

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería de Biosistemas

CINÉTICA DE LA DESGASIFICACIÓN DEL CAFÉ TOSTADO

Proyecto Final de Graduación presentado a la Facultad de Ingeniería como requisito para
optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.

Daniel Arturo Murillo Jiménez

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

2020

HOJA DE APROBACION

Este trabajo fue sometido a revisión por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación, de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas, de la Universidad de Costa Rica como requisito para optar por el grado de Licenciatura de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.



Ing. Daniel Arturo Murillo Jiménez, Bach.
Candidato



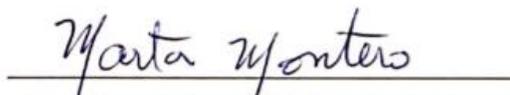
Ing. Guillermo Vargas Elías, D.Sc.
Director Comité Asesor



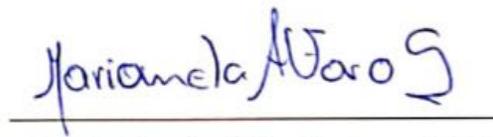
Ing. Giovanni Carmona Villalobos, Lic.
Miembro Comité Asesor



Ing. Juan Roberto Mora Chaves, Lic.
Miembro Comité Asesor



Ing. Marta Montero Calderón, Ph.D.
Presidente Tribunal Examinador



Ing. Marianela Alfaro Santamaría, Ph.D.
Miembro Tribunal Examinador

INDICE GENERAL

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Resumen.....	iv
1. Introducción.....	1
1.1 Objetivo General.....	4
1.2 Objetivos Específicos.....	4
2. Marco Teórico.....	5
2.1 Proceso de tostado.....	5
2.2 Difusión.....	6
3. Delimitación del problema.....	8
4. Metodología.....	9
4.1 Biomasa.....	9
4.2 Proceso de tueste.....	9
4.3 Propiedades físicas del café tostado.....	10
4.3.1 Cambio de color.....	10
4.3.2 Cambio del volumen de los granos.....	10
4.3.3 Cambio en volumen de poros.....	11
4.3.4 Cambio en el Contenido de humedad.....	12
4.4 Medición del dióxido de carbono.....	13
4.5 Ajuste de los modelo matemáticos.....	13
4.5.1 Criterio de información de Akaike.....	16
4.5.2 Energía de Activación.....	17

4.6 Efecto de la temperatura de almacenamiento y grado de tueste en la cinética del CO ₂	18
4.7 Efecto granulometría, en el fenómeno de difusión del CO ₂ en el aire.....	19
4.8 Desarrollo del Prototipo para medir las propiedades del aire en equilibrio.....	20
4.8.1 Validación del prototipo.....	23
5. Resultados y Discusión.....	27
5.1 Proceso de torrefacción para la obtención de los granos tostados.....	27
5.2 Caracterización de las propiedades físicas del café tostado.....	28
5.3 Análisis estadísticos de cada ajuste matemático.....	31
5.3.1 Energía de Activación.....	41
5.3.2 Cinética de la concentración del CO ₂ en el aire enfocado en Ajuste 1.....	42
5.4 Efecto de la temperatura de almacenamiento en el fenómeno de difusión del CO ₂ en el aire.....	47
5.5.1 Análisis para tueste moderadamente oscuro.....	57
5.5.2 Análisis para tueste claro.....	61
5.5 Efecto del nivel de tueste en la cinética de la desgasificación del CO ₂	64
5.6 Efecto de la granulometría en el fenómeno de difusión del CO ₂ en el aire.....	67
5.7 Desarrollo y validación de un prototipo microcontrolado para medir CO ₂ y otras propiedades en el aire.....	71
Conclusiones.....	78
Recomendaciones.....	81
Bibliografía.....	82

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Escala Agtron de color.....	10
Figura 2. Diagrama de conexión prototipo microcontrolado con Arduino-UNO.....	22
Figura 3. Diagrama de conexión Sistema de medición.....	26
Figura 4. Cinética de la liberación del dióxido de carbono con el almacenamiento a 25°C de los granos de café con tueste medio.....	43
Figura 5. Análisis de los residuos para el ajuste de la cinética del dióxido de carbono a 25°C.....	45
Figura 6. Cinética de la liberación del dióxido de carbono con el almacenamiento a 25°C de los granos de café con tueste medio.....	46
Figura 7. Condiciones internas del aire durante el almacenamiento para los granos de café.....	47
Figura 8. Cinética de la concentración de CO ₂ en el aire para el grano con tueste medio....	50
Figura 9. Relación entre la rapidez del proceso con la temperatura de almacenamiento.....	52
Figura 10. Concentración final de CO ₂ en función con la temperatura del café tostado.....	54
Figura 11. Gráfica de Arrhenius $\ln(C_e)$ vs T^{-1} , para tueste medio.....	55
Figura 12. Ajuste del exponente (n) del <i>Ajuste I</i> en función con la temperatura.....	56
Figura 13. Temperatura interna del aire durante el almacenamiento de los granos de café con tueste moderadamente oscuro.....	58
Figura 14. Cinética de la concentración de CO ₂ en el aire con el grano moderadamente oscuro.....	59
Figura 15. Relación entre la concentración del CO ₂ con la temperatura café tueste moderadamente oscuro.....	60
Figura 16. Temperatura interna del aire durante el almacenamiento del café con tueste claro.....	61
Figura 17. Cinética de la concentración de CO ₂ en el aire para el grano con Tueste Claro.....	62

Figura 18. Concentración de equilibrio del CO ₂ con la temperatura del café con Tueste Claro.....	63
Figura 19. Distribucion de tamaño de partícula de la moliendas utilizadas.....	67
Figura 20. Efecto de la molienda de los granos de café en liberación del CO ₂	68
Figura 21. Efecto de la molienda de los granos de café en liberación del CO ₂ tueste medio a 25 °C.....	69
Figura 22. Comportamiento de temperatura para el prototipo microcontrolado.....	71
Figura 23. Comportamiento la humedad relativa del aire.....	72
Figura 24. Comportamiento de presion.....	73
Figura 25. Comportamiento de CO ₂ para el prototipo microcontrolado.....	74

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Ecuaciones para representar la transferencia de agua en el secamiento de granos.....	8
Cuadro 2. Modelos matemáticos modificados para representar el CO ₂ en el aire.....	15
Cuadro 3. Información técnica de los equipos electrónicos utilizados.....	21
Cuadro 4. Información técnica de los sensores y componentes electrónicos utilizados.....	25
Cuadro 5. Condiciones de tres tuestes en los granos de café arábica calidad especial.....	27
Cuadro 6. Comparación del color entre los niveles de tueste en los granos.....	28
Cuadro 7. Cambios promedio en las propiedades físicas del café tostado.....	29
Cuadro 8. Acomodo de los modelos matematicos de acuerdo a su valor de AIC	31
Cuadro 9. Parámetros estadísticos obtenidos para el Ajuste 5.....	32
Cuadro 10. Parámetros estadísticos obtenidos para el Ajuste 3 y el Ajuste 6.....	33
Cuadro 11. Parámetros estadísticos obtenidos para el Ajuste 4.....	34
Cuadro 12. Parámetros estadísticos obtenidos para el Ajuste 7.....	35
Cuadro 13. Parámetros estadísticos obtenidos para el Ajuste 1.....	36
Cuadro 14. Parámetros estadísticos obtenidos para el Ajuste 8.....	37
Cuadro 15. Parámetros estadísticos obtenidos para el Ajuste 2.....	38
Cuadro 16. Parámetros estadísticos obtenidos para el Ajuste 9.....	39
Cuadro 17. Energía de activación de los diferentes modelos matemáticos.....	41
Cuadro 18. Análisis estadístico de los modelos matemáticos para el café de tueste medio almacenado a 25 °C.....	44
Cuadro 19. Resumen estadístico de los modelos matemáticos para el café de tueste medio almacenado a 15 y 35 °C.	48
Cuadro 20. Relación entre la rapidez del proceso con la temperatura de almacenamiento...	51
Cuadro 21. Contantes para la construcción de la ecuación general para tueste moderadamente oscuro.....	60

Cuadro 22. Contantes para la construcción de la ecuación general para tueste claro.....	64
Cuadro 23. Comparación de CO2 según el tipo de tueste a una misma temperatura de almacenamiento.....	65
Cuadro 24. Parámetros estadísticos obtenidos para los tratamientos de molienda.....	70
Cuadro 25. Parámetros estadísticos del Ajuste 3 ($CO_2 = a(1 - k^x)$).....	75
Cuadro 26. Comparacion de costo del prototipo microcontrolado con equipos similares en el mercado.....	76



INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Código del prototipo microcontrolado.....	90
ANEXO 2. Código sistema de medición.....	95
ANEXO 3. Calibración de los equipos.....	107
ANEXO 4. Gráficos para Ajuste 5: de regresión A), observados vs predecidos B) y residuos C).....	124
ANEXO 5. Gráficos para Ajuste 3: de regresión A), observados vs predecidos B) y residuos C).....	127
ANEXO 6. Gráficos para Ajuste 6: de regresión A), observados vs predecidos B) y residuos C).....	130
ANEXO 7. Gráficos para Ajuste 4: de regresión A), observados vs predecidos B) y residuos C).....	133
ANEXO 8. Gráficos para Ajuste 7: de regresión A), observados vs predecidos B) y residuos C).....	136
ANEXO 9. Gráficos para Ajuste 1: de regresión A), observados vs predecidos B) y residuos C).....	139
ANEXO 10. Gráficos para Ajuste 8: de regresión A), observados vs predecidos B) y residuos C).....	142
ANEXO 11. Gráficos para Ajuste 2: de regresión A), observados vs predecidos B) y residuos C).....	145
ANEXO 12. Gráficos para Ajuste 9: de regresión A), observados vs predecidos B) y residuos C)	148
ANEXO 13. Gráficos para Molienda Fina a 25°C: de regresión A), observados vs predecidos B) y residuos C)	151
ANEXO 14. Gráficos para Molienda Gruesa a 25 °C de regresión A), observados vs predecidos B) y residuos C)	154

DEDICATORIA

A mi madre Ana y mi padre Arturo, ellos me impulsaron y dieron todas las herramientas y apoyo necesario para tener éxito.

AGRADECIMEINTOS

A mi director Guillermo y mis lectores Giovanni y Juan Roberto, por su guía y paciencia a través de todo este proceso.

Al personal de CIGRAS, Diego B., Danilo A., Ovidio V., Verónica C., Guillermo S. por siempre estar dispuestos a compartir su espacio y consejos conmigo.

RESUMEN

Se analizó la cinética del CO₂, midiendo su liberación a través del tiempo de acuerdo con diferentes tratamientos de nivel de tueste (*Claro a 220°C, Moderadamente Oscuro 235 °C y Oscuro 230 °C*), temperatura de almacenamiento posterior al tueste (*15 °C, 25 °C y 35 °C*) y granulometría (*Fina, Gruesa, Grano entero*), de café. Se compararon diferentes modelos matemáticos de transferencia de masa, modificados para adaptarse al fenómeno en estudio, en su aptitud para describir el proceso de difusión de CO₂ en el aire de acuerdo con resultados de sus *parámetros estadísticos de las regresiones, comportamiento de residuos y parsimoniosidad*; se hizo uso de un modelo exponencial sin modificaciones denotado como *Ajuste 3* como punto de comparación neutral o “*control*”. Finalmente se manufacturó y validó un prototipo micro controlado capaz de medir y registrar diferentes propiedades del aire siendo estas: *concentración de CO₂, Presión, Humedad Relativa y Temperatura*.

El tueste fue realizado en un tostador de cilindro horizontal rotativo midiendo y registrando las condiciones de temperatura de tueste, tiempo y pérdida de masa de los granos. Para tueste *Claro* se reporta $220\pm 0,2$ °C; $7,90\pm 0,09$ min; $12,84\pm 0,07$ %, tueste *Medio* $230,6\pm 0,4$ °C; $9,16\pm 0,14$ min; $15,51\pm 0,25$ % y para tueste *Moderadamente Oscuro* $235\pm 0,1$ °C; $10,23\pm 0,20$ min; $16,65\pm 0,29$ %. Estas condiciones revelaron un comportamiento creciente en magnitud conforme aumentó el nivel de tueste con poca variabilidad entre las muestras de un mismo tueste y diferencias en magnitud entre si con desviaciones estándar lo suficientemente pequeñas para afirmar que se alcanzaron tratamientos de tueste distintos.

Cambios en las propiedades físicas del café luego del tueste también fueron medidas para diferenciar mediante los criterios de color, contenido de humedad (base húmeda y seca), densidad aparente, densidad real y porosidad, los diferentes niveles de tueste alcanzados. En color se notó un aumento del encafecimiento de tonos claros a oscuros de los granos conforme aumentaba en nivel de tueste, de acuerdo con la escala de Agtron el tueste *Claro* se calificó con un SCAA#75, el tueste *Medio* SCAA#55 y el tueste *Moderadamente Oscuro* SCAA# 35.

En cuanto a los contenidos de humedad tanto en base seca como húmeda se evidenció un comportamiento decreciente en magnitud conforme se aumentó el nivel de tueste alcanzado, en base seca se tuvo para tueste *Claro* $5,05 \pm 0,49$ %, tueste *Medio* $3,75 \pm 1,06$ % y para tueste *Moderadamente Oscuro* $2,54 \pm 0,08$ %. El comportamiento decreciente paralelo a aumento del grado de tueste se mantuvo también para las densidades aparentes y reales de los granos, particularmente la densidad real para tueste *Claro* fue de $758,62 \pm 5,47$ kg/m³, para tueste *Medio* $672,30 \pm 1,61$ kg/m³, y el tueste *Moderadamente Oscuro* $645,56 \pm 4,03$ kg/m³. Nuevamente las cercanías de los resultados entre las muestras para un mismo tueste y las desviaciones estándar entre grados de tueste fueron lo suficientemente pequeñas para afirmar los diferentes grados de tueste alcanzado. En cuanto a la porosidad se obtuvieron valores similares entre tuestes sin embargo esto concuerda con los valores comparados en la literatura revisada, para este estudio los valores fueron para tueste *Claro* $44,925 \pm 0,003$ %, tueste *Medio* $44,408 \pm 0,011$ % y para tueste *Moderadamente Oscuro* $44,747 \pm 0,005$ %.

El análisis estadístico cuantitativo y cualitativo llevado a cabo para evaluar el desempeño de 9 modelos analizados, en donde se llegó a la conclusión de que el *Ajuste 1*, creado a tomando como base la ecuación de Midilli, fue el más adecuado para enfocar el análisis de la cinética del proceso ya que presentó los parámetros estadísticos aceptables. Sus valores de R^2 superaron en la gran mayoría de los tratamientos al resto de los modelos incluyendo al *Ajuste 3* con valores de 97,92 % o superiores, y sus residuos se calificaron como aleatorios en todos los tratamientos al no mostrar ninguna tendencia aparente. El parámetro (k) ligado a la cinética del proceso fue utilizado para la determinación de las energías de activación, el valor de los resultados fue creciente de acuerdo al nivel de tueste siendo para tueste *Claro* 27,50 kJ/mol, tueste *Medio* 29,54 kJ/mol y para tueste *Moderadamente Oscuro* 34,79 kJ/mol, este comportamiento solo se observó en los *Ajustes 1* y *2* destacándolos como los únicos una tendencia termodinámica coherente con la literatura revisada, sin embargo el *Ajuste 1* fue superior al *Ajuste 2* en cuanto a parámetros estadísticos y comportamiento de residuos. Sus parámetros (k), (a) y (n) mostraron comportamientos dependientes de la temperatura de almacenamiento permitiendo la creación de ecuaciones generales para cada tueste, en función de la temperatura de almacenamiento y el tiempo, al ser sustituidas por expresiones obtenidas a partir del cálculo de la energía de activación con cada una.

Las temperaturas de almacenamiento programadas a 15 y 35°C se estabilizaron entre las primeras 4 y 5 h a través de todos los tratamientos, a 25°C se mantuvo estable desde las 0 h, confirmando un control efectivo de la temperatura de almacenamiento. El almacenamiento realizado a 15°C redujo en gran medida la cantidad de CO₂ liberado en todos los tuestes en

comparación con la temperatura de 25 °C, en tueste *Claro* 48,15 %, en tueste *Medio* 51,22 %, en tueste *Moderadamente Oscuro* de 40,39 %. Por otro lado a la temperatura de 35 °C se tuvo un aumento en la cantidad de CO₂ liberado en tueste *Claro* 48,15 %, *Medio* de 13,17 %, *Moderadamente Oscuro* de 41,67 %.

Analizando el efecto del nivel tueste a una misma temperatura de almacenamiento se obtuvo que a la temperatura de 15°C se determinó que el tueste *Claro* liberó un 72,00 % menos de CO₂ que el tueste *Medio* y el tueste *Moderadamente Oscuro* liberó 21,60 % más de gas. A la temperatura de 25°C se determinó que el tueste *Claro* liberó un 73,66 % menos de CO₂ que el tueste medio y el tueste *Moderadamente Oscuro* resultando en valores muy similares solamente liberó un 0,49 % más de gas. A la temperatura de 35°C se determinó que el tueste *Claro* liberó un 65,52 % menos de CO₂ que el tueste *Medio* y el tueste *Moderadamente Oscuro* liberó 24,57 % más de gas que el tueste *Medio*.

En cuanto al efecto de la molienda fueron observados valores de concentración de gas liberado menores conforme el tamaño de la partícula disminuía evidenciado pérdidas causadas por la destrucción de la estructura porosa interna del café. En comparación con los obtenidos para el *Grano Entero* se determinó que la pérdida de CO₂ fue mayor para la molienda *Fina* de un 24,8 %, mientras que para el tratamiento de molienda *Gruesa* el resultado fue muy similar al tueste medio de *Grano Entero*, se observó una disminución del 0,9 %.

El prototipo microcontrolado presentó capacidades de medición estables y consistentes en todas las propiedades medidas, destacó principalmente por su bajo precio de manufactura en comparación con otras opciones disponibles en el mercado. La validación de sus mediciones se vió justificada al comparar los resultados obtenidos para la liberación de CO₂ entre los equipos MHZ16 del prototipo microcontrolado y el medidor de gases GSPACEADVANCEGS3LW/P. El equilibrio observado por el prototipo fue alcanzado en $15,57 \pm 3,11$ % en 94,80 h, mientras que el medidor de gases midió $20,50 \pm 2,72$ % en 50,17 h. La causa de la diferencia entre concentraciones observada entre los estos experimentos, pudo deberse a que el tratamiento llevado a cabo con el medidor de gases presentó mayor humedad en el aire consecuencia de las perforaciones realizadas al tomar las mediciones de CO₂, se infiere que estas perforaciones también pudieron alterar la cantidad de oxígeno disponible dentro de los recipientes favoreciendo la tasa de oxidación de los compuestos activados durante el tueste.

1. INTRODUCCION

El café en Costa Rica comenzó su historia como producto de comercial a partir del año 1791, en donde se menciona un envío de grano desde Panamá proveniente de Martinica en el Caribe, posterior a la independencia en 1821 el cultivo de esta planta se ve incentivada por los gobiernos municipales de San José, Cartago y Tres Ríos, otorgando beneficios como subsidio de plantas, exoneración de pago de diezmo y derecho de propiedad a las tierras cultivadas luego de 5 años a quienes decidieran emprenderse en el negocio; para 1830 se realizaban con regularidad exportaciones a Chile (1). En 1840 se vivió un proceso de modernización y mecanización de procesos de poscosecha lo cual brindo mayor capacidad de producción y se estableció como un producto clave en el sostén de la economía, pero fue hasta 1845 en donde se comenzó a exportar directamente hacia Inglaterra, lo que abrió las puertas al mercado Europeo y le gano el nombre de *grano de oro* (2).

Es cultivado en suelos de origen volcánico y de poca acidez, más del 80% del área cafetalera se encuentra entre 800-1600 metros de altitud, temperaturas entre 17-28°C y con precipitaciones anuales de 2 000-3 000 milímetros. El 100% de café cultivado es de la especie Arábica (*Coffea arabica L.*), principalmente de las variedades *Caturra* y *Catuái*, que producen granos de mayor calidad y tazas con mejores características organolépticas; actualmente estas variedades cubren más del 90% del área cafetalera nacional (3).

