497106200573574	0	0	0	0	0
0	0	1.147288406666986	0	0	0	0
0	0	0	0.813181457272824	0	0	0
0	0	0	0	0.469840847981857	0	0
0	0	0	0	0	0.303672676293242	0
0	0	0	0	0	0	0.149891656696106

Matriz Amia11

Rigidez a -12°C PAV, con inflamación, viscosidad, perdida masa, Temp-falla orig, modulo reo original, ángulo fase asf orig.

Amia11 =

1.5004	-2.2907	1.9547	-0.9500	-0.1754	0.0487	0.0218
0.8779	-1.2485	1.7292	0.1328	0.3104	0.7880	-0.1525
0.6863	-0.7274	1.3748	0.1328	4.0347	-1.3891	-2.0690
-1.7557	0.3148	0.1826	1.3360	-0.0135	-0.1137	-0.6751
0.5427	-0.5537	-0.2363	1.3360	-0.0945	0.1543	1.0672
1.4046	-0.5537	-0.1718	1.9376	-0.3373	-0.1950	1.2414
-1.0854	-0.0326	1.0525	0.1328	-0.5802	-0.5930	-1.2414
-0.2713	-1.1616	-0.9129	-0.7695	-0.0945	0.3087	1.2414
-0.2713	-1.1616	1.9547	-1.0703	0.4723	1.4135	-1.8947
-0.9896	0.1411	-0.0752	-0.4687	0.0675	0.5686	0.0218
-0.6065	0.2280	0.1504	0.1328	0.3104	0.9504	-0.6751
-1.0854	0.1411	-0.5585	-1.6719	-0.0135	0.4874	-0.5009
0.4469	1.4439	-0.3007	-0.4687	0.3104	0.9667	-0.3267
-0.6544	-1.0748	-0.3652	-1.0703	0.3104	-0.3087	-0.3267
-0.7981	0.8360	0.5048	0.7344	0.3913	1.1617	-0.3267
-0.6544	0.1411	-0.2363	-0.4687	-0.6612	0.0406	-0.8494
0.2075	1.1834	-0.7196	0.7344	-0.0135	0.3899	0.5445
-0.5108	-0.2931	0.0537	-1.6719	-0.2564	0.0650	-0.8494
-1.8515	1.7045	0.1826	0.7344	0.7152	1.7790	-1.5463
0.3990	0.3148	-1.5896	-0.4687	-0.9850	-1.2998	1.0672
1.1652	0.3148	-1.2674	1.3360	-0.9041	-1.2835	0.8929
0.5427	-0.5537	-0.2363	1.3360	-0.0945	0.1543	1.0672
1.7398	1.1834	-0.6229	0.1328	-1.3089	-1.9496	1.0672
1.0215	1.7045	-1.8473	-1.0703	-1.3899	-2.1446	0.7187

Acov11 =

1.0435	-0.2003	-0.0870	0.1533	-0.1639	-0.5543	0.4643
-0.2003	1.0435	-0.5877	0.1688	-0.2548	-0.1042	0.0396
-0.0870	-0.5877	1.0435	-0.0413	0.5503	0.4560	-0.5455
0.1533	0.1688	-0.0413	1.0435	0.0423	0.0043	0.3228
-0.1639	-0.2548	0.5503	0.0423	1.0435	0.2537	-0.6897
-0.5543	-0.1042	0.4560	0.0043	0.2537	1.0435	-0.4506
0.4643	0.0396	-0.5455	0.3228	-0.6897	-0.4506	1.0435

Matriz Amia12

m (t) a -12°C PAV, con inflamación, viscosidad, perdida masa, Temp-falla orig, modulo reo original, ángulo fase asf orig.