Costa Rica se encuentra en la posición número 13 entre los países exportadores de café, Brasil Vietnam y Colombia ocupan los primeros tres lugares y a nivel centroamericano es superado

por Guatemala y Nicaragua. Entre los años 2014-2018 las exportaciones de grano oro de país promedian 99,09%, café tostado 0,88% y de café soluble 0,02%, por lo que en general predomina un producto de bajo nivel de valor agregado desde el punto de vista industrial; de acuerdo al Contrato C de Intercontinental Exchange (ICE), en la Bolsa de Nueva York el precio del café oro rondaba los 110 USD/45,36 kg para julio del 2018, manteniendo una tendencia decreciente desde el 2014 en donde estuvo cerca de 225 USD/45,36 kg (4).

A pesar de que Costa Rica no puede competir por volumen de producción, se ha destacado por su calidad, llamando la atención de mercados más especializados. Por medio de las subastas electrónicas de la *Taza de la Excelencia*, el premio más prestigioso para los cafés de alta calidad, se pueden obtener precios de venta récord (5). Ejemplo de esto se tiene que en el 2016 un lote de 11 sacos, de la finca Sumava en Naranjo, fue vendido a la importadora japonesa Wataru en 5.900,00 USD/46 kg; finca La Sur de la empresa Tenería Pirro Antonio Gómez, Ltda, de San Isidro de Heredia, comprado por la compañía Campos Coffee de Australia a 3.120,00 USD/46 kg y el café cultivado por la familia de Carlos Fernández Morera en la finca El Cerro en San Ramón, con un precio de 4.010,00 USD/46 kg (6). De los más recientes se tiene el ejemplo de la finca Don Cayito en el 2018 su café proveniente de El Jardín de Dota, logró un precio de 30.009,00 USD/46 kg, con lo cual rompió el récord de 13.020,00 USD/46 kg que ostentaba un grano brasileño en este mercado (7). Este alto valor del producto promueve profundizar en investigar los cambios fisicoquímicos que ocurre durante su procesamiento.

Es importante notar que estos casos excepcionales no representan a la gran mayoría de productores de café en el país y que estos están sujetos al precio fijado por la ICE. De acuerdo con análisis del valor agregado correspondiente a las diferentes etapas de poscosecha y comercialización del café presentado por Karina López (8), los productores reciben solamente entre el 10-21% del precio final de venta en supermercados o cafeterías. El precio promedio de liquidación final al productor a nivel nacional se fijó en 77.833,39 CRC por cada 250kg de café en fruta para la cosecha 2017-2018 (4).

Si dieran el salto para tostar su propio grano, los productores tendrían un mayor margen de ganancia al vender en mercados internacionales sin embargo el 99% de los productores venden su café verde, porque tostar les demanda una serie de inversiones adicionales que muchos no pueden asumir. Los principales problemas para vender café tostado son: la demanda es desconocida, el pago puede tardar de 90 a 120 días, requiere una gran inversión en maquinaria para el tueste, y empaques que permitan mantener la calidad del producto, así como asumir los altos costos del transporte (9).

Particularmente existen dos eventos principales que afectan la vida útil del café tostado, las reacciones de oxidación y la pérdida de volátiles; estos a su vez se encuentran influenciados por factores intrínsecos y extrínsecos relativos al origen del producto y sus posteriores condiciones de almacenamiento (10). El dióxido de carbono es de principal importancia ya que corresponde hasta el 90% de los volátiles liberados (11), principalmente en café molido puede causar roturas en los empaques, si no es apropiadamente tratado luego del tostado (12).

La importancia en el entendimiento de la cantidad y rapidez que el dióxido de carbono radica en que este gas está ligado la calidad final con la que es consumido el café, ya que previene las reacciones de oxidación que generan el envejecimiento, y degrada la calidad al alterar los aceites esenciales y los componentes aromáticos del café, creando en última instancia un sabor rancio. Los granos que se usan demasiado tiempo después del tueste pierden demasiado dióxido de carbono y aromáticos; resultando en café degradado y debilitado en la taza. Posteriormente luego 10 a 15 días, se produce un fuerte efecto de envejecimiento (13).

1.1 Objetivo General

Describir el proceso de difusión del CO₂ para el café almacenado en varias condiciones de temperatura y nivel de tueste.

1.2 Objetivos específicos.

1. Ajustar un modelo matemático que represente adecuadamente la cinética del CO₂.
2. Determinar el efecto de la temperatura de almacenamiento en la cinética del CO₂.
3. Determinar el efecto del nivel de tueste en la cinética del CO₂.
4. Determinar el efecto de la granulometría en la cinética del CO₂.
5. Desarrollar y validar de un prototipo capaz de medir y registrar la concentración de CO₂.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Proceso de Tostado

El tostado es un proceso que consiste en aplicar una gran cantidad de calor a los granos crudos al mismo tiempo que se mantienen en constante movimiento, hasta que adquieran el color de café deseado, para luego ser enfriados mediante una corriente de aire la cual puede ser auxiliada o no por aspersión de agua (14).

Existen diferentes cambios macroscópicos en el grano que pueden apreciarse conforme aumenta su temperatura, en el intervalo de 20-130 °C se da la evaporación de agua remanente y una decoloración leve. De 130-140 °C se llega al primer máximo endotérmico en donde se presenta un ensanchamiento del grano y se da una coloración amarilla correspondiente al inicio de reacciones de oscurecimiento no enzimático. Seguido de 140-160 °C se presentan una serie de picos endotérmicos y exotérmicos, la superficie del grano presenta pequeñas fisuras producto del aumento de volumen y microporos, a la misma vez que el color cambia a un café claro y es acompañado de aromas. Al llegar a 160-190 °C las reacciones del tostado se mueven hacia la estructura seca e interna del grano. Finalmente de 190-220 °C se producen microfisuras dentro del grano, grandes cantidades de dióxido de carbono comienzan a ser liberados generando una alta porosidad y el típico sabor de café tostado aparece (15).

El tiempo de tostado también es un factor importante a tener en cuenta, este se encuentra fuertemente ligado al grado de tueste final y tiende a ser menor conforme se aumenta la temperatura del tueste. Diferentes comparaciones entre estos parámetros han sido realizadas

en investigaciones previas (12), (16), (17) y (18) en donde se implementan tratamientos utilizando temperaturas de entre 200 y 260 °C y tiempos de entre 2, 8 y 13 min, en donde se realizaron observaciones consistentes en cuanto a que los granos tostados a altas temperaturas y menores tiempos presentaron aumentos en su volumen y en la pérdida de masa, correspondido por una disminución de su densidad, y una mayor tasa de liberación de dióxido de carbono.

2.2 Difusión

Los mecanismos de transferencia de masa de gases suelen estar dominados por difusión molecular, la cual puede ser descrita como la variación de flujo de un soluto a través del tiempo. A partir de la ley de enfriamiento de Newton, Adolf Eugen Fick en 1855 propuso la siguiente expresión para describir este fenómeno, de la difusión (19).

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (ec. 1)$$

Donde:

J : flujo másico del gas (mol/m² *s).

∂C : cambio de la concentración en el tiempo (mol/m³).

∂x : distancia a través de la cual se mueve el flujo (m).

D : coeficiente de difusión (m²/s).

La segunda Ley de Fick, derivada de la a primera, describe cómo cambia la concentración de un compuesto a través del tiempo (19).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (ec. 2)$$

Donde:

C : concentración (mol/m^3).

x : distancia a través de la cual se mueve el flujo (m).

D : coeficiente de difusión (m^2/s).

t : tiempo (s).

A partir de estas leyes de Fick también se han desarrollado diferentes modelos matemáticos con una aplicación enfocada a secado de productos agrícolas, que pueden diferenciarse en tres categorías, teóricos, semiteóricos y empíricos. Los teóricos toman en cuenta la resistencia interna a la transferencia de masa entre el producto y el aire, entre los más utilizados de este tipo se encuentran la segunda ley de Fick de difusión en conjunto con el modelo de Arrhenius que relaciona la difusividad con la temperatura. Los modelos semiteóricos se pueden describir como una simplificación de la segunda ley de Fick, pero cuenta con la particularidad que son solamente válidos para las condiciones de temperatura, humedad relativa, flujo de aire y contenido de humedad en los que hayan sido desarrollados y cuentan con la ventaja de requerir menos tiempo que los teóricos. Entre estos modelos se pueden mencionar *Henderson-Pabis*, el modelo de dos términos (*Two Term*), *Lewis, Page* y *Page modificado* según el Cuadro 1. Los modelos empíricos conducen a una relación directa entre el contenido promedio de masa y el tiempo de secado, pero ignoran los mecanismos de transferencia de calor presentes en el proceso de secado, por lo que sus parámetros carecen de significado físico, por lo que no son recomendables para describir correctamente el proceso, pero sí para trazar una guía inicial del comportamiento de la curva de secado. Entre ellos podemos mencionar el modelo de *Thompson* y el *Wang-Sing* (20).

Cuadro 2. Ecuaciones para representar la transferencia de agua en el secamiento de granos.

Nombre del Modelo	Modelo
1. Page	$RH = \exp(-kt^n)$
2. Midilli	$RH = a \exp(-kt^n) + bt$
3. Newton	$RH = \exp(-kt)$
4. Henderson & Pabis	$RH = a \exp(-kt)$
5. Logarítmico	$RH = a \exp(-kt) + b$
6. Wang & Singh	$RH = 1 + at + bt^2$
7. Difusión Aproximada	$RH = a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-kbt)$
8. Verma	$RH = a \exp(-kt) + (1 - a)\exp(-bt)$

Fuente: (21)

3. DELIMITACION DEL PROBLEMA

La pérdida del dióxido de carbono en los granos es inevitable desde el inicio del proceso torrefacción, en conjunto con volátiles aromáticos. La interrogante se asocia a la posibilidad de reducir la cantidad y velocidad de liberación al ambiente del gas dependiendo de los parámetros ambientales de almacenamiento. Por otro lado, los modelos de transferencia de masa exponencialmente decrecientes usados en secado pueden ser modificados para representar su acumulación en el aire, por lo tanto, los parámetros estadísticos deben ser satisfactorios para la representación del proceso de difusión de dióxido de carbono en el aire durante el almacenamiento

4. METODOLOGÍA

4.1 Biomasa

Se utilizó *Coffea arabica L*, tamaño #17 separado manualmente con cribas. La variedad empleada fue *Catuái* de la zona de Santa María de Dota cosecha 2016-2017, la cual se mantuvo almacenado a 10°C en una cámara de refrigeración ubicada en el Centro para Investigaciones en Granos y Semillas de la Universidad de Costa Rica (CIGRAS).

4.2 Proceso de tueste.

El café oro fue separado en muestras de 600g medidas en la balanza marca BOECO modelo BPS-51 plus ($\pm 0,5$) y vertidas en un tostador de cilindro rotativo horizontal marca BENDIG y modelo EC0-2000, el cual utiliza gas propano como fuente de calor.

El grado de tueste fue determinado según los lineamientos descritos por (22) en donde establece que para 600g gramos de café, se debe llegar a una temperatura interna en el tostador de 280 °C antes de verter los granos. Estos fueron retirados una vez que la temperatura interna del tostador alcanzó 220°C para tueste claro, 230°C para tueste medio y 235°C para tueste medio oscuro.

El control de la temperatura fue monitoreado con un escáner de cables termopar tipo K marca Cole Parmer Instrument Company/Barnat Company, modelo 92000-00 Benchtop 115V, controlado con el software ScanLink 2.0.

4.3 Propiedades físicas del café tostado.

4.3.1 Cambio en Color

Se tomaron muestras pequeñas del café tostado y se utilizó la Escala Agtron de color ejemplificada en (23), para ayudar a determinar el grado de tueste alcanzado, comparando muestras de los tuestes realizados con las imágenes de la Figura 1.



Figura 1. Escala Agtron de color (23).

4.3.2 Cambio del volumen de los granos.

El volumen de granos fue determinado con ayuda de un picnómetro, según lo expuesto presentado por Mohsenin (24), éste se basa en pesar la masa de fluido desplazado por 25 granos, permitiendo establecer una relación entre las densidades y masas de ambos (25). Se utilizó un picnómetro tipo Hubbard de 32,245 ml (26), (27). Como fluido se utilizó aceite vegetal de soya y una balanza analítica para la medición de las masas. Se realizaron tres repeticiones para cada tipo de tueste.

$$\rho_r = \rho_a * \frac{m_g}{m_{ad}} \quad (ec. 3)$$

Donde:

ρ_r , densidad real de los granos (g/mL).

ρ_a , densidad del aceite (mL).

m_g , masa de los 25 granos (g).

m_{ad} , masa del aceite desplazado (g).

Posteriormente el volumen se determinó con la fórmula:

$$V_g = \frac{M_g}{\rho_r} \quad (ec. 4)$$

Donde:

V_g , volumen de una masa de granos (mL).

M_g , masa de granos (g).

ρ_r , densidad real de los granos (g/mL)

4.3.3 Cambio del volumen de Poros.

El volumen de poros puede ser vista como una relación proporcional al volumen total del grano como:

$$V_\varepsilon = V_g * \varepsilon \quad (ec. 5)$$

Donde:

V_ε , volumen de poros (mL).

V_g , volumen de los granos (mL).

ε , porosidad de los granos (adimensional).

La porosidad de los granos calculada según la ecuación expuesta por Mohsenin (24)

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \quad (ec. 6)$$

Donde:

ε , porosidad de los granos (adimensional).

ρ_r , densidad real de los granos (g/mL).

ρ_a , densidad aparente de los granos (g/mL)

La densidad aparente, fue determinada según la norma *INTE/ISO 6669:2009 Café Oro - Determinación de la densidad a granel por caída libre de los granos enteros*. Consiste en emplear un *densímetro*, con un volumen de 1 L sobre el cual se vierten los granos desde el embudo alimentador, previamente llenado, hasta que estos se desborden; luego el exceso de granos en la parte superior es removido con una espátula de madera y el material es pesado. Se realizaron diez repeticiones por cada tueste.

4.3.4 Cambio en el contenido de Humedad.

El cambio en contenido de humedad fue determinado, al usar la norma *INTE ISO 6673:2011 Café verde Determinación de la pérdida de masa a 105°C*. Se realizaron tres repeticiones para cada tueste a cada temperatura con muestras de una masa aproximada de 5,00 g en recipientes numerados. A cada una de ellas se le midió el peso antes y después de terminado el proceso, para determinar su contenido de humedad se utilizó la (ec. 7). La temperatura del horno fue de 105 °C (± 1 °C) y se colocaron por 24 h a presión atmosférica en el horno *MMM Group, modelo VENTICELL y serie 111*.

$$CH_{b.s} = \frac{m_a}{m_s} * 100 \quad (ec. 7)$$

Donde:

$CH_{b.s}$, contenido de humedad den base seca (%)

m_a , masa de agua (g).

m_s , masa seca (g).

4.4 Medición de Dióxido de Carbono.

Se utilizó el medidor de gases Gaspac Advance GS3LW/P, el cual cuantifica la concentración de CO₂ mediante un sensor infrarrojo de longitud de onda dual capaz de medir dos de los tres gases principales presentes en aire, oxígeno (rango de 0,0-100 %, ±2%), dióxido de carbono (rango de 0,0-100 %, ±0,5%) y nitrógeno indirectamente, substrayendo los dos valores antes medidos del total. Requiere una muestra mínima de 5 ml de aire a temperaturas de entre 10 y 40 °C para realizar mediciones correctamente. La manguera cuenta con un acople para una aguja con la que se perforaron los recipientes para tomar las muestras de aire.

4.5 Ajuste de los modelos matemáticos.

Los datos de concentración de CO₂ obtenidos con el medidor de gases fueron procesados algebraicamente como se explica a continuación, se utilizaron tres muestras por cada tueste y temperatura de almacenamiento y molienda empleados. Debido a que los modelos matemáticos de secado en material de capa delgada son de carácter decreciente, se realizaron ajustes a las relaciones matemáticas que describen la razón del cambio de concentraciones

en el aire, para llegar a la siguiente expresión.

$$R_{CO_2} = \frac{C_x - C_i}{C_e - C_i} = 1 - M \quad (\text{ec. 8})$$

Donde:

R_{CO_2} , razón de dióxido de carbono (adimensional)

C_e , concentración de dióxido de carbono en el equilibrio (%)

C_i , concentración inicial de dióxido de carbono en el aire (%)

C_x , concentración de dióxido de carbono en el aire en cualquier momento (%).

M , expresión del modelo matemático original.

Tomando C_i igual a cero y despajando para C_x se tiene:

$$C_x = C_e(1 - M) \quad (\text{ec. 9})$$

La C_e fue determinada usando el criterio de la máxima lectura en donde la diferencia de concentración con respecto a la medición anterior no superara un 0,5 % de acuerdo con la incertidumbre del equipo. Este valor fue sustituido en las ecuaciones del Cuadro 5 según el tratamiento respectivo, al momento de realizar las regresiones.

Añadiendo observaciones realizadas en los estudios de Wang (18), Smrke (28), modelos con parámetros exponenciales similares obtuvieron buenos resultados al utilizar una relación inversa del parámetro (k), por lo que se realizó esta segunda modificación a los modelos de secado de capa delgada del cuadro 1. Los modelos matemáticos modificados se observan en el cuadro 2, y se les refiere con el nombre de Ajuste para diferenciarlos de los modelos originales con mayor facilidad.

Cuadro 2. Modelos matemáticos modificados para representar el CO₂ en el aire

Original/Base	Modificado	Ecuación
Midilli	<i>Ajuste 1</i>	$C_{CO_2} = C_e \left\{ 1 - \left[a \exp\left(-\frac{t^n}{k}\right) + bt \right] \right\}$
Logarítmico	<i>Ajuste 2</i>	$C_{CO_2} = C_e \left\{ 1 - \left[a \exp\left(-\frac{t}{k}\right) + b \right] \right\}$
Propuesto	<i>Ajuste 3</i>	$C_{CO_2} = a (1 - k^x)$
Page	<i>Ajuste 4</i>	$C_{CO_2} = C_e \left[1 - \exp\left(-\frac{t^n}{k}\right) \right]$
Wang &Singh	<i>Ajuste 5</i>	$C_{CO_2} = C_e [1 - (at + bt^2)]$
Newton	<i>Ajuste 6</i>	$C_{CO_2} = C_e \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{k}\right) \right]$
Henderson & Pabis	<i>Ajuste 7</i>	$C_{CO_2} = C_e \left[1 - a \exp\left(-\frac{t}{k}\right) \right]$
Difusión Aproximada	<i>Ajuste 8</i>	$C_{CO_2} = C_e \left\{ 1 - \left[a \exp\left(-\frac{t}{k}\right) + (1 - a)\exp\left(-\frac{bt}{k}\right) \right] \right\}$
Verma	<i>Ajuste 9</i>	$C_{CO_2} = C_e \left\{ 1 - \left[a \exp\left(-\frac{t}{k}\right) + (1 - a)\exp\left(-\frac{t}{b}\right) \right] \right\}$

El *Ajuste 3* corresponde a un modelo propuesto por el autor de este trabajo, denominado *Exponencial Creciente de dos Parámetros* el cual se seleccionó experimentalmente y se encontró en la categoría como modelos exponenciales crecientes en el software SigmaPlot12, y fue utilizado como un punto de comparación neutral o “control”. Se tomaron en cuenta los criterios estadísticos de, coeficiente de determinación (R²) (valor de tolerancia 70 %), significancia de los parámetros y regresión con (valor de tolerancia p=0,05) como valor de y

análisis de residuos (caracterizándolos como aleatorios o tendenciosos) (29). Tomando los resultados de los reportes generados de las regresiones no lineales por el software SigmaPlot12. Así como el criterio de información de Akaike como complemento, desglosado a continuación.

4.5.1 Criterio de Información de Akaike (AIC)

Añadiendo también se utilizó el Criterio de Información de Akaike (AIC), este criterio es una medida de la bondad de ajuste de un modelo estadístico, que describe la relación entre el sesgo y varianza en la construcción del modelo. El AIC no es una prueba del modelo en el sentido de prueba de hipótesis, más bien, proporciona un medio para la comparación entre los modelos de una herramienta para la selección del modelo. Dado un conjunto de datos, varios modelos candidatos pueden ser clasificados de acuerdo a su AIC, con el modelo que tiene el mínimo AIC el que muestra una mejor relación de parsimoniosidad y exactitud (30).

$$AIC = -2 \log (L(\theta | y)) + 2K \quad (\text{ec. 10})$$

Donde:

AIC , criterio de información de Akaike.