Amia12 =

1.3537	-2.2907	1.9547	-0.9500	-0.1754	0.0487	0.0218
0.5120	-1.2485	1.7292	0.1328	0.3104	0.7880	-0.1525
-0.3297	-0.7274	1.3748	0.1328	4.0347	-1.3891	-2.0690
-1.1713	0.3148	0.1826	1.3360	-0.0135	-0.1137	-0.6751
0.5120	-0.5537	-0.2363	1.3360	-0.0945	0.1543	1.0672
-1.1713	-0.5537	-0.1718	1.9376	-0.3373	-0.1950	1.2414
-0.3297	-0.0326	1.0525	0.1328	-0.5802	-0.5930	1.2414
-1.6763	-1.1616	-0.9129	-0.7695	-0.0945	0.3087	1.2414
1.3537	-1.1616	1.9547	-1.0703	0.4723	1.4135	-1.8947
-1.1713	0.1411	-0.0752	-0.4687	0.0675	0.5686	0.0218
-1.1713	0.2280	0.1504	0.1328	0.3104	0.9504	-0.6751
-0.3297	0.1411	-0.5585	-1.6719	-0.0135	0.4874	-0.5009
-1.1713	1.4439	-0.3007	-0.4687	0.3104	0.9667	-0.3267
0.5120	-1.0748	-0.3652	-1.0703	0.3104	-0.3087	-0.3267
1.3537	0.8360	0.5048	0.7344	0.3913	1.1617	-0.3267
-1.1713	0.1411	-0.2363	-0.4687	-0.6612	0.0406	-0.8494
1.3537	1.1834	-0.7196	0.7344	-0.0135	0.3899	0.5445
-0.3297	-0.2931	0.0537	-1.6719	-0.2564	0.0650	-0.8494
-0.3297	1.7045	0.1826	0.7344	0.7152	1.7790	-1.5463
1.3537	0.3148	-1.5896	-0.4687	-0.9850	-1.2998	1.0672
0.5120	0.3148	-1.2674	1.3360	-0.9041	-1.2835	0.8929
0.5120	-0.5537	-0.2363	1.3360	-0.0945	0.1543	1.0672
-0.3297	1.1834	-0.6229	0.1328	-1.3089	-1.9496	1.0672
1.3537	1.7045	-1.8473	-1.0703	-1.3899	-2.1446	0.7187

Acov12 =

1.0435	-0.0659	0.0751	-0.0688	-0.1243	-0.1489	0.0764
-0.0659	1.0435	-0.5877	0.1688	-0.2548	-0.1042	0.0396
0.0751	-0.5877	1.0435	-0.0413	0.5503	0.4560	-0.5455
-0.0688	0.1688	-0.0413	1.0435	0.0423	0.0043	0.3228
-0.1243	-0.2548	0.5503	0.0423	1.0435	0.2537	-0.6897
-0.1489	-0.1042	0.4560	0.0043	0.2537	1.0435	-0.4506
0.0764	0.0396	-0.5455	0.3228	-0.6897	-0.4506	1.0435

Matriz Amia13

Temp falla PAV, con Temp-falla RTFO, modulo reolog RTFO, ángulo fase RTFO.

Amia13 =

-1.2092	0.0363	0.4736	-0.2992
-0.6806	0.1034	0.6177	-0.6179
1.4339	4.1273	0.5379	-2.2112
1.2753	1.3106	-3.4170	1.9315
0.1123	-0.0978	0.2851	-0.0868
1.3810	0.2375	0.9724	0.2319
0.7467	0.3717	1.1807	-0.7666
0.7467	-0.2990	0.1255	-0.0868
1.1696	0.0363	0.3871	-0.9366
-0.6806	-1.3050	-1.6125	1.7191
-0.4163	-0.5673	-0.5196	0.3381
-0.3106	0.3046	1.1608	-0.8303
0.4824	-0.8355	-0.8831	0.4444
-1.6850	-0.2319	0.1056	0.2319
-0.5220	-0.2990	-0.1494	0.6568
-0.9978	0.0363	0.6820	-1.5739
0.1652	-0.7685	-0.7457	1.2942
-2.2136	0.3046	1.0278	-0.9366
-1.1035	-0.2319	0.8726	-1.2552
-0.3106	-0.4331	-0.0829	0.4444
1.1167	-0.3661	-0.0740	1.0817
0.1123	-0.0978	0.2851	-0.0868
0.2181	-0.5673	-0.3666	0.4444
1.1696	-0.7685	-0.8632	0.8693

Acov13 =

1.0435	0.3119	-0.2828	0.1955
0.3119	1.0435	0.1551	-0.5546
-0.2828	0.1551	1.0435	-0.8226
0.1955	-0.5546	-0.8226	1.0435

S13 =

2.139391909165237	0	0	0
0	1.387193545937225	0	0
0	0	0.538068042662425	0
0	0	0	0.109259545713388

Matriz Amia14

Mod Reolog PAV, con Temp-falla RTFO, modulo reolog RTFO, ángulo fase RTFO.