$L(\theta | y)$, es la función de log-verosimilitud para el modelo estadístico.

K , numero de parámetros.

En el caso de que se tengan residuos normalmente distribuidos y de varianza constante el AIC puede ser calculado de la siguiente forma.

$$AIC = n \log (\sigma^2) + 2K \quad (\text{ec. 11})$$

Donde:

AIC , criterio de información de Akaike (adimensional).

σ^2 , la suma de cuadrados de los residuos.

K , número de parámetros (incluyendo la intersección y σ^2).

n , cantidad de datos de la muestra

4.5.2 Energía de Activación

La dependencia del parámetro cinético (k) de los modelos con la temperatura de almacenamiento se describe según la ecuación de Arrhenius (31), donde se determina la energía de activación y el factor pre-exponencial.

$$k = A * \exp\left(\frac{Ea}{R * T}\right) \quad (\text{ec. 12})$$

Donde:

Ea , energía de activación (J/mol).

R , constante de los gases ideales (8,314 J/mol*K)

T , temperatura (K).

k , parámetro asociado con la cinética de los modelos matemáticos (h).

A , factor pre-exponencial (h).

Utilizando el valor la pendiente de la recta descrita en la (ec.13) se tiene que la energía de activación está determinada por:

$$Ea = \frac{R * p}{1000} \quad (\text{ec. 13})$$

Donde:

Ea , energía de activación (kJ/mol).

R , constante de los gases ideales (8,314 J/mol*K)

p , pendiente (K).

4.6 Efecto de la temperatura de almacenamiento y nivel de tueste en la cinética del CO₂.

Como medio para controlar la temperatura de almacenamiento fue utilizada germinación *Incucell* programada a las temperaturas de 15, 25 y 35°C.

Las muestras de 600 g de café tostado fueron seguidamente separadas en tres muestras de 125,0 g ($\pm 0,5$) por cada tipo de tueste y colocadas dentro de los seis recipientes disponibles para medición del prototipo, permitiendo evaluar dos tipos de tueste simultáneamente. Se analizaron tres muestras de cada tueste la misma temperatura.

Los recipientes constaron de seis frascos de vidrio Mason-Jars de 500 ml y tapas marca Ball®. Debido a que el funcionamiento del medidor de gases consiste en penetrar el recipiente para tomar una muestra del aire ahí encontrado, se ideó manufacturar un sello o *septum* que fuera a ser insertado a través de la tapa y que mantuviera capacidad de auto sanar el orificio hecho por la aguja.

Este sello se realizó a base de un niple galvanizado de 3/8 x 1 y un tapón hembra de rosca, rellenos hasta la mitad de su longitud con silicón líquido marca Resistol, el cual fue sostenido en su lugar por recortes circulares de esponja de poliuretano denso.

Las tapas fueron perforadas con un taladro y broca, para permitir la inserción del sello previamente descrito que facilitó la medición de CO₂. Para evitar cualquier fuga producida por los orificios realizados, se cubrieron los bordes con silicón líquido tanto por la parte

superior como inferior.

Se tomaron muestras durante 5 días, en intervalos de 1 h durante el primer día, y luego en intervalos 2 h durante los días siguientes, para mantener una perturbación mínima de las condiciones de equilibrio en cada tratamiento a la hora de tomar las muestras de dióxido de carbono.

4.7 Efecto granulometría, en el fenómeno de difusión del CO₂ en el aire.

El efecto de la granulometría se evaluó con tres muestras de 125,0±0,5 g de café tostado para cada molienda y manteniendo constante el nivel de tueste, medio (230 °C), y la temperatura de almacenamiento 25 °C. Se evaluaron las granulometrías, molienda gruesa para prensa francesa (*coarse*) y molienda fina para cafetera estándar (*auto-drip*). Las muestras fueron molidas utilizando el molino *BUNN Coffe Mill*.

La granulometría de las moliendas fue determinada vertiendo 3 muestras de 50,00 g (±0,5) de cada molienda, a través de una serie de tamices de bronce ordenados de mayor a menor denominación de la siguiente forma $n^{\circ}. 100 \rightarrow n^{\circ}. 80 \rightarrow n^{\circ}. 60 \rightarrow n^{\circ}. 40 \rightarrow n^{\circ}. 20 \rightarrow n^{\circ}. 10$. Se tomaron muestras durante 5 días, en intervalos de 15 minutos durante el primer día, y luego en intervalos 1 hora durante los días siguientes, se redujo el intervalo de medición ya que este proceso es mucho más rápido que los anteriores realizados con grano entero.

4.8 Desarrollo del Prototipo para medir las propiedades del aire en equilibrio.

El sistema de medición del prototipo se controló usando el microcontrolador Arduino UNO R3, el cual administró a los diferentes sensores. Para medir la concentración de dióxido de carbono se contó con el sensor *MHZ16 (Intelligent Infrared Gas Module)*, para la humedad relativa y temperatura (*DHT22*) y para la presión BMP180 (*Barometric Pressure Sensor Breakout*). Las mediciones de estos sensores fueron registradas en memoria Kingston micro SD 32GB haciendo uso del adaptador de memoria SD (*Micro SD Card Adapter Breakout Board*).

De la misma forma se utilizó el regulador de voltaje (*LM1117T*), para la correcta alimentación energética de los sensores de presión. El Cuadro 3 muestra la información técnica de interés de los equipos utilizados. En total se desarrollaron dos prototipos de estos los cuales trabajando de forma independiente mientras se encuentren conectados a un mismo computador. La figura 2 muestra el diagrama de conexión del prototipo.

Cuadro 3. Información técnica de los equipos electrónicos utilizados.

Equipo	Voltaje de operación (V)	Corriente consumida (mA)	Interfase		Rango de Medición	Incertidumbre
			Pines Analógicos	Pines Digitales		
Arduino UNO	7 a 12	<2000	6 en total	14 en total	NA	NA
BMP180	3.3	1,00	NA	SCL y SDA	300 a 1100hPa	± 2,0hPa
MHZ16	5	150	NA	SCL y SDA	0 a 10 %	± 15% <i>d_{lm}</i>
DHT22	5	1,5	NA	DU	0 a 100% RH -40 a 80°C	± 5% <i>d_{lm}</i> ± 0,5°C
Micro SD Card Adapter	5	100	NA	CS,SCK, MISO y MOSI	NA	NA
LM1117T	5	5	NA	NA	NA	NA

*NA= *no aplica.*

**DU= *número del pin de comunicación, determinado por el usuario.*

****d_{lm}*= *de la medición tomada.*

El sistema de medición microcontrolado se programó para registrar mediciones cada 60 s. Pero debido a las limitaciones del hardware se depuraron previo al análisis, tomando los datos en intervalos de 1 h para facilitar su manipulación. El código que rige el prototipo se encuentra en la sección de Anexo 1.

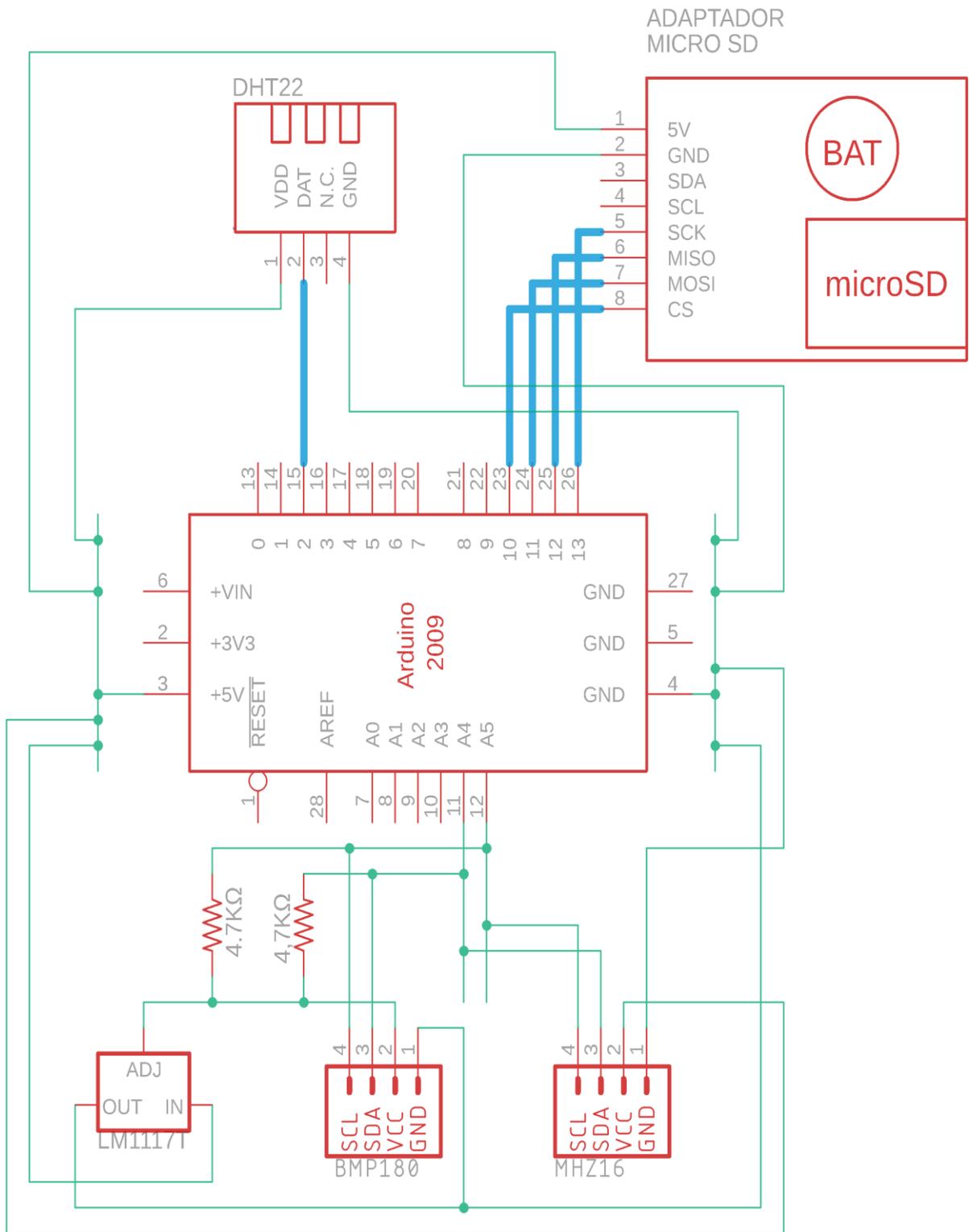


Figura 2. Diagrama de conexión prototipo microcontrolado con Arduino-UNO.

4.8.1 Validación del Prototipo.

Se utilizaron dos muestras de café de 125,0 g ($\pm 0,5$) de tueste, medio (230°C) y a la temperatura de almacenamiento de 25°C. La validación fue realizada comparando los resultados del prototipo contra los resultados obtenidos de la sección 4.4 de las mismas características de tueste y temperatura de almacenamiento, de las diferentes propiedades evaluadas.

Debido a que los *MHZ16* poseen un rango de medición menor al medidor de gases, fueron empleados con recipientes de vidrio de 1 L. Al duplicar el volumen de control se permitía mantener una masa de café constante y observar la concentración de equilibrio de dióxido de carbono sin exceder los rangos de medición del sensor. Se utilizó la ley del gas ideal y el principio de la conservación de la energía para transformar los datos de presión (*ec. 14*) y concentración de dióxido de carbono (*ec. 15*) para poder ser comparados adecuadamente con el experimento descrito en la sección 4.5.

$$P_{500\text{ ml}} = \frac{P_{1000\text{ ml}}}{2} \quad (\text{ec. 14})$$

Donde:

$P_{1000\text{ ml}}$, presión a 1000ml (hPA).

$P_{500\text{ ml}}$, presión a 500ml (hPA).

$$C.CO2_{500\text{ ml}} = 2 * C.CO2_{1000\text{ ml}} \quad (\text{ec. 15})$$

Donde:

$C.CO2_{1000\text{ ml}}$, concentración de dióxido de carbono 1000 ml (%).

$C.CO2_{500\text{ ml}}$, concentración de dióxido de carbono 500 ml (%).

Para la comparación de las propiedades se hizo uso de otro un sistema de medición microcontrolado figura 5. Se utilizó el microcontrolador *Arduino MEGA 2560*, el cual administró a los diferentes sensores. Para medir la humedad relativa y temperatura seis sensores *DHT22* y para la presión seis *BMP180 (Barometric Pressure Sensor Breakou)*. Las mediciones de estos sensores fueron registradas en memoria *Kingston micro SD 16GB* haciendo uso del adaptador de memoria *SD Micro SD Card Adapter Breakout Board*.

Como hardware adicional se hizo uso del multiplexor de 8 canales *TCA9548A*, para alcanzar una correcta comunicación entre los sensores de presión, ya que estos no cumplían con tener identidades de comunicación con nombres diferenciables.

Así mismo se requirió del regulador de voltaje *LM1117T*, para la correcta alimentación energética de estos. El Cuadro 4 muestra la información técnica de interés de los equipos utilizados y en la Figura 3 se aprecia el diagrama de conexión de los mismos.

Cuadro 4. Información técnica de los sensores y componentes electrónicos utilizados.

Equipo	Voltaje de operación (V)	Corriente consumida (mA)	Interfase		Rango de Medición	Incertidumbre
			Pines Analógicos	Pines Digitales		
Arduino Mega 2560	7 a 12	<2000	16 en total	54 en total	NA	NA
BMP180	3.3	1,00	NA	SCL y SDA	300 a 1100hPa	± 2,0hPa
DHT22	5	1,5	NA	DU	0 a 100% RH -40 a 80°C	± 5% <i>d_{lm}</i> ± 0,5°C
Micro SD Card Adapter	5	100	NA	CS,SCK, MISO y MOSI	NA	NA
(TCA9548A)	5	100	NA	SCL y SDA	NA	NA
LM1117T	5	5	NA	NA	NA	NA

*NA= no aplica.

**DU= número del pin de comunicación, determinado por el usuario.

****d_{lm}*= de la medición tomada.

El sistema de medición microcontrolado se programó para registrar mediciones cada 60 s, y se llevó un registro paralelo de las mediciones registradas justo antes de insertar la aguja en los recipientes para realizar la lectura de dióxido de carbono, como respaldo. El código que rige el sistema puede observarse en la sección de Anexo2. La figura 4 muestra el diagrama de conexión de sistema de medición.

Tanto al medidor de gases como a los sensores descritos se les realizó una prueba diagnóstica previa del comportamiento de sus mediciones mediante los procesos de calibración en el Anexo 3.

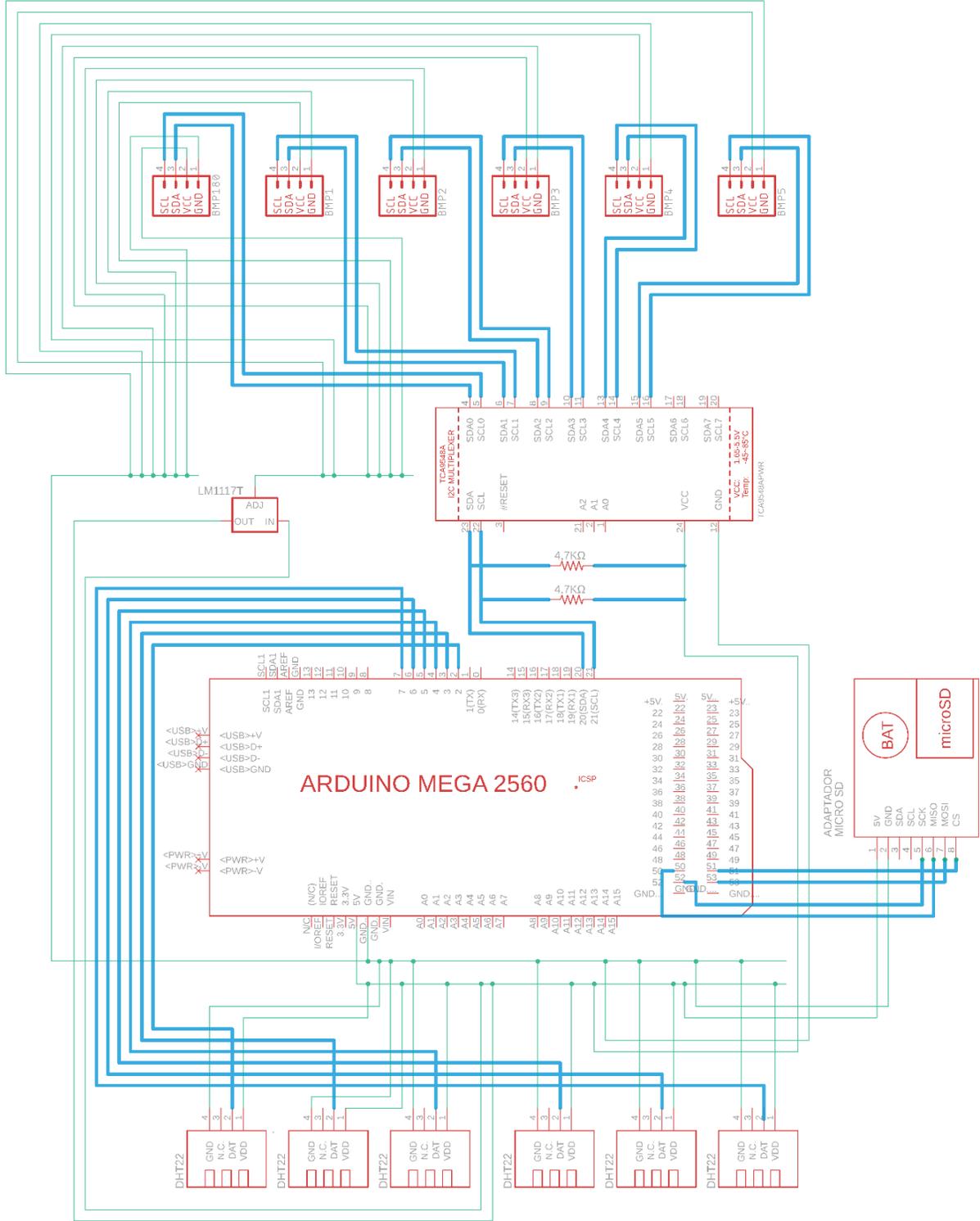


Figura 3. Diagrama de conexión Sistema de medición

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Proceso de torrefacción para la obtención de los granos tostados.

Las condiciones del tueste en los granos son observadas en el cuadro 5, donde los tiempos fueron semejantes para cada nivel de tueste y las pérdidas de masa presentaron poca variabilidad entre las repeticiones, dando resultados de diferencias significativas entre trataminetos distintos. El criterio de temperatura final en el interior del tostador aplicado en una misma masa garantiza un tueste uniforme y constante en los granos.

Cuadro 5. Condiciones de tres tuestes en los granos de café arábica calidad especial.

Nivel de tueste	Temperatura del aire interno (°C)	tiempo de tueste (min)	Pérdida de masa (%)	Pérdida de Masa ¹ (%)	Pérdida de Masa ² (%)
Claro	220,3 ± 0,2	7,90 ± 0,09	12,84±0,07	10,1	15,8
Medio	230,6 ± 0,4	9,16 ± 0,14	15,51±0,25	12,1	17,2
M. Oscuro	235,2 ± 0,1	10,23 ± 0,20	16,65±0,29	15,8	18,7

¹Abarca, 2017 (23); ²Vargas, 2011 (25).

La rapidez de la pérdida de masa es lineal de 1,65 % por cada minuto. La pérdida de masa determinada para cada tueste en este experimento se encuentra dentro del rango reportado en otras investigaciones en café de calidad ((22), (25)), es probable que el contenido de humedad inicial de los granos en cada experimento sea el principal factor de la variación y no se descarta que otras variables pueden afectar como la variedad y el procesamiento del café en la pérdida de masa durante el tueste.

5.2 Caracterización de las propiedades físicas del café tostado.

Se observa en el cuadro 6 la correspondencia del color de los granos tostados con la escala Agtron para los tres tratamientos, se observa tanto la uniformidad en el color entre los granos de un mismo tueste como el contraste entre los tres niveles de tueste.

Cuadro 6. Comparación del color entre los niveles de tueste en los granos

Tueste	Muestras			Tabla Agtron SCAA#
Claro				75
Medio				55
M.Oscuro				35

El color es un excelente parámetro físico cualitativo para la calificación categorica del nivel de tueste alcanzado, mientras que la pérdida de masa es un método cuantitativo para verificar que la rapidez es linealmente dependiente de la temperatura del proceso (32).

El cuadro 7 muestra los resultados para las las diferentes propiedades físicas medidas para los diferentes tratamientos de tueste, hubo una tendencia decreciente en magnitud conforme

al nivel de tueste aumenta desde claro hasta oscuro, lo cual está conforme a los resultados en otras investigaciones (22),(25),(17),(12).

Cuadro 7. Resultados promedio en las propiedades físicas del café tostado.

Tratamiento	CH b.s. (%)	CH b.h. (%)	ρ_a (kg/m ³)	ρ_r (kg/m ³)	ε (%)
Tueste Claro	5,05 ± 0,49	4,80 ± 0,45	417,81 ± 2,63	758,62 ± 5,47	44,925±0,003
Tueste Medio	3,75 ± 1,06	3,60 ± 0,98	374,79 ± 1,29	672,30 ± 1,61	44,408±0,011
Tueste M.Oscuro	2,54 ± 0,08	2,48 ± 0,08	356,69 ± 1,52	645,56 ± 4,03	44,747±0,005

contenido de humedad base seca(CH b.s), contenido de humedad base húmeda (CH b.h), densidad aparente (ρ_a), densidad real (ρ_r) y porosidad (ε)

Los contenidos de humedad en esta investigación son semejantes a otro trabajo donde el contenido de humedad en base húmeda fue 2,42 % para tueste claro, 1,61 % para tueste medio y 1,0 % para tueste oscuro (12). El contenido de humedad cumple con el estandar de comercializacion internacional de café tostato, en España se permite hasta 5 % b.h. (33).

Los resultados de densidad aparente se encontraron muy cercanos a otra investigación (22), donde se utilizó la misma variedad de café de este estudio para tueste claro con 413,63 kg/m³, tueste medio 376,81 kg/m³ y tueste moderadamente oscuro 357,13 kg/m³. En cuanto a la densidad real (25) el rango reportado fue desde 709 hasta 473 kg/m³, sin embargo la variedad de café, el contenido de humedad inicial y hasta el tipo de tostador puede ser un factor para generar diferencias químicas y estructurales en los materiales biológicos.

La porosidad intergranular entre los tres niveles de tueste es similar con promedio de 44,7 %, este resultado es semejante por otra investigación (25) con 45,2 % para los mismos niveles de tueste y utilizando la misma metodología. Añadiendo (17) analizó la porosidad intragranular, en donde se asoció que con el aumento de la temperatura la porosidad creció desde 47,4 hasta 52,8 %, el aumento se debe a la existencia de microporos más grandes pueden promover la desgasificación más rápida y la migración de aceite, así como una mayor accesibilidad al oxígeno y una pérdida acelerada de los compuestos aromatizantes. El echo de que los resultados de este experimento no reflejaran el mismo comportamiento pudo deberse a los fluidos utilizados para la medición de esta propiedad, ya que se utilizaron aceites de la misma marca y empaque, sin embargo de envases distintos, la variación en la constitución de estos fluidos así como la temperatura ambiente de los días en los que fueron llevadas a cabo las mediciones pudo influir en la densidad del fluido, infligiendo una variación no deliberada registrada por la alta precisión de la balanza analítica.

5.3 Análisis estadísticos de cada ajuste matemático.

Los diferentes ajustes se presentaron en el cuadro 8 de forma creciente en acorde con su valor del criterio de AIC, a travez de los diferentes tuestes y temperaturas de almacenamiento empleadas. Se tomó este criterio como herramienta de categorización ya que este realiza un balance cuantitativo entre la exactitud del ajuste y su estructura algebraica, ofreciendo un panorama mas completo para analizar su desempeño general a travez de todos los tratamientos. Los modelos originales correspondientes a cada ajuste se encuentran en el cuadro 2, pag 15.

Cuadro 8. Acomódo de los modelos matemáticos de menor a mayor valor de AIC.

Temperatura	Posición según AIC	Tueste Claro	Tueste Medio	Tuest M. Oscuro
15 °C	1	Ajuste 4	Ajuste 5	Ajuste 5
	2	Ajuste 5	Ajuste 6	Ajuste 6
	3	Ajuste 6	Ajuste 3	Ajuste 3
	4	Ajuste 3	Ajuste 4	Ajuste 4
	5	Ajuste 7	Ajuste 7	Ajuste 7
	6	Ajuste 1	Ajuste 8	Ajuste 2
	7	Ajuste 2	Ajuste 1	Ajuste 9
	8	Ajuste 8	Ajuste 2	Ajuste 8
	9	Ajuste 9	Ajuste 9	Ajuste 1
25 °C	1	Ajuste 5	Ajuste 5	Ajuste 5
	2	Ajuste 6	Ajuste 6	Ajuste 3
	3	Ajuste 3	Ajuste 3	Ajuste 6
	4	Ajuste 8	Ajuste 4	Ajuste 4
	5	Ajuste 4	Ajuste 7	Ajuste 7
	6	Ajuste 7	Ajuste 8	Ajuste 9
	7	Ajuste 1	Ajuste 1	Ajuste 8
	8	Ajuste 2	Ajuste 2	Ajuste 2
	9	Ajuste 9	Ajuste 9	Ajuste 1
35 °C	1	Ajuste 5	Ajuste 5	Ajuste 5
	2	Ajuste 6	Ajuste 6	Ajuste 6
	3	Ajuste 3	Ajuste 3	Ajuste 3
	4	Ajuste 7	Ajuste 4	Ajuste 4
	5	Ajuste 4	Ajuste 7	Ajuste 7
	6	Ajuste 8	Ajuste 1	Ajuste 8
	7	Ajuste 2	Ajuste 9	Ajuste 1
	8	Ajuste 9	Ajuste 8	Ajuste 2
	9	Ajuste 1	Ajuste 2	Ajuste 9

El análisis individual de cada modelo sigue a continuación:

El *Ajuste 5*, cuadro 9 presentó el menor de los valores de AIC inclusive menor que el valor del modelo utilizado como control o *Ajuste 3*, sin embargo con la misma consistencia resulta con el menor valor de R^2 en todos los tratamientos. Su constante (*a*) no aparentó ningún comportamiento particularmente decreciente o creciente que fuera indicativo de la cinética del proceso, la constante (*b*) resulto el valor de cero o muy cercano a cero. El comportamiento de sus residuos fue tendencioso en todos los tratamientos, mostrando comportamientos lineales crecientes ó decrecientes, con la excepción de tueste medio a 15°C. Las representaciones gráficas de la regresión, observados vs predichos y sus residuos vs predichos pueden ser observadas en el Anexo 4 A), B) y C) respectivamente.

Cuadro 9. Parámetros estadísticos obtenidos para el *Ajuste 5*.

Tratamiento	T. (°C)	R ² (%)	A	B	P.regresión	C.R.	AIC
Tueste Claro	15	89,62	-0,049	0,000	<0,0001	T	16,32
	25	81,82	-0,032	0,000	<0,0001	T	13,27
	35	79,66	-0,031	0,000	<0,0001	T	11,51
Tueste Medio	15	86,48	-0,050	0,001	<0,0001	A	11,68
	25	92,68	-0,048	0,001	<0,0001	T	9,62
	35	90,94	-0,400	0,000	<0,0001	T	8,55
Tueste M.Oscuro	15	70,38	-0,068	0,001	<0,0001	T	9,22
	25	82,00	-0,044	0,005	<0,0001	T	7,55
	35	90,33	-0,039	0,000	<0,0001	T	7,70

C.R. = comportamiento de residuos, *A* = aleatorios, *T* = tendenciosos.

AIC = Criterio de Información de Akaike.

El modelo utilizado como control *Ajuste 3* y el *Ajuste 6* presentaron los mismos valores de AIC y R^2 , siendo los segundos en magnitud de acuerdo con el criterio de AIC, ver cuadro 8,

cuadro 10. Sus parámetros (k) difieren en valor pero muestran una tendencia creciente con la temperatura de almacenamiento para un mismo tipo de tueste en todos los tratamientos. El comportamiento de sus residuos resultó tendencioso en todos los casos, mostrando tendencias lineales crecientes o decrecientes, con excepción de tueste claro a 15°C. Las representaciones gráficas de la regresión, observados vs predichos y sus residuos vs predichos pueden ser observadas en el apartado Anexo 5 A), B) y C) para el *Ajuste 3* y Anexo 6 A), B) y C) para el *Ajuste 6* en ese orden.

Cuadro 10. Parámetros estadísticos obtenidos para el *Ajuste 3* y el *Ajuste 6*.

Tratamiento	T. (°C)	R ² (%)	k (h)	P.regresión	C.R.	AIC
<i>Ajuste 3</i>						
Tueste Claro	15	98,33	0,883	<0,0001	A	19,97
	25	94,17	0,942	<0,0001	T	15,54
	35	94,71	0,945	<0,0001	T	14,21
Tueste Medio	15	94,05	0,897	<0,0001	T	13,32
	25	96,81	0,931	<0,0001	T	11,34
	35	96,65	0,936	<0,0001	T	10,55
Tueste M.Oscuro	15	96,97	0,761	<0,0001	T	13,78
	25	94,36	0,864	<0,0001	T	9,87
	35	92,81	0,949	<0,0001	T	8,29
<i>Ajuste 6</i>						
Tueste Claro	15	98,33	8,051	<0,0001	A	19,97
	25	94,17	16,624	<0,0001	T	15,54
	35	94,71	17,653	<0,0001	T	14,21
Tueste Medio	15	94,05	9,213	<0,0001	T	13,32
	25	96,81	14,050	<0,0001	T	11,34
	35	96,65	15,073	<0,0001	T	10,55
Tueste M.Oscuro	15	96,97	3,667	<0,0001	T	13,78
	25	94,70	6,758	<0,0001	T	10,00
	35	92,81	19,013	<0,0001	T	8,29

C.R. = comportamiento de residuos, *A* = aleatorios, *T* = tendenciosos.

AIC = Criterio de Información de Akaike.

El modelo de *Ajuste 4* al se encuentra en tercera posición de acuerdo a su valor *AIC* en la mayoría de los tratamientos, ver cuadro 11. En contraste con los del *Ajuste 3* supera en magnitud sus R^2 en todos los tratamientos con la excepción del tueste claro a 15°C, cuadro 11. Su parámetro (*k*) sigue una tendencia creciente de acuerdo con la temperatura para un mismo tipo de tueste y solo en tueste claro a 15°C resultó no significativo. El comportamiento de sus residuos fue aleatorio, agrupandose cerca del origen sin nignun patron aparente en todos los casos con la excepción de tueste claro a 15°C y tueste moderadamente oscuro Oscuro a 35°C. Las respresentaciones gráficas de la regresión, observados vs predecidos y sus residuos vs predecidos pueden ser observadas en el apartado Anexo 7 A), B) y C) respectivamente.

Cuadro 11. Parámetros estadísticos obtenidos para el *Ajuste 4*.

Tratamiento	T. (°C)	R ² (%)	k (h)	n	P.regresión	C.R.	AIC
Tueste Claro	15	27,72	0,568*	15,846	<0,0001	T	12,43
	25	98,40	6,473	0,685	<0,0001	A	18,13
	35	99,10	7,368	0,687	<0,0001	A	17,75
Tueste Medio	15	98,38	5,182	0,681	<0,0001	A	15,92
	25	98,75	7,623	0,777	<0,0001	A	13,21
	35	97,69	9,540	0,830	<0,0001	A	11,29
Tueste M.Oscuro	15	98,97	2,679	1	<0,0001	A	15,94
	25	92,25	4,368	0,6459	<0,0001	A	12,21
	35	97,51	6,760	0,672	<0,0001	T	10,42

* parámetro no significativo.

C.R. = comportamiento de residuos, A = aleatorios, T = tendenciosos.

AIC = Criterio de Información de Akaike.

El *Ajuste 7* varió entre la cuarta y quinta posición de sus valores de *AIC* a través de los tratamientos, ver cuadro 8, sus valores de R^2 en todos los tratamientos superan los valores del modelo propuesto o *Ajuste 3*, cuadro 12. Su parámetro (*k*) muestra un comportamiento

creciente con la temperatura almacenamiento para un mismo tueste y el comportamiento de los residuos se caracterizó como aleatorio en todos los casos, agrupandose cerca del origen sin ningún patrón aparente. El parámetro (*a*) se encontró muy cercano a la unidad en todos los casos. Las representaciones gráficas de la regresión, observados vs predichos y sus residuos vs predichos pueden ser observadas en el apartado Anexo 8 A), B) y C) respectivamente.

Cuadro 12. Parámetros estadísticos obtenidos para el *Ajuste 7*.

Tratamiento	T. (°C)	R ² (%)	k (h)	a	P.regresión	C.R.	AIC
Tueste Claro	15	98,35	8,262	0,975	<0,0001	A	21,99
	25	96,75	19,983	0,881	<0,0001	A	18,71
	35	96,64	21,146	0,905	<0,0001	A	17,11
Tueste Medio	15	96,05	14,100	0,898	<0,0001	A	16,14
	25	98,31	15,922	0,917	<0,0001	A	14,6
	35	97,38	16,705	0,938	<0,0001	A	13,04
Tueste M.Oscuro	15	97,59	4,224	0,934	<0,0001	A	16,24
	25	96,14	11,645	0,888	<0,0001	A	12,63
	35	96,82	22,291	0,892	<0,0001	A	11,93

C.R. = comportamiento de residuos, *A* = aleatorios, *T* = tendenciosos.

AIC = Criterio de Información de Akaike.

El *Ajuste 1* presentó valores mayores de R², varió entre la sexta y séptima posición de sus valores de AIC, a través de la mayoría de los tratamientos, ver cuadro 8, sus valores de R² en todos los tratamientos superan los valores al *Ajuste 3*, cuadro 13. El parámetro (*k*) se mostró creciente de acuerdo a la temperatura para un mismo grado de tueste en tueste medio y tueste oscuro con la excepción del tueste claro, en donde su valor superó el de las otras dos temperaturas, sin embargo este parámetro resultó no significativo por lo que no puede decirse con seguridad que sea diferente de cero. El parámetro (*b*) resultó no significativo a través de

todos los tratamientos, mientras que el parámetro (a) resultó en el valor de uno o muy cercano a uno en la mayoría todos los tratamientos. El comportamiento los residuos se clasificó como aleatorio en todos los casos, agrupandose cerca del origen sin nignun patron aparente. Las gráficas de la regresión, observados vs predecidos y sus residuos vs predecidos pueden ser observadas en el Anexo 9 A), B) y C) respectivamente.

Cuadro 13. Parámetros estadísticos obtenidos para el *Ajuste 1*.

Tratamiento	T. (°C)	R ² (%)	k (h)	n	a	b	P.regresión	C.R.	AIC
Tueste Claro	15	99,05	13,082*	1,246	0,955	-0,001*	<0,0001	A	23,10
	25	98,81	5,695	0,613	1,003	0,000*	<0,0001	A	20,71
	35	99,86	7,992	0,719	0,999	0,000*	<0,0001	A	24,69
Tueste Medio	15	98,64	4,738	0,566	1,001	0,000	<0,0001	A	18,27
	25	99,06	8,174*	0,702	0,987	0,000	<0,0001	A	15,77
	35	97,92	9,228*	0,789	0,989	0,001	<0,0001	A	13,50
Tueste M.Oscuro	15	99,10	2,678	0,615	0,991	0,001*	<0,0001	A	18,21
	25	99,30	5,283	0,7851	0,978	-0,001*	<0,0001	A	16,52
	35	98,64	5,871	0,492	0,996	0,005*	<0,0001	A	13,63

* *parametro no significativo.*

C.R. = *comportamiento de residuos*, *A* = *aleatorios*, *T* = *tendenciosos*.

AIC = *Criterio de Informacion de Akaike.*

El modelo de *Ajuste 8* se presentó más recurrencia en entre la sexta y octava posición de acuerdo con su valor de AIC, ver cuadro 8, su valor de R² fue mayor o igual al del modelo propuesto, cuadro 14. El parámetro (k) se comportó de forma creciente en todos los tratamientos de temperatura para los tuestes medio y medio oscuro. Sus parámetros (a) y (b) resultaron consistentemente en el valor de uno en todos los casos. El comportamiento de sus residuos se caracterizó como tendencioso en todos los tratamientos, mostrando patrones lineales creciente o decrecientes según el el caso, con la excepcion de tueste claro a 15°C. Las respresentaciones gráficas de la regresión, observados vs predecidos y sus residuos vs

predecidos pueden ser observadas en el apartado Anexo 10 A), B) y C) respectivamente.

Cuadro 14. Parámetros estadísticos obtenidos para el *Ajuste 8*.

Tratamiento	T. (°C)	R ² (%)	k (h)	a	b	P.regresión	C.R.	AIC
Tueste Claro	15	98,33	8,015	1,000	1,000	<0,0001	A	23,97
	25	94,17	16,624	1,000	1,000	<0,0001	T	15,79
	35	94,71	17,653	1,000	1,000	<0,0001	T	18,21
Tueste Medio	15	94,05	9,213	1,000	1,000	<0,0001	T	17,32
	25	96,81	14,050	1,000	1,000	<0,0001	T	15,34
	35	96,65	15,073	1,000	1,000	<0,0001	T	14,55
Tueste M.Oscuro	15	96,97	3,667*	1,000	1,000	<0,0001	T	17,78
	25	97,70	6,758	1,000	1,000	<0,0001	T	14,00
	35	92,81	19,013	1,000	1,000	<0,0001	T	12,30

* *parámetro no significativo.*

C.R. = *comportamiento de residuos*, *A* = *aleatorios*, *T* = *tendenciosos*.

AIC = *Criterio de Información de Akaike*.

El *Ajuste 2* osciló entre la séptima y octava posición a través de la mayoría los tratamientos, ver cuadro 8, con la excepción de tueste medio a la temperatura de 35 °C de acuerdo con su valor de AIC y su R² fue superior en valor del *Ajuste 3*, cuadro 15. El parámetro (*k*) solamente se comportó de forma creciente en el tratamiento tueste medio, en tueste oscuro las temperaturas a 15°C y 25 °C resultaron en el mismo valor y en tueste claro el valor en la temperatura de 35°C es menor que a 25 °C. Los parámetros (*a*) y (*b*) se comportaron de forma similar al *Ajuste 1* a aproximándose al valor de uno y (*b*) resultando en valores muy cercanos a cero o en su defecto no significativos. Sus residuos se caracterizaron como aleatorios en todos los tratamientos, agrupándose ceca del cero sin ningun patron aparente. Las representaciones gráficas de la regresión, observados vs predecidos y sus residuos vs predecidos pueden ser observadas en el apartado Anexo 11 A), B) y C) respectivamente.

Cuadro 15. Parámetros estadísticos obtenidos para el *Ajuste 2*.

Tratamiento	T. (°C)	R ² (%)	k (h)	a	b	P.regresión	C.R.	AIC
Tueste Claro	15	98,47	7,815	0,970	0,021*	<0,0001	A	24,15
	25	96,81	18,589	0,867	0,020*	<0,0001	A	20,75
	35	97,87	15,058	0,846	0,093	<0,0001	A	20,02
Tueste Medio	15	97,33	7,402	0,858	0,102*	<0,0001	A	18,93
	25	98,35	14,775	0,899	0,024*	<0,0001	A	16,65
	35	97,38	16,722	0,939	-0,000*	<0,0001	A	15,04
Tueste M.Oscuro	15	98,33	6,464	0,857	0,091*	<0,0001	A	16,31
	25	98,33	6,464	0,857	0,091	<0,0001	A	16,31
	35	96,85	24,233	0,921	-0,0324*	<0,0001	A	13,94

* *parámetro no significativo.*

C.R. = *comportamiento de residuos*, *A* = *aleatorios*, *T* = *tendenciosos*.

AIC = *Criterio de Información de Akaike*.

El *Ajuste 9* se mantuvo entre la octava y novena posición a través de todos los tratamientos de acuerdo con su valor de AIC, ver cuadro 8, su valor de R² fue mayor al *Ajuste 3* en todos los casos, cuadro 16. Su parámetro (*k*) solo se comportó de forma creciente en el tratamiento de tueste oscuro y resultó como no significativo en la gran mayoría de los tratamientos. Los parámetros (*a*) y (*b*) no mostraron ninguna tendencia o valores cercanos y resultaron como no significativos en la gran mayoría de los tratamientos. El comportamiento de sus residuos se caracterizó como aleatorios a través de todos los tratamientos al no mostrar ninguna tendencia notable en su distribución, con la excepción de tueste moderadamente oscuro a 15°C y 25°C. Las representaciones gráficas de la regresión observados vs predecidos y sus residuos vs predecidos pueden ser observadas en el apartado Anexo 12 A), B) y C) respectivamente.