Amia14 =

-1.1784	0.0363	0.4736	-0.2992
-0.7275	0.1034	0.6177	-0.6179
-0.4646	4.1273	0.5379	-2.2112
1.2102	1.3106	-3.4170	1.9315
1.6918	-0.0978	0.2851	-0.0868
1.2556	0.2375	0.9724	0.2319
0.3955	0.3717	1.1807	-0.7666
0.9644	-0.2990	0.1255	-0.0868
1.0578	0.0363	0.3871	-0.9366
-0.6317	-1.3050	-1.6125	1.7191
-0.5346	-0.5673	-0.5196	0.3381
-0.3331	0.3046	1.1608	-0.8303
0.2592	-0.8355	-0.8831	0.4444
-1.3935	-0.2319	0.1056	0.2319
-0.6587	-0.2990	-0.1494	0.6568
-1.0580	0.0363	0.6820	-1.5739
-0.0370	-0.7685	-0.7457	1.2942
-1.5483	0.3046	1.0278	-0.9366
-1.1919	-0.2319	0.8726	-1.2552
-0.8147	-0.4331	-0.0829	0.4444
0.9841	-0.3661	-0.0740	1.0817
1.6918	-0.0978	0.2851	-0.0868
0.0196	-0.5673	-0.3666	0.4444
1.0418	-0.7685	-0.8632	0.8693

Acov14 =

1.0435	-0.0122	-0.2528	0.3190
-0.0122	1.0435	0.1551	-0.5546
-0.2528	0.1551	1.0435	-0.8226
0.3190	-0.5546	-0.8226	1.0435

S14 =

2.229373843922259	0	0	0
0	1.058743882629184	0	0
0	0	0.774563695952723	0
0	0	0	0.111231620974111

Matriz Amia15

Rigidez a -12°C PAV, con Temp-falla RTFO, modulo reolog RTFO, ángulo fase RTFO.

Amia15 =

1.5004	0.0363	0.4736	-0.2992
0.8779	0.1034	0.6177	-0.6179
0.6863	4.1273	0.5379	-2.2112
-1.7557	1.3106	-3.4170	1.9315
0.5427	-0.0978	0.2851	-0.0868
1.4046	0.2375	0.9724	0.2319
-1.0854	0.3717	1.1807	-0.7666
-0.2713	-0.2990	0.1255	-0.0868
-0.2713	0.0363	0.3871	-0.9366
-0.9896	-1.3050	-1.6125	1.7191
-0.6065	-0.5673	-0.5196	0.3381
-1.0854	0.3046	1.1608	-0.8303
0.4469	-0.8355	-0.8831	0.4444
-0.6544	-0.2319	0.1056	0.2319
-0.7981	-0.2990	-0.1494	0.6568
-0.6544	0.0363	0.6820	-1.5739
0.2075	-0.7685	-0.7457	1.2942
-0.5108	0.3046	1.0278	-0.9366
-1.8515	-0.2319	0.8726	-1.2552
0.3990	-0.4331	-0.0829	0.4444
1.1652	-0.3661	-0.0740	1.0817
0.5427	-0.0978	0.2851	-0.0868
1.7398	-0.5673	-0.3666	0.4444
1.0215	-0.7685	-0.8632	0.8693

Acov15 =

1.0435	-0.0168	0.1653	0.0504
-0.0168	1.0435	0.1551	-0.5546
0.1653	0.1551	1.0435	-0.8226
0.0504	-0.5546	-0.8226	1.0435

s15 =

2.114415046374982	0	0	0
0	1.107420124152706	0	0
0	0	0.851337882585935	0
0	0	0	0.100739990364653

Matriz Amia16

m (t) a -12°C PAV, con Temp-falla RTFO, modulo reolog RTFO, ángulo fase RTFO.

Amia16 =			
1.3537	0.0363	0.4736	-0.2992
0.5120	0.1034	0.6177	-0.6179
-0.3297	4.1273	0.5379	-2.2112
-1.1713	1.3106	-3.4170	1.9315
0.5120	-0.0978	0.2851	-0.0868
-1.1713	0.2375	0.9724	0.2319
-0.3297	0.3717	1.1807	-0.7666
-1.6763	-0.2990	0.1255	-0.0868
1.3537	0.0363	0.3871	-0.9366
-1.1713	-1.3050	-1.6125	1.7191
-1.1713	-0.5673	-0.5196	0.3381
-0.3297	0.3046	1.1608	-0.8303
-1.1713	-0.8355	-0.8831	0.4444
0.5120	-0.2319	0.1056	0.2319
1.3537	-0.2990	-0.1494	0.6568
-1.1713	0.0363	0.6820	-1.5739
1.3537	-0.7685	-0.7457	1.2942
-0.3297	0.3046	1.0278	-0.9366
-0.3297	-0.2319	0.8726	-1.2552
1.3537	-0.4331	-0.0829	0.4444
0.5120	-0.3661	-0.0740	1.0817
0.5120	-0.0978	0.2851	-0.0868
-0.3297	-0.5673	-0.3666	0.4444
1.3537	-0.7685	-0.8632	0.8693