Cuadro 16. Parámetros estadísticos obtenidos para el *Ajuste 9*.

Tratamiento	T. (°C)	R ² (%)	K (h)	a	b	P.regresión	C.R.	AIC
Tueste Claro	15	98,45	5,290*	75,138*	5,259*	<0,0001	A	24,13
	25	98,82	1,730*	0,264	24,500	<0,0001	A	22,75
	35	99,59	6,606	0,535	4,452	<0,0001	A	21,95
Tueste Medio	15	98,38	17,954	0,770	1,034*	<0,0001	A	19,93
	25	99,27	0,336*	0,135	17,225	<0,0001	A	18,28
	35	96,65	15,000*	1,000*	15,00*	<0,0001	A	14,55
Tueste M.Oscuro	15	96,97	3,667*	0,945*	3,667*	<0,0001	T	17,78
	25	94,70	6,754*	5,327*	6,753*	<0,0001	T	14,00
	35	98,38	23,902	0,843	0,398*	<0,0001	A	15,28

* *parámetro no significativo.*

C.R. = *comportamiento de residuos*, *A* = *aleatorios*, *T* = *tendenciosos*.

AIC = *Criterio de Información de Akaike*.

A continuación se presenta el análisis integral del desempeño de los ajustes utilizados:

Tomando la perspectiva de los valores AIC y el R² se notó el intercambio que sucede al pasar de modelos matemáticos con pocos parámetros a muchos. A medida que aumentó el número de parámetros aumentaron ambos criterios también en valor, por la parte del coeficiente de determinación indicando que los modelos con más parámetros fueron más adecuados para describir los resultados y la proporción de variación de los resultados, sin embargo al aumentar también el Criterio de Información de Akaike significó que empeoraba su parsimoniosidad y en conjunto con la significancia de los parámetros se observó que particularmente en los modelos de *Ajuste 8*, *Ajuste 9* y *Ajuste 2* que los parámetros no relacionados con la cinética del proceso pueden ser considerados como descartables ya que no hacen un aporte notable, en el caso extremo de *Ajuste 9* se notó una inestabilidad particular en las bandas de confianza de la regresión realizada, como se puede observar en los Anexo12.

Por otra parte el caso contrario relacionado al modelo de *Ajuste 5* el cual tiene la menor cantidad de parámetros logra una muy buena relación de parsimoniosidad y unos coeficientes de determinación aceptables, sin embargo se caracterizó principalmente por el hecho de que sus parámetros no presentaron ningún comportamiento que reflejara la cinética del fenómeno sumando a que sus residuos resultaron tendenciosos en particularmente todos los casos a 15°C sugiriendo que no es un modelo adecuado para predecir la cinética de dióxido de carbono.

Los modelos de *Ajuste 3*, *Ajuste 4* y *Ajuste 6* fueron los que mostraron el mejor balance entre la cantidad de parámetros y la representación de variabilidad de los datos ya el valor de R^2 no aunque fue menor que los modelos discutidos anteriormente, no lo fue lo suficiente como para representar un margen notable, con la excepción del caso aislado de tueste claro a 15°C, sumando a que sus parámetros resultaron en ser necesarios para predecir el comportamiento del fenómeno estudiado.

El *Ajuste 7* junto con *Ajuste 1* logran valores muy altos en el coeficiente de determinación sin alejarse mucho de los valores de AIC mínimos encontrados por lo que justifican de manera satisfactoria su falta de parsimoniosidad con la capacidad de representar cerca del ciento por ciento de variabilidad en la mayoría de los tratamientos, con parámetros que influyen de manera efectiva en sus predicciones. En cuanto al parámetro correspondiente con la cinética del proceso (k) en (18), (12) y (34) se observaron comportamientos acorde con este estudio en donde el valor aumentaba en magnitud de acuerdo al tueste y temperatura de almacenamiento.

5.3.1 Energía de Activación

El cuadro 17 muestra las energías de activación resultantes de cada modelo matemático para cada tratamiento. La tendencia de los valores es de carácter creciente conforme aumenta el grado de tueste fue verdadera solamente para los modelos de *Ajuste 1* y *Ajuste 2*, para el resto solo lo fue entre tueste claro y tueste moderadamente oscuro. No se muestran los resultados del *Ajuste 5* ya que ninguno de sus parámetros mostró verse influido por la temperatura de almacenamiento. Otras energías de activación encontradas al almacenar café tostado a diferentes temperatura corresponden a 73,6 kJ/mol utilizando temperaturas de 25 hasta 45°C en tueste oscuro (12) y 29,73 kJ/mol con temperaturas desde 4 hasta 40°C para tueste oscuro (18).

Cuadro 17. Energía de activación de los diferentes modelos matemáticos.

Modelo	Energía de activación $\left(\frac{kJ}{mol}\right)$		
	Tueste Claro	Tueste Medio	Tueste Moderadamente Oscuro
<i>Ajuste 1</i>	27,50	29,54	34,79
<i>Ajuste 2</i>	29,13	36,11	58,34
<i>Ajuste 3</i>	2,99	1,87	9,74
<i>Ajuste 4</i>	113,62	27,02	40,96
<i>Ajuste 6</i>	34,80	21,82	72,77
<i>Ajuste 7</i>	41,66	7,51	73,63
<i>Ajuste 8</i>	34,80	21,82	72,77
<i>Ajuste 9</i>	9,58	*8,73	82,87

*energía de activación negativa (criterio de eliminación)

Con la finalización de este análisis se distinguen los *Ajustes 1* y *2* como los más aptos para predecir la cinética del CO₂ en el aire ya que cumplen con el principio termodinámico de

energía de activación creciente. Posteriormente se denota un análisis enfocado hacia el *Ajuste 1* ya que fue el determinado como el mejor modelo matemático para describir el proceso de difusión de CO₂ dados sus resultados estadísticos de regresión y energía de activación creciente de acuerdo con el tipo de tueste.

5.3.2 Cinética de la concentración del CO₂ en el aire enfocado en Ajuste 1.

La figura 4 muestra cinco de las 9 regresiones realizadas para los valores observados, contrastando gráficamente el mejor ajuste encontrado, *Ajuste 1*, el peor ajuste encontrado *Ajuste 5*, y algunos de calificación intermedia entre estos dos extremos, *Ajustes 2,3 y 4*. La tendencia de la concentración del CO₂ en el aire es exponencialmente creciente y se aproxima hacia una condición de equilibrio.

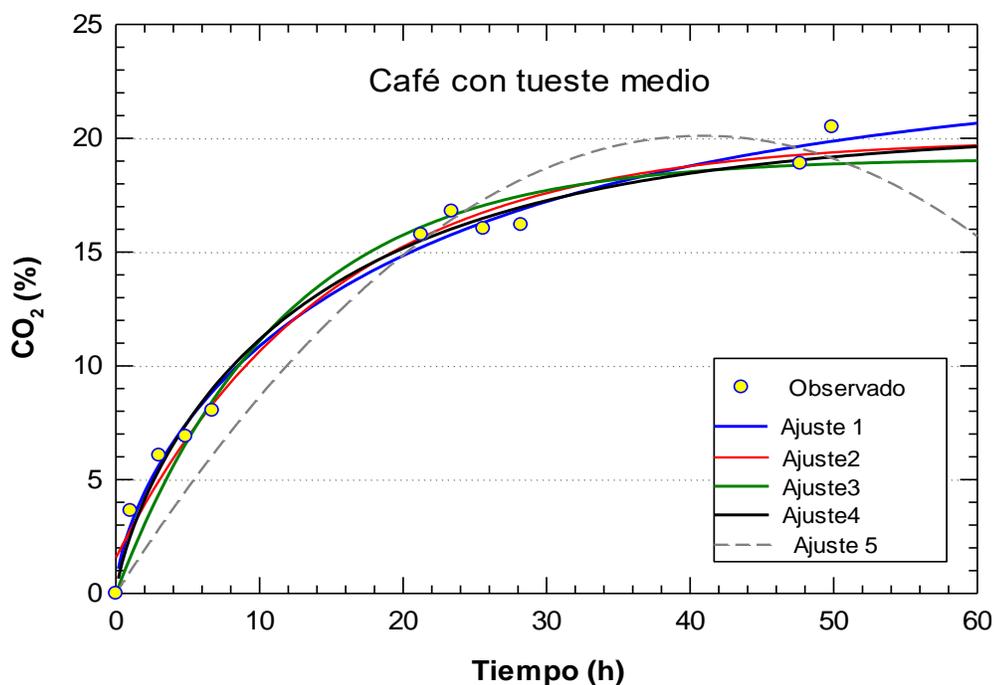


Figura 4. Cinética de la liberación del dióxido de carbono con el almacenamiento a 25°C de los granos de café con tueste medio.

Se destacan dos extremos en los ajustes, siendo el *Ajuste 1* el que representa de mejor forma el fenómeno por su cercanía a los datos observados y el *Ajuste 5* fue el que más se aleja de los valores tanto al inicio, así como al final y debido a su tendencia decreciente. Los *Ajustes 2, 3, y 4* son en apariencia similares y pueden representar la cinética de liberación del dióxido de carbono en este rango estudiado. La selección del mejor ajuste se realizó comparando nueve modelos matemáticos los criterios estadísticos según se indica en el cuadro 18, siendo ocho derivados de las ecuaciones de pérdida de masa y uno propuesto.

Cuadro 18. Análisis estadístico de los modelos matemáticos para el café de tueste medio almacenado a 25 °C.

Ajuste	R ² (%)	k (h)	n	A	b	P regresión	C.R.	AIC
Ajuste 5	92,68	NA	NA	-0,048	0,001	<0,0001	A	9,62
Ajuste 6	96,81	14,050	NA	NA	NA	<0,0001	A	11,34
Ajuste 3	96,81	0,931	NA	NA	NA	<0,0001	A	11,34
Ajuste 4	98,75	7,623	0,777	NA	NA	<0,0001	A	13,21
Ajuste 7	98,31	15,922	NA	0,917	NA	<0,0001	A	14,6
Ajuste 8	96,81	14,050	NA	1,000	1,000	<0,0001	A	15,34
Ajuste 1	99,06	8,174	0,702	0,987	0,000*	<0,0001	A	15,77
Ajuste 2	98,35	14,775	NA	0,899	0,024*	<0,0001	A	16,65
Ajuste 9	99,27	0,336*	NA	0,135	17,225	<0,0001	A	18,28

* *parámetro no significativo.*

NA = parámetro no aplica para esa ecuación.

C.R. = comportamiento de residuos, A = aleatorios, T = tendenciosos.

AIC = Criterio de Información de Akaike.

El cuadro 18 muestra el análisis estadístico de los ajustes realizados en orden ascendente del valor de AIC, siendo el menor valor, el más parsimonioso, el Ajuste 5 y el Ajuste 9 como mayor valor, el menos parsimonioso. Se observó una correspondencia del coeficiente de

determinación (R^2) con el aumento del valor de AIC en la mayoría de los ajustes.

El *Ajuste 1* fue escogido como la ecuación más adecuada para representar la desgasificación del dióxido de carbono en el aire, debido a su alto coeficiente de determinación con 99,06 % aunque fue el segundo más alto, el mayor fue el *Ajuste 9* con 99,27 %. De acuerdo con el criterio de AIC categorizó entre los ajustes de mayor valor, lo que sugiere que el modelo es menos parsimonioso en comparación con los demás ajustes utilizados. Sin embargo, la predicción del fenómeno es justificada por la estabilidad y cercanía de sus bandas de confianza como se observa en la figura 5.

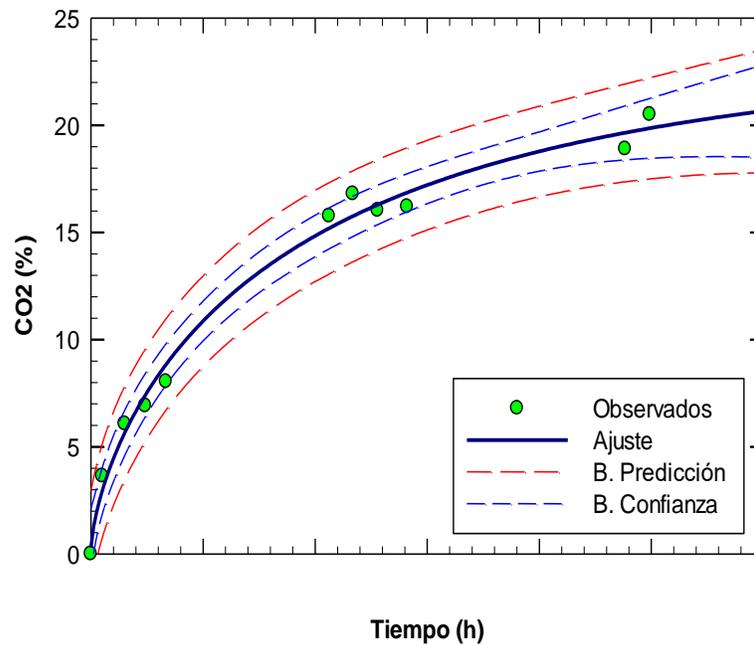


Figura 5. Cinética de la liberación del dióxido de carbono con el almacenamiento a 25°C de los granos de café con tueste medio.

La proximidad de los límites de confianza no fue observada en los otros ajustes, a pesar de que cumplieron satisfactoriamente con los criterios estadísticos y entre ellos la aleatoriedad

en la distribución de sus residuos ilustrada en la figura 6 para el *Ajuste 1*.

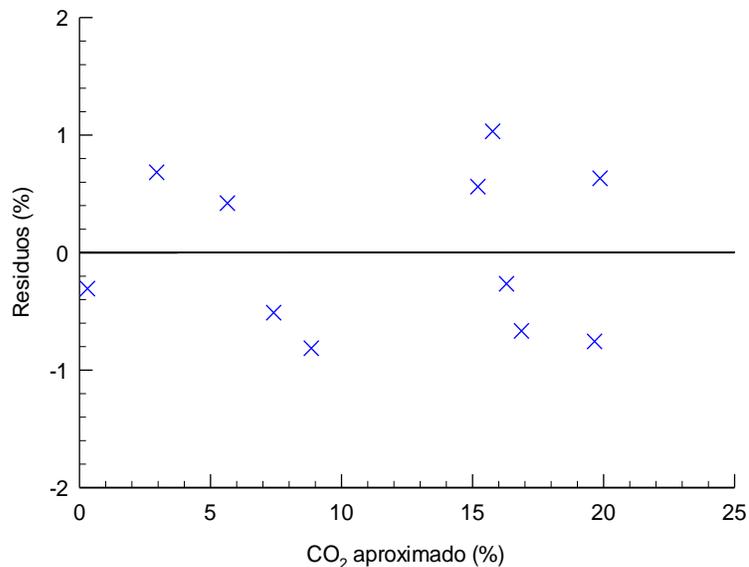


Figura 6. Análisis de los residuos para el ajuste de la cinética del dióxido de carbono a 25°C.

La aleatoriedad de sus residuos o falta de un patrón en la tendencia, sugiere que el modelo es adecuado y no existió la necesidad de realizar transformaciones a las variables (35), además las magnitudes de estos se mantienen dentro de un rango muy pequeño de magnitud. La distribución de los residuos presentó un comportamiento aleatorio en todos los ajustes y la significancia de la regresión existió también en todos los casos según el cuadro 1.

El ajuste 1 fue adaptado a partir de la ecuación Midilli con tres parámetros, pero su parámetro b no resultó significativo ($P=0,98$) por lo que se puede prescindir de este parámetro ya que no aporta numéricamente a la predicción del fenómeno, en otras palabras no se puede asegurar que sea diferente de cero (36), así se obtiene la (ec 16).

$$C_{CO_2} = 20,5 \left\{ 1 - [0,987 \exp\left(-\frac{t^{0,702}}{8,174}\right)] \right\} \quad (\text{ec.16})$$

La (ec.16) es un modelo simplificado para representar la concentración de dióxido de carbono en el aire y proveniente del café con tueste medio almacenado a 25 °C. Las tres modificaciones de la ecuación original de transferencia de masa fueron: la tendencia creciente hacia un valor máximo, la rapidez asociada al denominador del tiempo y la eliminación completa de un factor.

5.4 Efecto de la temperatura de almacenamiento en el fenómeno de difusión del CO₂ en el aire.

Se observa en la figura 7 las tres condiciones de temperatura para el almacenamiento de los granos de café con tueste medio.

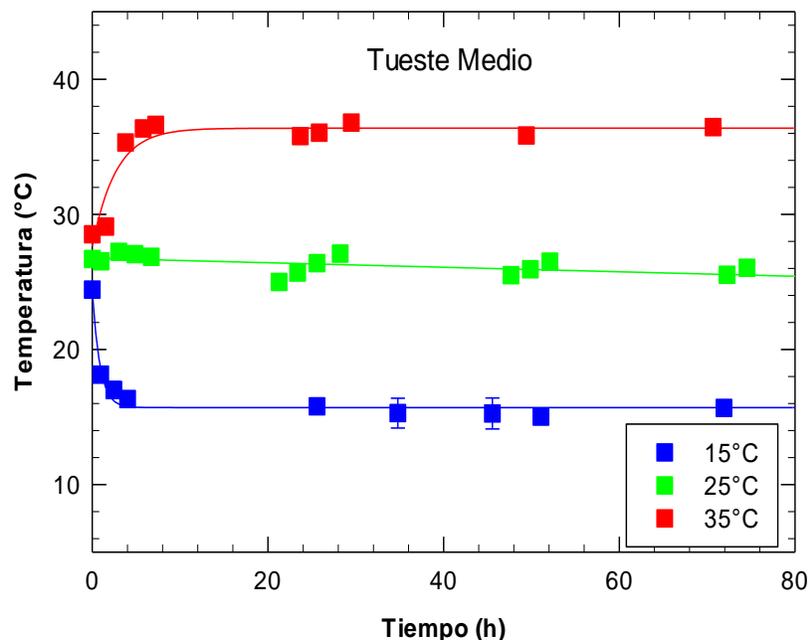


Figura 7. Condiciones internas del aire durante el almacenamiento para los granos de café.

La cámara de almacenamiento se programó para 15 °C y la muestra se estabilizó a $16,90 \pm 0,43$ °C en 4,01 h. La temperatura teórica de 25 °C en la cámara, se registró el promedio a

26,27±0,76 °C que se mantuvo constante durante toda la prueba y para el experimento a 35 °C se estabilizó en 3,77 h con una temperatura promedio de 34,53±3,14 °C. La temperatura en cada tratamiento después de 4 h varió en menos de 1 °C, es decir que se garantizó estabilidad de temperatura durante el experimento

Los granos enteros recién tostados liberaron dióxido de carbono al aire en función del tiempo, se ajustaron las nueve ecuaciones para cada temperatura según el Cuadro 19.

Cuadro 19. Resumen estadístico de los modelos matemáticos para el café de tueste medio almacenado a 15 y 35 °C.

Tratamiento	Ajuste	R ² (%)	k (h)	n	a	b	P regresion	C.R.	AIC
15 °C	Ajuste 5	86,48	NA	NA	-0,050	0,001	<0,0001	A	11,68
	Ajuste 6	94,05	9,213	NA	NA	NA	<0,0001	A	13,32
	Ajuste 3	94,05	0,897	NA	NA	NA	<0,0001	A	13,32
	Ajuste 4	98,38	5,182	0,681	NA	NA	<0,0001	A	15,92
	Ajuste 7	96,05	14,100	NA	0,898	NA	<0,0001	A	16,14
	Ajuste 8	94,05	9,213	NA	1,000	1,000	<0,0001	A	17,32
	Ajuste 1	98,64	4,738	0,566	1,001	0,000	<0,0001	A	18,27
	Ajuste 2	97,33	7,402	NA	0,858	0,102*	<0,0001	A	18,93
	Ajuste 9	98,38	17,954	NA	0,770	1,034*	<0,0001	A	19,93
35 °C	Ajuste 5	90,94	NA	NA	-0,400	0,000	<0,0001	A	8,55
	Ajuste 6	96,65	15,073	NA	NA	NA	<0,0001	A	10,55
	Ajuste 3	96,65	0,936	NA	NA	NA	<0,0001	A	10,55
	Ajuste 4	97,69	9,540	0,830	NA	NA	<0,0001	A	11,29
	Ajuste 7	97,38	16,705	NA	0,938	NA	<0,0001	A	13,04
	Ajuste 1	97,92	9,228*	0,789	0,989	0,001	<0,0001	A	13,50
	Ajuste 9	96,65	15,000*	NA	1,000*	15,00*	<0,0001	A	14,55
	Ajuste 8	96,65	15,073	NA	1,000	1,000	<0,0001	A	14,55
	Ajuste 2	97,38	16,722	NA	0,939	-0,000*	<0,0001	A	15,04

* *parametro no significativo.*

NA = parametro no aplica para esa ecuacion.