Acov16 =

1.0435	-0.1274	0.1404	0.0596
-0.1274	1.0435	0.1551	-0.5546
0.1404	0.1551	1.0435	-0.8226
0.0596	-0.5546	-0.8226	1.0435

S16 =

2.111680146679536	0	0	0
0	1.169754357106744	0	0
0	0	0.781617456072831	0
0	0	0	0.110861083619167

Matriz Amia17

Rigidez a -12°C y m(t)a -12°C PAV, con Pérdida de masa y temp falla Asf Orig.

Amia17 =

1.5004	1.3537	-0.9500	-0.1754
0.8779	0.5120	0.1328	0.3104
0.6863	-0.3297	0.1328	4.0347
-1.7557	-1.1713	1.3360	-0.0135
0.5427	0.5120	1.3360	-0.0945
1.4046	-1.1713	1.9376	-0.3373
-1.0854	-0.3297	0.1328	-0.5802
-0.2713	-1.6763	-0.7695	-0.0945
-0.2713	1.3537	-1.0703	0.4723
-0.9896	-1.1713	-0.4687	0.0675
-0.6065	-1.1713	0.1328	0.3104
-1.0854	-0.3297	-1.6719	-0.0135
0.4469	-1.1713	-0.4687	0.3104
-0.6544	0.5120	-1.0703	0.3104
-0.7981	1.3537	0.7344	0.3913
-0.6544	-1.1713	-0.4687	-0.6612
0.2075	1.3537	0.7344	-0.0135
-0.5108	-0.3297	-1.6719	-0.2564
-1.8515	-0.3297	0.7344	0.7152
0.3990	1.3537	-0.4687	-0.9850
1.1652	0.5120	1.3360	-0.9041
0.5427	0.5120	1.3360	-0.0945
1.7398	-0.3297	0.1328	-1.3089
1.0215	1.3537	-1.0703	-1.3899

Acov17 =

1.0435	0.3360	0.1533	-0.1639
0.3360	1.0435	-0.0688	-0.1243
0.1533	-0.0688	1.0435	0.0423
-0.1639	-0.1243	0.0423	1.0435

S17 =

1.479508077914402	0	0	0
0	1.116649895228195	0	0
0	0	0.939507385394554	0
0	0	0	0.638247684941105

Matriz Amia18

Rigidez a -12°C y m(t)a -12°C PAV, con Pérdida de masa y temp falla Asf Orig.

Amia18 =

-1.2092	-1.1784	-0.9500	-0.1754
-0.6806	-0.7275	0.1328	0.3104
1.4339	-0.4646	0.1328	4.0347
1.2753	1.2102	1.3360	-0.0135
0.1123	1.6918	1.3360	-0.0945
1.3810	1.2556	1.9376	-0.3373
0.7467	0.3955	0.1328	-0.5802
0.7467	0.9644	-0.7695	-0.0945
1.1696	1.0578	-1.0703	0.4723
-0.6806	-0.6317	-0.4687	0.0675
-0.4163	-0.5346	0.1328	0.3104
-0.3106	-0.3331	-1.6719	-0.0135
0.4824	0.2592	-0.4687	0.3104
-1.6850	-1.3935	-1.0703	0.3104
-0.5220	-0.6587	0.7344	0.3913
-0.9978	-1.0580	-0.4687	-0.6612
0.1652	-0.0370	0.7344	-0.0135
-2.2136	-1.5483	-1.6719	-0.2564
-1.1035	-1.1919	0.7344	0.7152
-0.3106	-0.8147	-0.4687	-0.9850
1.1167	0.9841	1.3360	-0.9041
0.1123	1.6918	1.3360	-0.0945
0.2181	0.0196	0.1328	-1.3089
1.1696	1.0418	-1.0703	-1.3899

Acov18 =

1.0435	0.8306	0.4379	0.1045
0.8306	1.0435	0.5280	-0.2002
0.4379	0.5280	1.0435	0.0423
0.1045	-0.2002	0.0423	1.0435

S18 =

2.260043451708238	0	0	0
0	1.101231944270068	0	0
0	0	0.662337114108595	0
0	0	0	0.150300533391356

Matriz Amia19

Rigidez a -12°C y m(t)a -12°C PAV, con Pérdida de masa y temp falla Asf Orig.