C.R. = comportamiento de residuos, A = aleatorios, T = tendenciosos.

AIC = Criterio de Informacion de Akaike.

Los valores observados ajustaron adecuadamente con el *Ajuste 1* basado en el máximo coeficiente de determinación con 98,64 y 97,92 % para las temperaturas de 15 y 35 °C, respectivamente. El valor del criterio de AIC en ambas temperaturas obtuvo valores intermedios respecto a todo el rango estudiado y la distribución de residuos fue aleatoria.

Se notó que a las temperaturas de 15°C y 35 °C el parámetro k del *Ajuste 1* resultó no significativo $P=0,062$ y $P=0,056$ respectivamente, sin embargo al estar tan cerca del valor de tolerancia $P=0,05$ y tomando en consideración que la muestra era menor de 30 datos, se podría estar cometiendo un error Tipo II al considerar este parámetro como no significativo, cuando en realidad sí existe una relación significativa de esta variable con las demás (36). Y nuevamente el parámetro (a) resultó con valores muy cercanos a cero por lo que a pesar de resultar significativo no aporta información útil hacia la predicción del fenómeno de difusión de CO_2 .

La determinación de la concentración del dióxido de carbono equilibrio (C_e) requirió que fueran depuradas las mediciones que superaron un déficit mayor a 0,5 %, ya que la perforación del recipiente durante las mediciones produjo fugas de gas significativas.

Los granos de café con el mismo nivel de tueste liberan CO_2 en las temperaturas de almacenamiento estudiadas, la tendencia fue exponencialmente creciente hasta alcanzar una condición de equilibrio máxima como se observa en la figura 8.

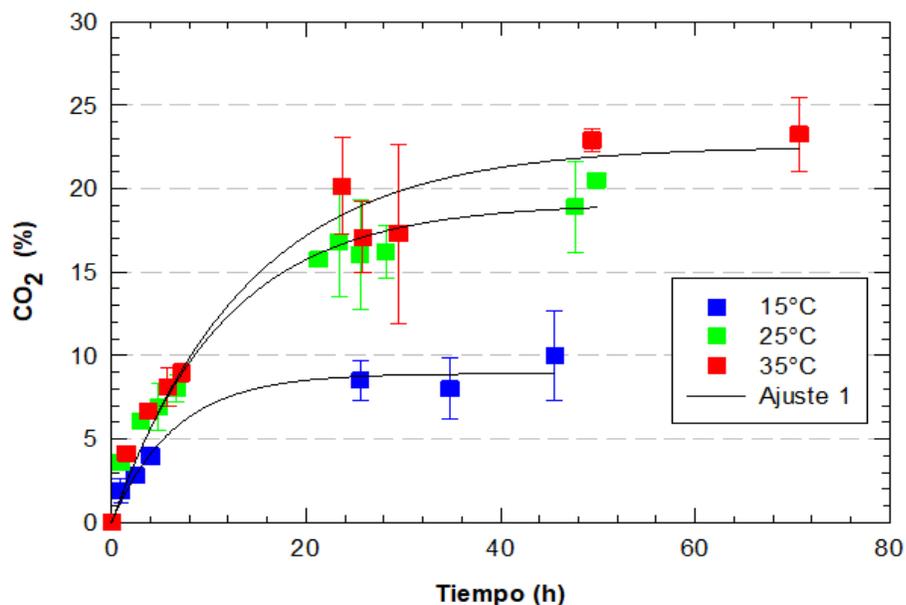


Figura 8. Cinética de la concentración de CO₂ en el aire para el grano con tueste medio.

La concentración máxima de CO₂ dependió de las condiciones de almacenamiento, alcanzando 10,00±2,68 % (7,25 mg/g_{café}); 20,50±2,72 % (14,87 mg/g_{café}) y 23,25±2,19 % (16,82 mg/g_{café}) para 15, 25 y 35 °C; respectivamente. Los tiempos de observación en ese orden fueron 45,5, 49,9 y 70,7 h. Es decir, que en menos de tres días la concentración de dióxido de carbono en el aire se estabiliza para efectos de medición de la concentración en una muestra sin alterar.

La desviación estándar en todo el experimento se mantuvo semejante entre las temperaturas con promedio 2,53 %; se observó una baja concentración CO₂ en el aire 15 °C con respecto a mayores temperaturas estudiadas. El almacenamiento realizado a 15°C redujo en gran medida la cantidad de CO₂ liberado a en comparación con la temperatura de 25 °C se determinó una reducción de 51,22 %, a la temperatura de 35 °C se tuvo un aumento de 13,17

%.

La mayor tasa de liberación de CO₂ ocurre en menos de 24 h, lo que implica que las empresas destinadas a la torrefacción deben reposar el café recién tostado antes de empacarlo, porque aumentará la concentración de CO₂ en el aire y consecuentemente aumentará la presión interna generando un aumento de volumen del producto empacado (37). La reducción de la temperatura muestra ser una alternativa viable para evitar este problema y conservar componentes aromáticos dentro del grano.

El parámetro (*k*) asociado a la rapidez del proceso se determina para cada cinética del CO₂, se observa en el Cuadro 20 que su valor presenta una relación directamente proporcional con la temperatura de almacenamiento, por lo tanto, es necesario transformar los valores para aproximarlos a una línea recta según la ecuación de Arrhenius.

Cuadro 20. Relación entre la rapidez del proceso con la temperatura de almacenamiento.

² T (°C)	T (K)	T ⁻¹ (10 ⁻³ K ⁻¹)	¹ k (h)	ln (k)
16,90	290,05	3,448	4,738	1,555
26,27	299,42	3,340	8,174	2,101
34,53	307,68	3,250	9,228	2,222

¹k (h) = parámetro (*k*) determinado por la regresión del ajuste

²T(°C) = temperatura de almacenamiento medida.

La ecuación de Arrhenius ajustó con una línea decreciente y un coeficiente de determinación de 91,34 %, entre la constante cinética (k) y la temperatura según la figura 9.

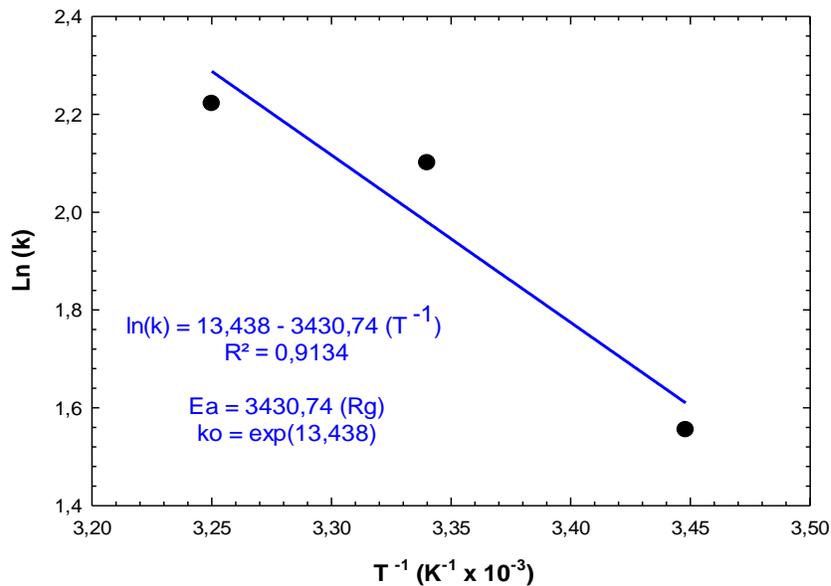


Figura 9. Relación entre la rapidez del proceso con la temperatura de almacenamiento.

La pendiente de la regresión lineal está relacionada con la energía de activación que fue calculada en 28 524,9 J/mol y la intersección de la línea con el eje vertical da un factor pre-exponencial de 685 848,2 h, estas constantes determinan la ecuación 8.

La energía de activación requerida para liberar el dióxido de carbono del café recién tostado al aire en el tueste medio fue de 28,52 kJ/mol, se encuentra entre los valores reportado para las pérdidas de volátiles café tostado 28,1 kJ/mol (15) y 29,73 kJ/mol para el CO₂ residual en los granos (18). La diferencia menor a 2 kJ/mol no es significativa para un mismo mecanismo medido por dos metodologías diferentes (27); por lo tanto, se considera como un

resultado satisfactorio y valida los resultados de esta investigación con la metodología de la medición del CO₂ en el aire.

La interpretación física concuerda con otras investigaciones en relación al café, si se compara con la magnitud de la energía de activación de la desgasificación de los granos de café con la de la pérdida de masa durante el tueste de café 52,27 kJ/mol (32), se infiere que para iniciar la pérdida de masa durante el tueste requiere más energía que la desgasificación de los granos tostados.

La (ec.17) permite aproximar la rapidez de la concentración del CO₂ a cualquier temperatura de almacenamiento utilizando el *Ajuste 3* para el café con tueste medio.

$$k = 685.848,2 * \exp\left(\frac{-28.524,9}{8,3145 (T+273,15)}\right) \quad (\text{ec. 17})$$

En la figura 10 se muestra la relación lineal entre la temperatura de almacenamiento y la concentración en equilibrio de CO₂, en contacto con los granos de café con tueste medio con coeficiente de 95,97 %.

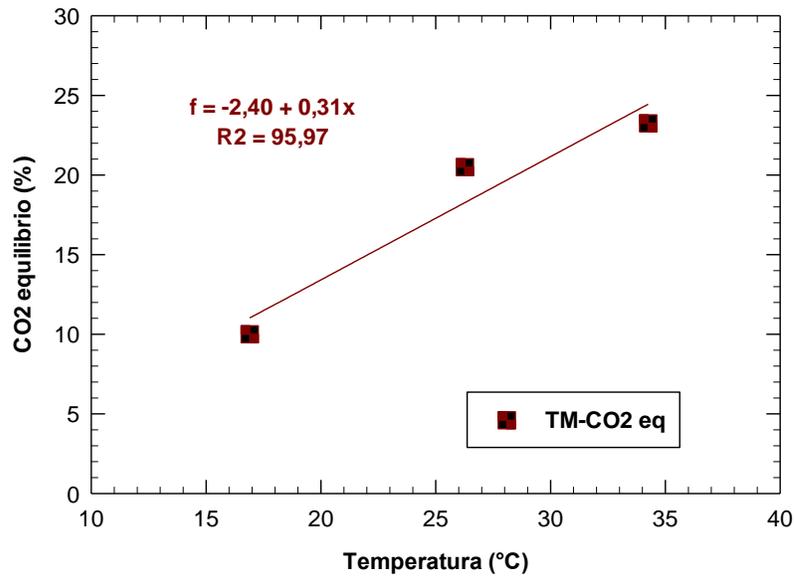


Figura 10. Concentración final de CO₂ en función con la temperatura del café tostado.

Los granos de café con tueste medio liberaron menos CO₂ cuando se almacenaron a 15 °C, la razón obtenida en el ajuste lineal fue 0,31 %/°C. Los resultados están de acuerdo con otras investigaciones donde se observó que la temperatura afectó los granos almacenados a 40 °C liberaron 10,0 % más que los almacenados a 20 °C en un mismo nivel de tueste medio (35). El análisis de la concentración de equilibrio con la temperatura en la ecuación Arrhenius presenta un ajuste lineal adecuado con coeficiente de determinación del 98,24 %, figura 11.

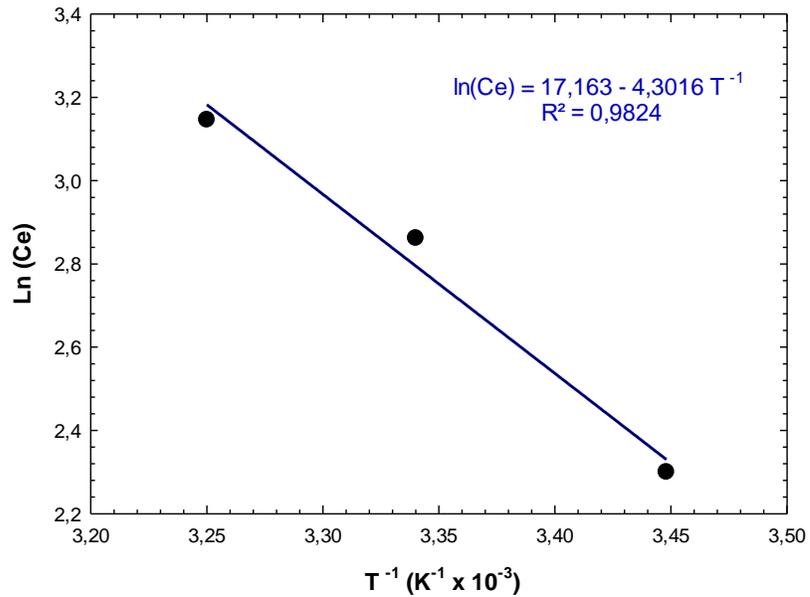


Figura 11. Gráfica de Arrhenius ln (Ce) vs T⁻¹, para tueste medio.

La (ec.18) permite aproximar la concentración máxima CO₂ a cualquier temperatura de almacenamiento para los granos de café con tueste medio.

$$C_e = 48.427.610,05 * \exp\left(\frac{-35.765,47}{8,3145 (T+273,15)}\right) \quad (\text{ec.18})$$

La determinación de C_e las mediciones que superaron un déficit mayor a 0,5 % fueron depuradas del análisis, ya que señalizaban fugas de gas significativas provocadas al efectuar la perforación del recipiente cuando se tomaron las mediciones.

La figura 12 muestra como el parámetro (n) se encuentra fuertemente relacionado con la temperatura de almacenamiento con coeficiente de determinación de 98,65 %.

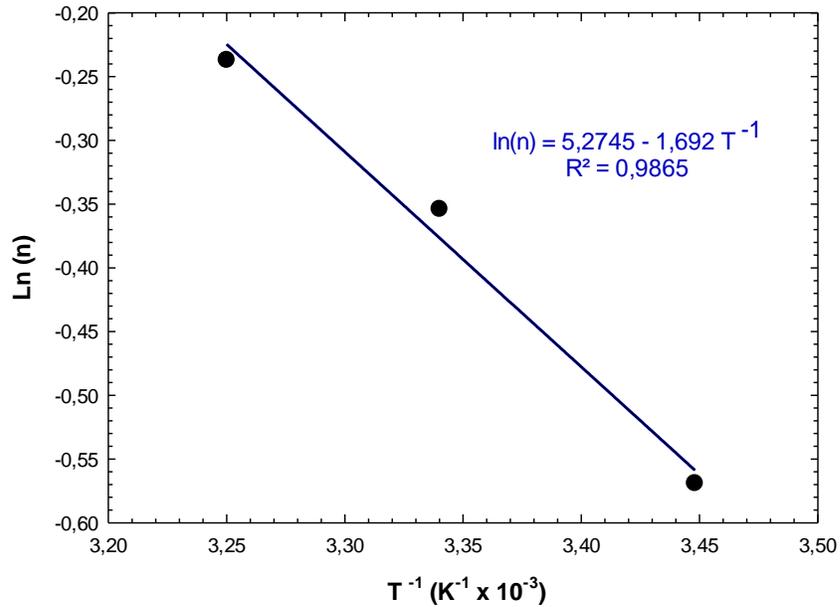


Figura 12. Ajuste del exponente (n) del *Ajuste 1* en función con la temperatura.

La transformación de la pendiente y la intersección de la línea permite establecer la (ec.19) utilizando la ecuación de Arrhenius para adaptar el efecto de la temperatura.

$$n = 195,29 * \exp\left(\frac{-14.067,99}{8,3145 (T+273,15)}\right) \quad (\text{ec.19})$$

El coeficiente (a) del *Ajuste 1* se mantuvo similar con respecto a la variación de la temperatura y por lo tanto se calculó un valor promedio de 0,992. Los tres parámetros dependientes de la temperatura fueron representados por la ecuación de Arrhenius y se ajustaron con un coeficiente de determinación mayor que 98 %, obteniendo así la (ec.20).

$$C = 48.427.610,05 * \exp\left(\frac{-35.765,47}{8,3145(T+273,15)}\right) \left\{ 1 - 0,992 * \exp\left(-\frac{t^{195,29 * \exp\left(\frac{-14.067,99}{8,3145(T+273,15)}\right)}}{685.848,2 * \exp\left(\frac{-28.524,9}{8,3145(T+273,15)}\right)}\right)\right\} \text{ (ec20)}$$

La ecuación general para la predicción de la concentración de CO₂ en el aire, proveniente del café con tueste medio depende de dos variables del tiempo y la temperatura de almacenamiento, mientras que la constante de rapidez (*k*), la concentración máxima de equilibrio (*C_e*) y el exponente *n* fueron afectados proporcionalmente con la temperatura de almacenamiento. El análisis ahora se concentrará en verificar si el modelo se aplica a otros niveles de tueste, ya que la estructura interna es diferente.

5.4.1 Análisis para tueste moderadamente oscuro

En la figura 13 se muestran las temperatura durante los experimentos con las muestras de tueste moderadamente oscuro. Para el tratamiento programado a 15 °C se registró una temperatura promedio de 17,18±3,84 °C y se estabilizó a los 3,08 h Para el tratamiento programado a 25 °C se registro una temperatura promedio de 27,40±1,72 °C, se mantuvo estable durante todo el experimento. Para el tratamiento programado a 35 °C se registró una temperatura promedio de 34,09±2,78 °C y se estabilizó a los 3,58 h.

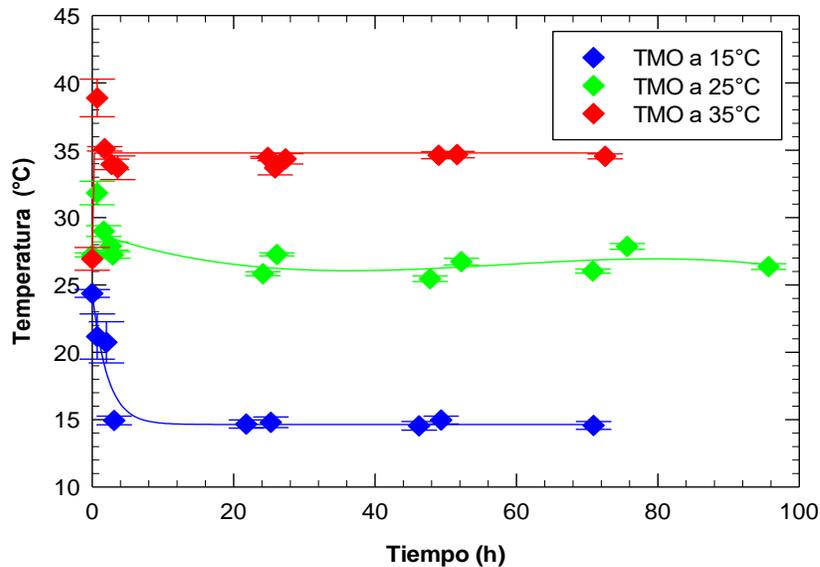


Figura 13. Temperatura interna del aire durante el almacenamiento de los granos de café con tueste moderadamente oscuro.

El equilibrio térmico en el aire intergranular se alcanzó en menos de 3,6 h en el café con tueste moderadamente oscuro, se puede inferir que los granos moderadamente oscuros tienen mayor área superficial y mejoró la rapidez en el intercambio de temperatura entre el grano y el aire, lo que se reflejó en la expansión de los granos y en el aumento de la porosidad tanto externa como la interna.