Amia19 =

-1.2092	-0.9500
-0.6806	0.1328
1.4339	0.1328
1.2753	1.3360
0.1123	1.3360
1.3810	1.9376
0.7467	0.1328
0.7467	-0.7695
1.1696	-1.0703
-0.6806	-0.4687
-0.4163	0.1328
-0.3106	-1.6719
0.4824	-0.4687
-1.6850	-1.0703
-0.5220	0.7344
-0.9978	-0.4687
0.1652	0.7344
-2.2136	-1.6719
-1.1035	0.7344
-0.3106	-0.4687
1.1167	1.3360
0.1123	1.3360
0.2181	0.1328
1.1696	-1.0703

Acov19 =

1.0435	0.4379
0.4379	1.0435

S19 =

1.481403701185584	0
0	0.605552820553541

Matriz Amia20

Temp falla PAV, con inflamación, viscosidad, Pérdida de masa, temp falla, modulo reológico, Ángulo de fase, Asf Orig, y Temp falla RTFO.

Amia20 =

-1.2092	-2.2907	1.9547	-0.9500	-0.1754	0.0487	0.0218	0.0363
-0.6806	-1.2485	1.7292	0.1328	0.3104	0.7880	-0.1525	0.1034
1.4339	-0.7274	1.3748	0.1328	4.0347	-1.3891	-2.0690	4.1273
1.2753	0.3148	0.1826	1.3360	-0.0135	-0.1137	-0.6751	1.3106
0.1123	-0.5537	-0.2363	1.3360	-0.0945	0.1543	1.0672	-0.0978
1.3810	-0.5537	-0.1718	1.9376	-0.3373	-0.1950	1.2414	0.2375
0.7467	-0.0326	1.0525	0.1328	-0.5802	-0.5930	1.2414	0.3717
0.7467	-1.1616	-0.9129	-0.7695	-0.0945	0.3087	1.2414	-0.2990
1.1696	-1.1616	1.9547	-1.0703	0.4723	1.4135	-1.8947	0.0363
-0.6806	0.1411	-0.0752	-0.4687	0.0675	0.5686	0.0218	-1.3050
-0.4163	0.2280	0.1504	0.1328	0.3104	0.9504	-0.6751	-0.5673
-0.3106	0.1411	-0.5585	-1.6719	-0.0135	0.4874	-0.5009	0.3046
0.4824	1.4439	-0.3007	-0.4687	0.3104	0.9667	-0.3267	-0.8355
-1.6850	-1.0748	-0.3652	-1.0703	0.3104	-0.3087	-0.3267	-0.2319
-0.5220	0.8360	0.5048	0.7344	0.3913	1.1617	-0.3267	-0.2990
-0.9978	0.1411	-0.2363	-0.4687	-0.6612	0.0406	-0.8494	0.0363
0.1652	1.1834	-0.7196	0.7344	-0.0135	0.3899	0.5445	-0.7685
-2.2136	-0.2931	0.0537	-1.6719	-0.2564	0.0650	-0.8494	0.3046
-1.1035	1.7045	0.1826	0.7344	0.7152	1.7790	-1.5463	-0.2319
-0.3106	0.3148	-1.5896	-0.4687	-0.9850	-1.2998	1.0672	-0.4331
1.1167	0.3148	-1.2674	1.3360	-0.9041	-1.2835	0.8929	-0.3661
0.1123	-0.5537	-0.2363	1.3360	-0.0945	0.1543	1.0672	-0.0978
0.2181	1.1834	-0.6229	0.1328	-1.3089	-1.9496	1.0672	-0.5673
1.1696	1.7045	-1.8473	-1.0703	-1.3899	-2.1446	0.7187	-0.7685

Acov20 =

1.0435	0.1306	-0.0995	0.4379	0.1045	-0.3533	0.2213	0.3119
0.1306	1.0435	-0.5877	0.1688	-0.2548	-0.1042	0.0396	-0.3318
-0.0995	-0.5877	1.0435	-0.0413	0.5503	0.4560	-0.5455	0.4511
0.4379	0.1688	-0.0413	1.0435	0.0423	0.0043	0.3228	0.1028
0.1045	-0.2548	0.5503	0.0423	1.0435	0.2537	-0.6897	0.7836
-0.3533	-0.1042	0.4560	0.0043	0.2537	1.0435	-0.4506	-0.2286
0.2213	0.0396	-0.5455	0.3228	-0.6897	-0.4506	1.0435	-0.4774
0.3119	-0.3318	0.4511	0.1028	0.7836	-0.2286	-0.4774	1.0435

S20 =

Columns 1 through 7

3.122161752172598							
0	1.919002031909874						
0	0	1.172452361769087					
0	0	0	1.095095576831788				
0	0	0	0				
0	0	0	0				
0	0	0	0				
0	0	0	0				
0.489396112147006							
0	0.306019036760582						
0	0	0.154307930379128					
0	0	0	0.089391284986452				

Matriz Amia21

Temp falla, Mod Reolog, Rigidez, m(t) PAV, con inflamación, viscosidad, Pérdida de masa, temp falla, modulo reológico, Ángulo de fase, Asf Orig, y Temp falla RTFO.