La cinética del CO₂ a partir del café con tueste moderadamente oscuro se observa en la figura 14. La concentración se equilibró en $12,16 \pm 3,95$ % ($8,82 \text{ mg/g}_{\text{café}}$), $20,40 \pm 3,39$ % ($14,7 \text{ mg/g}_{\text{café}}$), $28,90 \pm 4,63$ % ($14,79 \text{ mg/g}_{\text{café}}$) para las condiciones de almacenamiento de 15, 25 y 35 °C; respectivamente. Los tiempos en ese orden fueron 21,76, 47,76 y 51,58 h.

El almacenamiento realizado a 15°C redujo notablemente la cantidad de CO₂ liberado a en comparación con la temperatura de 25 °C se determinó una reducción de 40,39 % y a la temperatura de 35 °C se tuvo un aumento de 41,67 %.

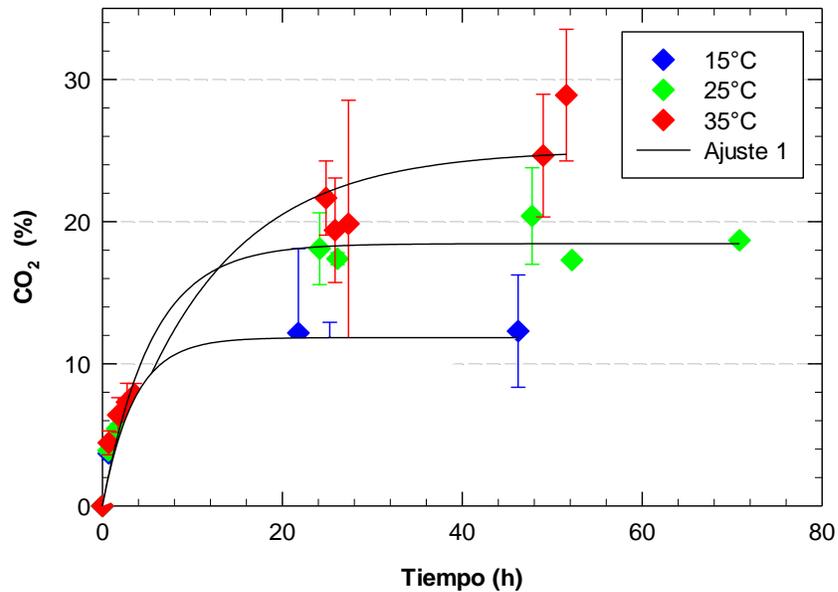


Figura 14. Cinética de la concentración de CO₂ en el aire con el grano moderadamente oscuro.

Los granos con tueste oscuro liberan dióxido de carbono hacia el aire y aumentan la concentración en el interior del recipiente hasta equilibrarse en un valor que dependerá de la temperatura como se observa en la figura 15.

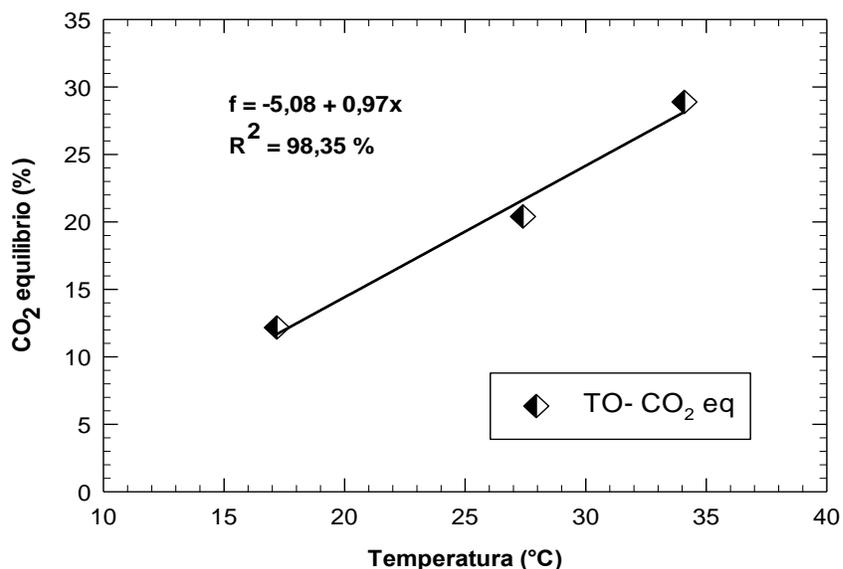


Figura 15. Relación entre la concentración del CO₂ con la temperatura café tueste moderadamente oscuro.

El cuadro 21 muestra los resultados de realizar el mismo procedimiento que en el tueste medio para llegar a una ecuación general de la cinética de CO₂, para el tueste moderadamente oscuro.

Cuadro 21. Contantes para la construcción de la ecuación general para tueste moderadamente oscuro.

Relación	Ecuación	R ²	Ea (kJ/mol)	A (h)
$\ln(Ce) \rightarrow f(1/T)$	$f(x)=-4609x+18,37$	98,83	38,32	$9,52 \times 10^7$
$\ln(k) \rightarrow f(1/T)$	$f(x)=418,6x-15,46$	85,15	34,79	$5,21 \times 10^6$
$\ln(n) \rightarrow f(1/T)$	$f(x)=1184,5x-4,43$	22,63	-9,85	84,76
$\ln(a) \rightarrow f(1/T)$	$f(x)=-30,16x+0,089$	9,24	0,25	1,09

5.4.2 Análisis para tueste claro

En la figura 16 se muestra las condiciones de la temperatura durante los experimentos llevados a cabo con las muestras de tueste claro. Para el tratamiento programado a 15 °C se registró una temperatura promedio de $17,72 \pm 3,58$ °C y se estabilizó a los 3,98 h. Para el tratamiento programado a 25 °C se registró una temperatura promedio de $25,95 \pm 0,86$ °C, se mantuvo estable durante todo el experimento. Para el tratamiento programado a 35 °C se registró una temperatura promedio de $34,53 \pm 2,92$ °C y se estabilizó a los 5,88 h.

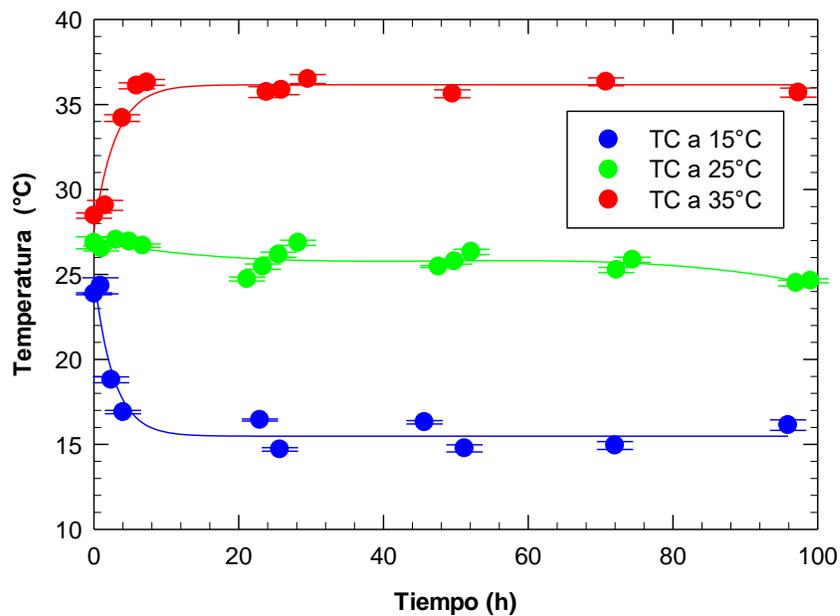


Figura 16. Temperatura interna del aire durante el almacenamiento del café con tueste claro.

El equilibrio térmico entre los granos y el aire se alcanzó en menos de 6 h en el café con tueste claro, debe mencionarse que la cantidad de aire representada en la porosidad es similar en los granos tostados sin ser afectada por los niveles de tueste (25).

En la figura 17, se observan los valores de CO₂ determinados experimentalmente y el ajuste matemático para representar la cinética de concentración del dióxido de carbono usando granos con tueste claro en las tres temperaturas de almacenamiento.

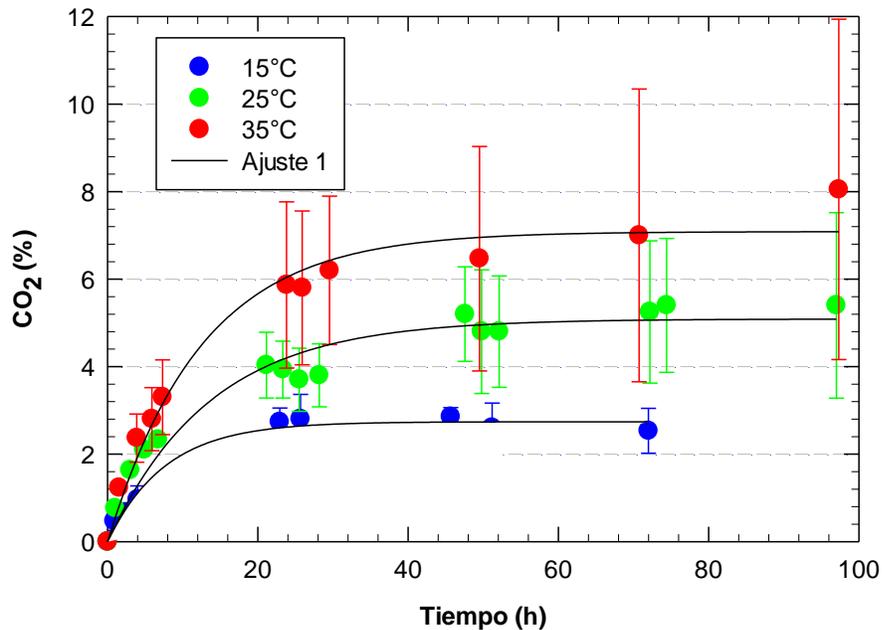


Figura 17. Cinética de la concentración de CO₂ en el aire para el grano con tueste claro.

La cinética de la concentración del CO₂ en el aire es afectada por la temperatura de almacenamiento, la mayor concentración del dióxido de carbono se registró con el aumento de la temperatura de almacenamiento de los granos de café con tueste claro. Considerando el orden creciente de la temperatura de 15, 25 y 35 °C las concentraciones se estabilizaron en $2,80 \pm 0,56$ % ($2,03 \text{ mg/g}_{\text{café}}$), $5,40 \pm 1,50$ % ($3,92 \text{ mg/g}_{\text{café}}$) y $8,00 \pm 3,88$ % ($5,80 \text{ mg/g}_{\text{café}}$) con tiempos de 17,7, 34,5 y 95,0 h; respectivamente.

El almacenamiento realizado a 15°C redujo notablemente la cantidad de CO₂ liberado a en comparacion con la temperatura de 25 °C, se determinó una reducción de 48,15 %. Al comparar las temperatura de 25 °C y 35 °C se tuvo el caso contrario con un aumento igualmente proporcional de 48,15%.

Las mediciones hechas con el medidor de gases inevitablemente generaron pérdidas de gas al perforar los sellos de los recipientes con las muestras añadiendo a la perdida causada por la succión de equipo, por esa razón la desviación estándar aumentó conforme aumentó la concentración de CO₂ en el aire, generando mayores pérdidas.

Se estableció la relación lineal entre la concentración del dióxido de carbono de equilibrio y la temperatura de almacenamieno, mostrada en la figura 18.

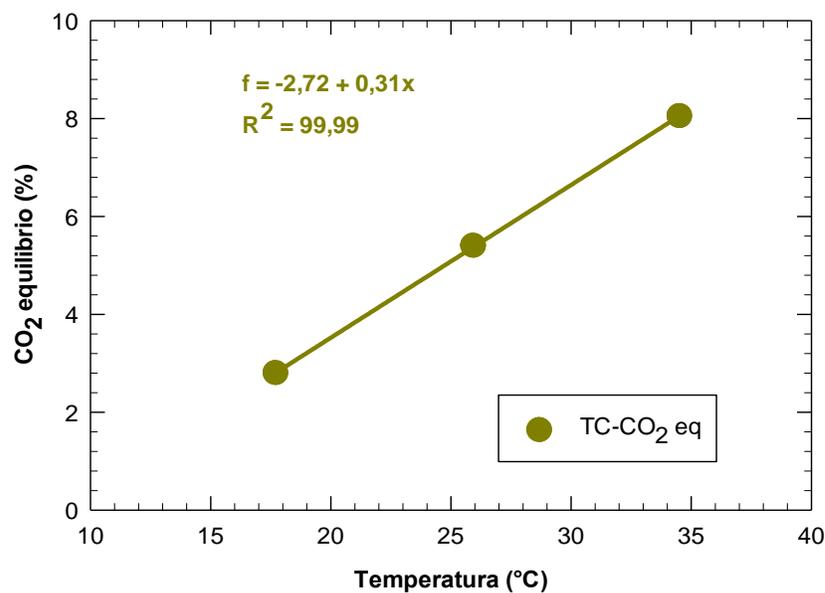


Figura 18. Concentración de equilibrio del CO₂ con la temperatura del café con tueste claro.

Los granos de café con tueste claro liberaron menos CO₂ al ambiente cuando se almacenaron a la temperatura más baja 15 °C, la liberación entre 2 y 8 % de CO₂ ocurre a una tasa constante de 0,31 % por cada 1 °C con una aproximación del 99,99 %.

El cuadro 22 muestra los resultados de realizar el mismo procedimiento que en el tueste medio para llegar a una ecuación general de la cinética de CO₂, para el tueste claro. Debido a que la relación de los parámetros (*k*) no cumplió con ser de carácter creciente a través de las tres temperaturas por igual como se mencionó previamente, este resultado cuenta con un margen de error superior a los otros dos tuestes.

Cuadro 22. Contantes para la construcción de la ecuación general para tueste claro.

Relación	Ecuación	R ²	Ea (kJ/mol)	A (h)
$\ln(Ce) \rightarrow f(1/T)$	$f(x)=-5590x+20,29$	98,05	46,48	$6,49 \times 10^8$
$\ln(k) \rightarrow f(1/T)$	$f(x)=236,2x-6,685$	35,09	27,5	800,63
$\ln(n) \rightarrow f(1/T)$	$f(x)=2939,1x-10,03$	55,04	24,44	2,26
$\ln(a) \rightarrow f(1/T)$	$f(x)=-244,1x+0,8016$	70.31	2,03	2,23

5.5 Efecto del nivel de tueste en la cinética de la desgasificación del CO₂.

El cuadro 23 muestra los resultados de la concentración de equilibrio observados para los diferentes tuestes almacenados a una misma temperatura. A la temperatura de 15°C se determinó que el tueste calro liberó un 72,00 % menos de CO₂ que el tueste medio y el tueste moderamente oscuro liberó 21,60 % mas de gas. A la temperatura de 25°C se determinó que el tueste calro liberó un 73,66 % menos de CO₂ que el tueste medio y el tueste moderamente oscuro resultando en valores muy similares solamente liberó un 0,49 % más de gas. A la

temperatura de 35°C se determinó que el tueste claro liberó un 65,52 % menos de CO₂ que el tueste medio y el tueste moderadamente oscuro liberó 24,57 % mas de gas que el tueste medio.

Cuadro 23. Comparación de CO₂ según el tipo de tueste a una misma temperatura de almacenamineto.

Temperatura	Tueste	CO ₂ (%)	CO ₂ (mg/g _{café})
15 °C	TC	2,80 ± 0,56	2,03 ± 0,56
	TM	10,00 ± 2,68	7,25 ± 2,68
	TMO	12,16 ± 3,95	8,82 ± 3,95
25 °C	TC	5,40 ± 1,50	3,92 ± 1,50
	TM	20,50 ± 2,72	14,87 ± 2,72
	TMO	20,40 ± 3,39	14,79 ± 3,39
35 °C	TC	8,00 ± 3,88	5,80 ± 3,88
	TM	23,25 ± 2,19	16,82 ± 2,19
	TMO	28,90 ± 4,63	20,96 ± 4,63

Los resultados contrastan con otras investigaciones (12), se notó un aumento del 65,3 % al pasar de tueste claro a tueste oscuro a 25 °C con tiempo de equilibrio en 48 h. Por otra parte; al comparar el tueste claro y el tueste oscuro observó un aumento de 16,2 % a una temperatura de 23 °C en 1560 h (16). Finalmente el aumento en dióxido de carbono liberado al comparar los valores entre tueste medio y tueste oscuro a 25°C fue de 44,7 % y el tueste medio llegó al equilibrio en 335,2 h y el tueste oscuro en 305,3 h (18). La concentración del dióxido de carbono puede afectar los resultados entre investigaciones debido a la variación de la constitución química de las biomásas utilizadas, contenidos de humedad inicial, las variedades de café y hasta el equipo de tueste empleado.

Los granos de café con tueste moderadamente oscuro liberaron dióxido de carbono a una razón de 0,97 % por cada 1 °C, lo cual es tres veces la proporción tanto en el tueste claro como en el tueste medio. Los resultados obtenidos son similares a otras investigaciones (34), donde se obtuvo que el nivel de tueste oscuro liberó el 34,4 % más que los granos de tueste medio almacenados a 25 °C.

Los resultados son congruentes entre las cinéticas desarrolladas, los granos tostados liberaron dióxido de carbono en todos los tratamientos, la emisión de CO₂ al aire aumentó con el nivel de tueste y con la elevación de temperatura de almacenamiento. Se recomienda que la desgasificación del CO₂ en los granos se puede disminuir almacenando el café a bajas temperaturas.

5.6 Efecto de la granulometría en el fenómeno de difusión del CO₂ en el aire.

En la figura 19 se muestran los resultados de la distribución de partícula en las dos moliendas utilizadas, en la molienda fina predominó el tamiz # 20 mientras que en la gruesa predominó el tamaño #40.

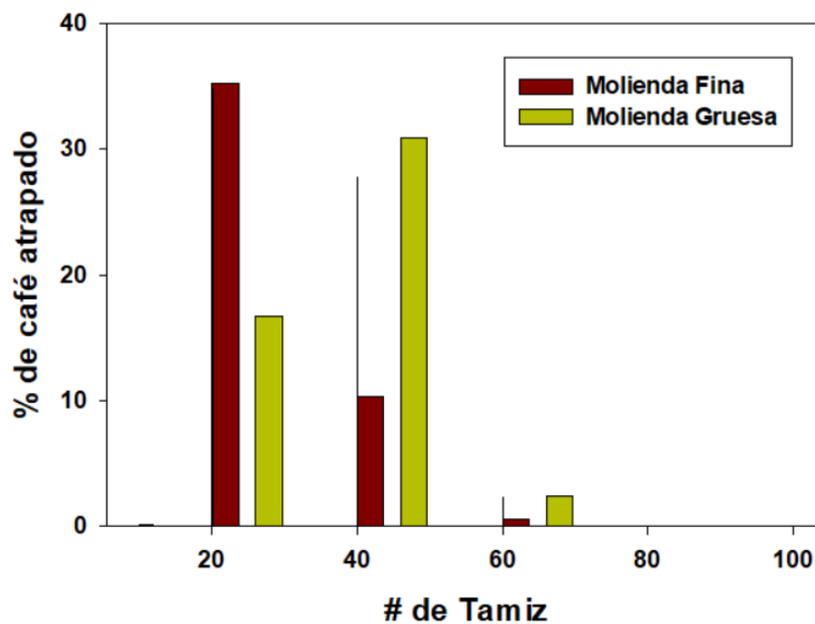


Figura 19. Distribucion de tamaño de partícula de la moliendas utilizadas.

La figura 20 muestra los resultados de las concentraciones de CO₂ para los tratamientos de molienda gruesa y molienda fina. La molienda gruesa llegó al equilibrio con una concentración de $20,30 \pm 3,42$ % ($14,72$ mg/g_{café}) en un tiempo de 23,98 h, mientras que la molienda fina alcanzó el equilibrio con $15,4 \pm 2,46$ % ($11,17$ mg/g_{café}) en un tiempo de 1,76 h.