Amia21 =

Columns 1 through 7

-1.209218834952838	-1.178427449608583	1.500355561535713	1.353694503198329	-2.290728367026270	1.954730487040066	-0.949976133671379
-0.680598579235751	-0.727493876919714	0.877867615792172	0.512019164422165	-1.248501242692043	1.729184661612365	0.132846266713940
1.433882443632599	-0.464551684670618	0.686332863255698	-0.329656174353998	-0.727387680524929	1.374755507368837	0.132846266713940
1.275296366917472	1.210168913626192	-1.755735231584345	-1.171331513130162	0.314839443809298	0.182584715822423	1.335982267142071
0.112331804339880	1.691820032138554	0.542681798853343	0.512019164422165	-0.553683159802558	-0.236286102829020	1.335982267142071
1.381020418060889	1.255630881444961	1.404588185267476	-1.171331513130162	-0.553683159802558	-0.171844438421105	1.937550267356138
0.746676111200385	0.395539598387171	-1.085363597706686	-0.329656174353998	-0.032569597635445	1.052547185329265	0.132846266713940
0.746676111200385	0.964428547038252	-0.271340899426672	-1.676336716395860	-1.161648982330857	-0.912923579112120	-0.769505733607159
1.169572315774055	1.057809886341669	-0.271340899426672	1.353694503198329	-1.161648982330857	1.954730487040066	-1.070289733714192
-0.680598579235751	-0.631655133950417	-0.989596221438449	-1.171331513130162	0.141134923086927	-0.075181941809234	-0.468721733500126
-0.416288451377207	-0.534587689148181	-0.606526716365501	-1.171331513130162	0.227987183448112	0.150363883618466	0.132846266713940
-0.310564400233790	-0.333080588546070	-1.085363597706686	-0.329656174353998	0.141134923086927	-0.558494424868591	-1.671857733928258
0.482365983341841	0.259153694930865	0.446914422585106	-1.171331513130162	1.443918828504710	-0.300727767236934	-0.468721733500126
-1.684977065098218	-1.393450270373031	-0.654410404499620	0.512019164422165	-1.074796721969672	-0.365169431644848	-1.070289733714192
-0.522012502520624	-0.658686574275091	-0.798061468901975	1.353694503198329	0.835953005976411	0.504793037861995	0.734414266928006
-0.997770732666004	-1.058014669980493	-0.654410404499620	-1.171331513130162	0.141134923086927	-0.236286102829020	-0.468721733500126
0.165193829911588	-0.036963446807603	0.207495981914513	1.353694503198329	1.183362047421154	-0.719598585888377	0.734414266928006
-2.213597320815306	-1.548266701323433	-0.510759340097264	-0.329656174353998	-0.293126378719001	0.053701387006595	-1.671857733928258
-1.103494783809421	-1.191943169770920	-1.851502607852582	-0.329656174353998	1.704475609588267	0.182584715822423	0.734414266928006
-0.310564400233790	-0.814731707058432	0.399030734450987	1.353694503198329	0.314839443809298	-1.589561055395219	-0.468721733500126
1.116710290202346	0.984087776365287	1.165169744596883	0.512019164422165	0.314839443809298	-1.267352733355647	1.335982267142071
0.112331804339880	1.691820032138554	0.542681798853343	0.512019164422165	-0.553683159802558	-0.236286102829020	1.335982267142071
0.218055855483297	0.019556837507623	1.739774002206305	-0.329656174353998	1.183362047421154	-0.622936089276506	0.132846266713940
1.169572315774055	1.041836762513453	1.021518680194528	1.353694503198329	1.704475609588267	-1.847327713026876	-1.070289733714192

Columns 8 through 13

-0.175419588548753	0.048740903974627	0.021778620259224	0.036327165845652	0.473569730770207	-0.299200348072823
0.310357733586247	0.787977947589861	-0.152450341814517	0.103392702791476	0.617663504907428	-0.617875275014320
4.034650536621278	-1.389115763276983	-2.068968924625786	4.127324919541118	0.537857722308353	-2.211249909721746
-0.013493814503761	-0.113728775940809	-0.675137228035763	1.310572367816366	-3.416962170934723	1.931524140517567
-0.094456701526257	0.154346195919662	1.067152392701741	-0.097803908046005	0.285139410744613	-0.086750396778512
-0.337345362593757	-0.194963615898527	1.241381354775482	0.237523776683132	0.972355872014431	0.231924530162985
-0.580234023661257	-0.593014331691345	1.241381354775482	0.371654850574789	1.180737637689795	-0.766590240920348
-0.094456701526257	0.308692391839325	1.241381354775482	-0.299000518883485	0.125527845546462	-0.086750396778512
0.472283507631251	1.413486215264292	-1.894739962552021	0.036327165845652	0.387113466287876	-0.936550201955803
0.067469072518747	0.568643879704023	0.021778620259224	-1.304983573070895	-1.612464753277848	1.719074189223240
0.310357733586247	0.950447627505297	-0.675137228035763	-0.567262666666798	-0.519568897129398	0.338149505810141
-0.013493814503761	0.487409039746305	-0.500908265962023	0.304589313628956	1.160786192040026	-0.830325226308632
0.310357733586247	0.966694595496841	-0.326679303888282	-0.835524814450111	-0.883128573414076	0.444374481457297
0.310357733586247	-0.308692391839332	-0.326679303888282	-0.231934981937661	0.105576399896694	0.231924530162985
0.391320620608743	1.161658211395365	-0.326679303888282	-0.299000518883485	-0.149358738961465	0.656824432751623
-0.661196910683765	0.040617419978856	-0.849366190109528	0.036327165845652	0.681951496445572	-1.573900055838767
-0.013493814503761	0.389927231797043	0.544465506480470	-0.768459277504278	-0.745685281160112	1.294174286634602
-0.256382475571261	0.064987871966171	-0.849366190109528	0.304589313628956	1.027776554374899	-0.936550201955803
0.715172168698751	1.779042995074022	-1.546282038404515	-0.231934981937661	0.872598643765586	-1.255225128897285
-0.985048458773761	-1.299757439323492	1.067152392701741	-0.433131592775141	-0.082853920128901	0.444374481457297
-0.904085571751265	-1.283510471331948	0.892923430627976	-0.366066055829318	-0.073986610951226	1.081724335340276
-0.094456701526257	0.154346195919662	1.067152392701741	-0.097803908046005	0.285139410744613	-0.086750396778512
-1.308900006863769	-1.949636158985237	1.067152392701741	-0.567262666666798	-0.366607813814503	0.444374481457297
-1.389862893886265	-2.144599774883760	0.718694468554235	-0.768459277504278	-0.863177127764307	0.869274384045949

Acov21 =

Columns 1 through 7

1.043478260869565	0.830591336766279	0.290210878470426	-0.085551653635768	0.130574339532462	-0.099529537597367	0.437925440316021
0.830591336766279	1.043478260869565	0.271217229681230	-0.035691536837670	0.023501775910180	-0.219669431588114	0.527980971732027
0.290210878470426	0.271217229681230	1.043478260869565	0.335971147498041	-0.200345985050310	-0.086958732167379	0.153336009780982
-0.085551653635768	-0.035691536837670	0.335971147498041	1.043478260869566	-0.065870723146313	0.075069864542534	-0.068775805759553
0.130574339532462	0.023501775910180	-0.200345985050310	-0.065870723146313	1.043478260869565	-0.587674942602753	0.168753876991448
-0.099529537597367	-0.219669431588114	-0.086958732167379	0.075069864542534	-0.587674942602753	1.043478260869565	-0.041322354731913
0.437925440316021	0.527980971732027	0.153336009780982	-0.068775805759553	0.168753876991448	-0.041322354731913	1.043478260869560
0.104484462070704	-0.200170988808443	-0.163949379188329	-0.124338959263718	-0.254826670478991	0.550282698574081	0.042316604176218
-0.353303779198267	-0.180714758651965	-0.554333707812137	-0.148875562652493	-0.104174949919574	0.456017413652968	0.004291909828112
0.221292574707107	0.478181717755072	0.464290798406713	0.076350632287807	0.039557490129843	-0.545515122166397	0.322805157892688
0.311883033849436	-0.012152433410370	-0.016801386047735	-0.127395256423067	-0.331791632732677	0.451097251754890	0.102841882492751
-0.282830276087696	-0.252787023890290	0.165293803474476	0.140366593183636	-0.350494839194043	0.255529084197612	-0.207034934947951
0.195521168716681	0.318979867874655	0.050363163356236	0.059565755659240	0.344827264790685	-0.486870494592655	0.305416976878458

Apéndice D. Interfaz de Matlab. (Script)

```

Sandra2.m x Sandra3.m x Sandra4.m x Sandra5.m x Sandra6.m x Sandra7.m x Sandra8.m x Sandra9.m x Sandra10.m x Sandra11.m x Sa
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Propuesta de Modelo Predictivo para Asfalto de la GRB %
%Programa Análisis de Datos Normalizados COV y SVD %
%Estudiante: Sandra Barrera %
% %
%Escuela de Ingeniería Química %
%Universidad Industrial de Santander %
%Julio 22, 2022 %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc
format long
A1 = xlsread('Datos2022.xlsx');
Anormal = A1(:,2:14);
AA1 = Anormal(:,11); % Esta variable es de interés y se llama Mod Reolog PAV %
AA2 = Anormal(:,2:7); % Variables de estudio Asf orig VS Temp falla RTFO %
Amia = [AA1 AA2];
Acov = cov(Amia);
[U,S,V] = svd(Acov);

AA3 = Anormal(:,11); %Esta variable es de interés,Mod Reolog PAV %
AA4 = Anormal(:,2:3); %Variable de estudio, viscosidad y pérdida de masa ASF Original%
Amia2 = [AA3 AA4];
Acov2 = cov(Amia2);
[U2,S2,V2] = svd(Acov2);

AA5 = Anormal(:,13); % Esta variable es de interés, mt a-12°C PAV%
AA6 = Anormal(:,2:6); % Variables de estudio, viscosidad, pérdida masa, Temp-falla orig, Mod reolog y ángulo de fase orig%
Amia3 = [AA5 AA6];

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Propuesta de Modelo Predictivo para Asfalto de la GRB %
%Regresión de datos SVD y cálculo de betas %
%Correlación Asf Original, RTFO VS Temp falla asf PAV %
%Estudiante: Sandra Barrera %
% %
%Escuela de Ingeniería Química %
%Universidad Industrial de Santander %
%Julio 22, 2022 %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

clc
XA = xlsread('Datos2022 sin normalizar');
X = XA(:,1:9);
Y = XA(:,10);
[U, S, V] = svd(X);
S_inv = zeros(size(S'));
S_inv(1:9,1:9)= inv(S(1:9,1:9));
Beta = V*S_inv*U'*Y;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Propuesta de Modelo Predictivo para Asfalto de la GRB %
%Regresión de datos SVD y cálculo de betas %
%Correlación Asf Original, RTFO VS Mod Reolog asf PAV %
%Estudiante: Sandra Barrera %
% %
%Escuela de Ingeniería Química %
%Universidad Industrial de Santander %
%Julio 22, 2022 %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

clc
XA = xlsread('Datos2022 sin normalizar');
X = XA(:,1:9);
Y2 = XA(:,11);
[U2, S2, V2] = svd(X);
S2_inv = zeros(size(S2'));
S2_inv(1:9,1:9)= inv(S2(1:9,1:9));
Beta2 = V2*S2_inv*U2'*Y2;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Propuesta de Modelo Predictivo para Asfalto de la GRB %
%Regresión de datos SVD y cálculo de betas %
%Correlación Asfalto Original,RTFO VS 4propiedades PAV %
%Estudiante: Sandra Barrera %
% %
%Escuela de Ingeniería Química %
%Universidad Industrial de Santander %
%Julio 22, 2022 %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc
XA = xlsread('Datos2022 sin normalizar');
X = XA(:,1:9);
Y5 = XA(:,10:13);
[U5, S5, V5] = svd(X);
S5_inv = zeros(size(S5'));
S5_inv(1:9,1:9)= inv(S5(1:9,1:9));
Beta5 = V5*S5_inv*U5'*Y5;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Propuesta de Modelo Predictivo para Asfalto de la GRB %
%Regresión de datos SVD y cálculo de betas %
%Correlación Asfalto Original VS m(t) a -12°C asf PAV %
%Estudiante: Sandra Barrera %
% %
%Escuela de Ingeniería Química %
%Universidad Industrial de Santander %
%Julio 22, 2022 %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc
XA = xlsread('Datos2022 sin normalizar');
XORIG = XA(:,1:6);
Y4 = XA(:,13);
[U10, S10, V10] = svd(X);
S10_inv = zeros(size(S10'));
S10_inv(1:6,1:6)= inv(S10(1:6,1:6));
Beta10 = V10*S10_inv*U10'*Y4;

```