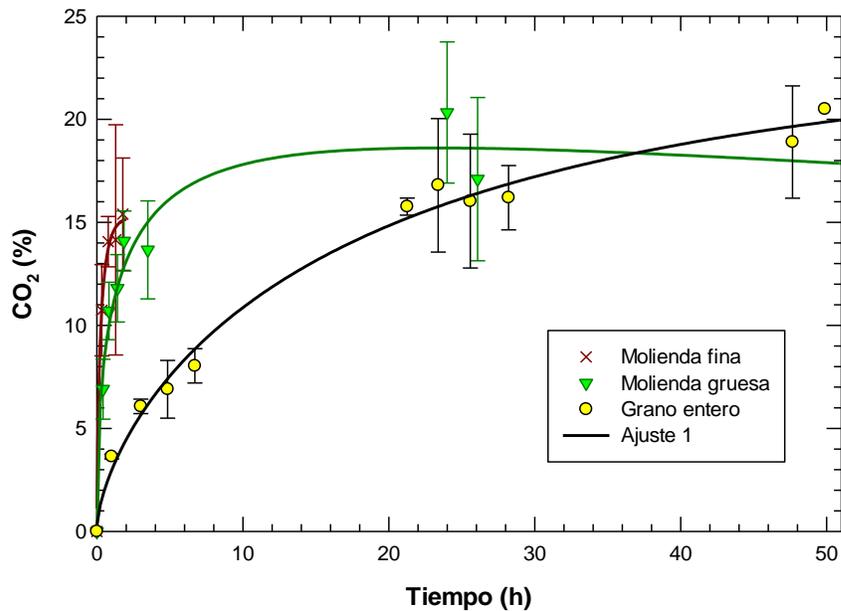


Figura 20. Efecto de la molienda de los granos de café en liberación del CO₂.

En comparación con los obtenidos para el grano entero expuesto en la figura 10 se determinó que la pérdida fue mayor para la molienda fina de un 24,8 %, mientras que para el tratamiento de molienda gruesa el resultado fue muy similar al tueste medio de grano entero, se observó una disminución del 0,9 %. Comparando con lo encontrado por (18) en donde tueste medio de molienda fina libero 87,41 % menos dióxido de carbono que la molienda gruesa. La figura 21 muestra los resultados obtenidos en una escala de tiempo menor para diferenciar de mejor forma el efecto

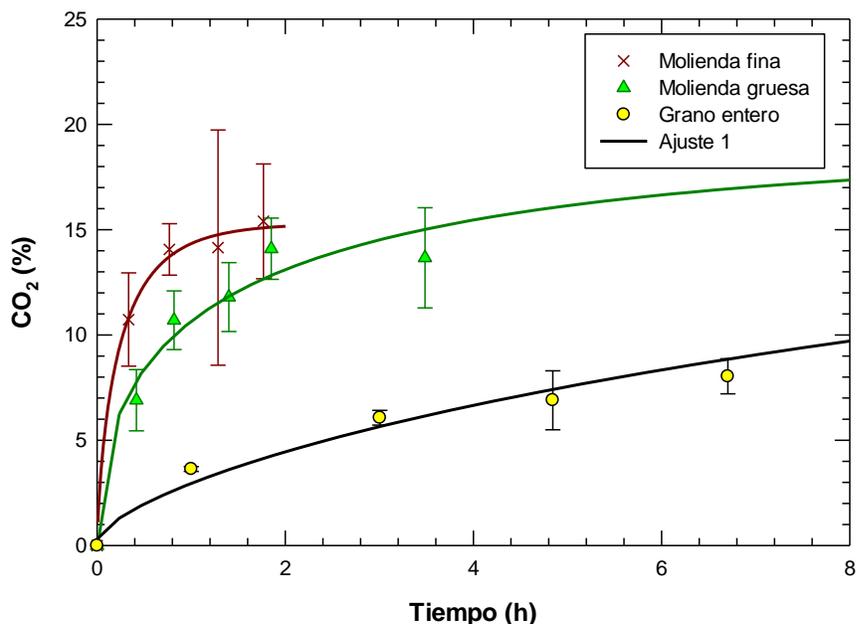


Figura 21. Efecto de la molienda de los granos de café en liberación del CO₂ Tueste medio a 25 °C.

El cuadro 24 muestra los resultados de los parámetros estadísticos, en este caso el orden de acuerdo con el criterio de AIC se mantuvo relativamente igual al de los resultados en las regresiones para los tuestes previamente analizados, al igual que el comportamiento de sus residuos, disponibles para en el Anexos 13 y 14 . Se hace la distinción de que al comparar las magnitudes del parámetro (k) entre las moliendas finas y gruesas, las últimas fueron menores que las primeras, denotando que la rapidez de desgasificación fue mayor en la molienda fina. Sin embargo este comportamiento no fue traducido a los resultados en grano entero, ya que en todos los casos el parámetro (k) devolvió valores mayores contradiciendo las observaciones denotadas en las figuras 25 y 26. Los resultados de este apartado indican que las modificaciones realizadas a los modelos matemáticos no desempeñan de forma eficiente al usarse en grano molido.

Cuadro 24. Parámetros estadísticos obtenidos para los tratamientos de molienda.

Tratamiento	Modelos	R2 (%)	k(h-1)	n	a	b	P regresion	C.R.	AIC
Molienda Fina	Ajuste 5	57,18	NA	NA	-0,3094	0,0112	<0.0001	T	7,32
	Ajuste 6	87,4	1,557	NA	NA	NA	<0.0001	A	9,77
	Ajuste 3	87,4	0,526	NA	NA	NA	<0.0001	A	9,77
	Ajuste 7	89,53	1,883	NA	0,8976	NA	<0.0001	A	12,14
	Ajuste 4	97,76	1,351	0,4919	NA	NA	<0.0001	A	13,22
	Ajuste 8	87,4	1,557*	NA	1	1	<0.0001	A	13,77
	Ajuste 2	91,26	1,273	NA	0,8269	0,1153*	<0.0001	A	14,5
	Ajuste 1	97,91	1,347	0,4562	1,0042	0,0016*	<0.0001	A	15,36
	Ajuste 9	96,19	3,474*	NA	0,659*	0	<0.0001	A	16,16
Molienda Gruesa	Ajuste 5	88,87	NA	NA	-1,695	0,6645	<0.0001	T	10,85
	Ajuste 2	92,5	8,88E-16	NA	0,88	0,1177	<0.0001	T	15,64
	Ajuste 6	99,23	0,2929	NA	NA	NA	<0.0001	A	16,18
	Ajuste 3	99,23	0,0329	NA	NA	NA	<0.0001	A	16,18
	Ajuste 4	99,63	0,3753	0,7173	NA	NA	<0.0001	A	17,63
	Ajuste 7	99,23	0,293	NA	0,996	NA	<0.0001	A	18,19
	Ajuste 1	99,63	0,3692*	0,7316*	1*	-0,002	<0.0001	A	19,64
	Ajuste 9	99,68	0,212*	NA	0,806*	0,9737*	<0.0001	A	21,97
	Ajuste 8	99,23	0,292*	NA	1	1	<0.0001	A	20,18
Grano Entero	Ajuste 5	92,68	NA	NA	-0,048	0,001	<0.0001	A	9,62
	Ajuste 6	96,81	14,050	NA	NA	NA	<0.0001	A	11,34
	Ajuste 3	96,81	0,931	NA	NA	NA	<0.0001	A	11,34
	Ajuste 4	98,75	7,623	0,777	NA	NA	<0.0001	A	13,21
	Ajuste 7	98,31	15,922	NA	0,917	NA	<0.0001	A	14,6
	Ajuste 8	96,81	14,050	NA	1,000	1,000	<0.0001	A	15,34
	Ajuste 1	99,06	8,174	0,702	0,987	0,000*	<0.0001	A	15,77
	Ajuste 2	98,35	14,775	NA	0,899	0,024*	<0.0001	A	16,65
	Ajuste 9	99,27	0,336*	NA	0,135	17,225	<0.0001	A	18,28

* parametro no significativo.

NA = parametro no aplica para esa ecuacion.

C.R. = comportamiento de residuos, A = aleatorios, T = tendenciosos.

AIC = Criterio de Informacion de Akaike.

5.7 Desarrollo y validación de un prototipo microcontrolado para medir CO₂ y otras propiedades en el aire.

La figura 22 muestra la temperatura de almacenamiento promedio de las pruebas llevadas a cabo con el prototipo y con el medidor de gases, para el prototipo microcontrolado la temperatura fue de $25,31 \pm 1,52$ °C y para la llevada a cabo con el medidor de gases $26,27 \pm 0,76$ °C.

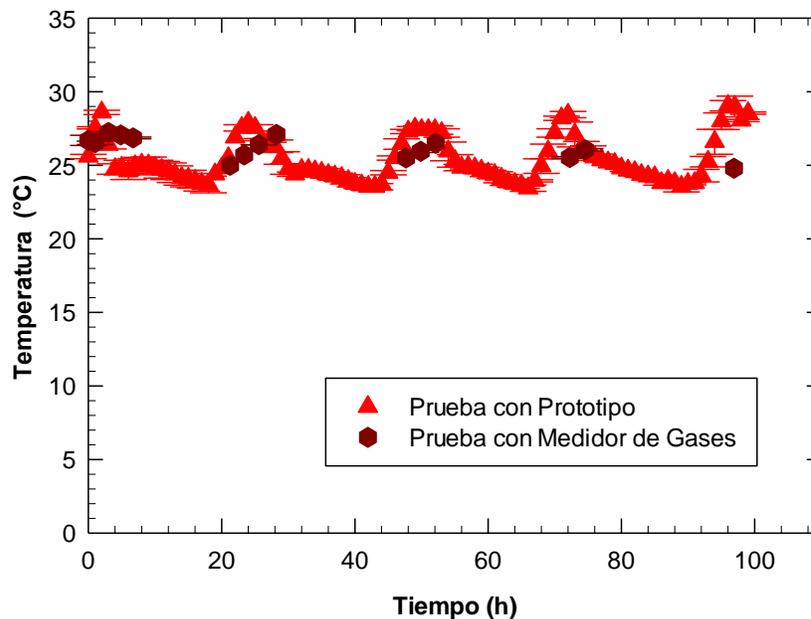


Figura 22. Comportamiento de temperatura para el prototipo microcontrolado, medida con sensores DHT22.

La figura 23 ilustra el comportamiento de la humedad relativa del aire hasta el equilibrio promedio de las pruebas llevadas a cabo con el prototipo y con el medidor de gases en $13,90 \pm 0,42$ % y fue alcanzada a las 40,33 h. En comparación con la humedad relativa de equilibrio encontrada en la prueba del medidor de gases se tomó el menor valor encontrado de $18,12 \pm 3,19$ % se notó una disminución de 7,70 %. Las perforaciones realizadas a los recipientes a

la hora de tomar las mediciones de CO₂ alteraron la composición de aire en el interior del recipiente.

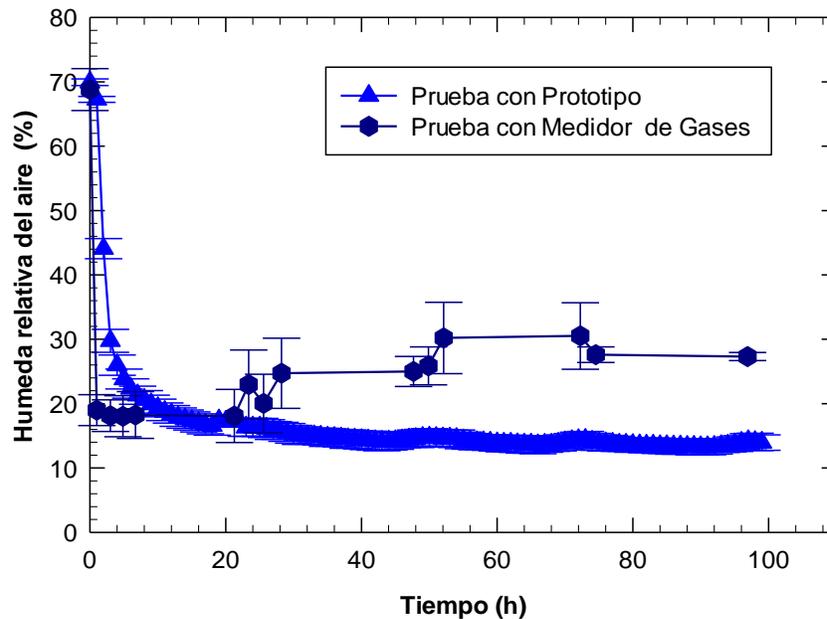


Figura 23. Comportamiento la humedad relativa del aire, medida con sensores DHT22.

En cuanto al comportamiento presión dentro del prototipo figura 24 encontrada existió muy poca variabilidad a lo largo de todo el proceso entre las mismas, la presión máxima fue de $5,24 \text{ hPa} \pm 1,21 \text{ hPa}$, y se observó un comportamiento oscilatorio de la presión con una tendencia ascendente aunque no se elevó en gran medida sobre la presión atmosférica. En comparación con el observado en el experimento del medidor de gases se notó una reducción de $2,41 \text{ hPa}$, ya en este se observó una presión máxima de $7,65 \pm 5,03 \text{ hPa}$. Nuevamente las perforaciones realizadas a los recipientes provocaron un comportamiento errático en esta propiedad.

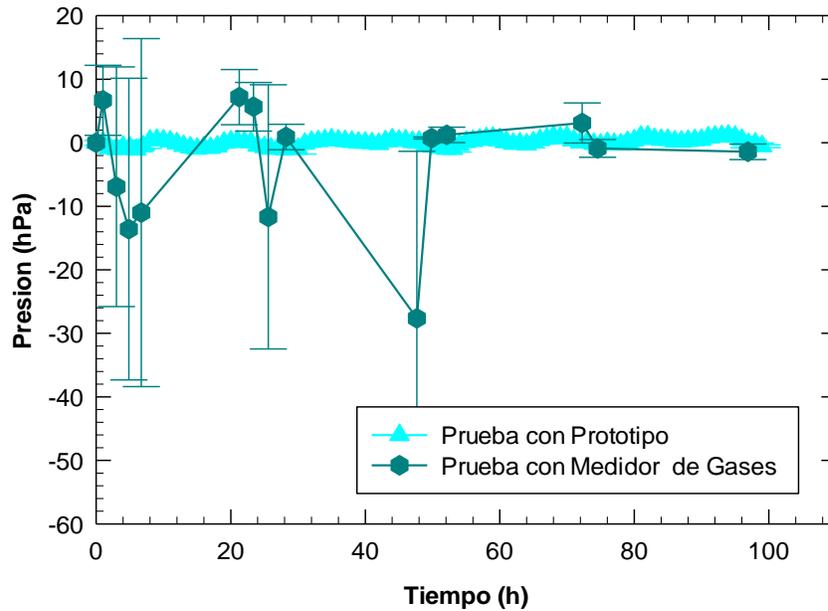


Figura 24. Comportamiento de presión, medida con sensores BMP180.

La figura 25 muestra los resultados de la cantidad de dióxido de carbono liberado registrados por el prototipo. El equilibrio fue determinado en $15,57 \pm 3,11$ % en 94,80 h. En comparación con los resultados del medidor de gases se notó una reducción de la concentración de 5,02 % y un aumento del tiempo de equilibrio de 44,63 h, ya que como se mencionó previamente este llegó al equilibrio a $20,50 \pm 2,72$ % alrededor de los 50,17 h

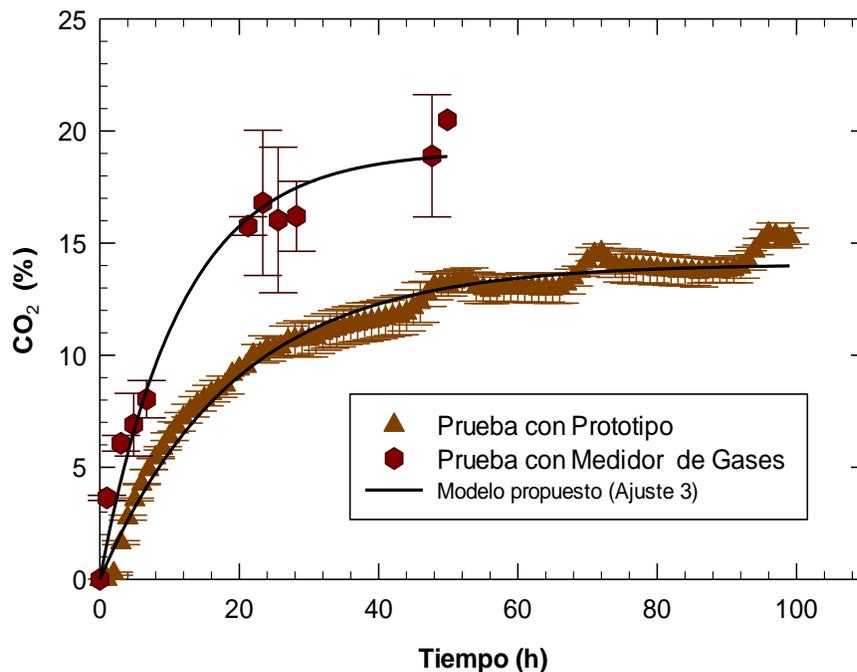


Figura 25. Comportamiento de CO₂ para el prototipo microcontrolado, prototipo con sensor MHZ16, medidor de gases con Gaspacer Advance GS3LW/P.

Una causa de la diferencia entre concentraciones observada entre los estos experimentos, pudo deberse a que el tratamiento llevado a cabo con el medidor de gases presentó mayor humedad en el aire consecuencia de las perforaciones realizadas, se infiere que estas perforaciones también pudieron alterar la cantidad de oxígeno disponible dentro de los recipientes favoreciendo la tasa de oxidación de los compuestos activados durante el tueste. Según lo reportado (38), en donde se estudio la vida util del café tostado encontró que un aumento en la cantidad de oxígeno de 0,5 a 21,3 kPa acelera la degradación del café 20 veces mas rápido, y un aumento de la actividad del agua de 0,1 condujo a un aumento del 60% en el deterioro. Añadiendo (15) resalta que esto evidencia que la oxidación de lo lípidos es la reacción que prevalece dado el aumento en la actividad de agua.

El cuadro 25 muestra los resultados para el análisis de la regresión realizada con el modelo propuesto o Ajuste (3), muestra resultados de coeficiente de determinación altos y comportamiento aleatorio de sus residuos. Se observa un resultado similar de la misma forma con el parámetro (k) el cual a pesar de ser diferentes se encuentran magnitudes muy cercanas entre sí, a su vez el parámetro (a) se evidencia como predictor de la concentración de equilibrio ya que sus valores se difieren en un 1,38% con respecto al medidor de gases y un 1,33 % de la concentración obtenida por el prototipo.

Cuadro 25. Parámetros estadísticos del Ajuste 3 ($CO_2 = a(1 - k^x)$).

Equipo	R ² (%)	k (h)	a (%)	P.regresión	C.R.
Medidor de gases	97,36	0,917	19,12	<0,0001	A
Prototipo	97,83	0,950	14,07	<0,0001	A

* *Parámetro no significativo.*

C.R. = comportamiento de residuos, A = aleatorios, T = tendenciosos.

Los resultados de este experimentos reflejaron varias ventajas de utilizar el prototipo microcontrolado sobre el medidor de gases. El hecho de no perforar los recipientes permitió obtener lecturas ininterrumpidas que sirvieron para analizar de mejor manera el comportamiento de las propiedades analizadas, devolviendo resultados con muy poca variación. Operacionalmente facilita la tarea de recolección de hasta 5 propiedades de interés: tiempo, concentración de CO₂, presión, humedad relativa y temperatura simultáneamente por largos periodos de tiempo en forma continua .

El nivel de inversión para la construcción y operación de este prototipo en su totalidad es considerablemente más bajo que otras opciones en el mercado, que miden y registran las mismas propiedades que el prototipo manufacturado en este estudio, como lo muestra el cuadro 26.

Cuadro 26. Comparación de costo del prototipo microcontrolado con equipos similares en el mercado

Equipo	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Costo (C)
¹ Medidor de CO ₂ PCE-AQD 20	1	\$ 644.93	C 373,736.94
¹ Medidor de CO ₂ PCE-BDT RD742	1	\$ 605.66	C 350,979.97
¹ Medidor de CO ₂ PCE-AQD 10	1	\$ 313.99	C 181,957.21
Prototipo :			
² Arduino UNO	1	\$ 22.95	C 13,299.53
² Sensor de presión barométrica BMP180	1	\$ 8.95	C 5,186.53
³ Sensor de CO ₂ MHZ16	1	\$ 67.95	C 39,377.03
² Paquete 20 cables "jumper"	1	\$ 2.40	C 1,390.80
² SD Card shield module	1	\$ 11.95	C 6,925.03
² Adafruit TCA9548A 1-to-8 I2C Multiplexer Breakout	1	\$ 6.95	C 4,027.53
² Mini Breadboard	1	\$ 5.55	C 3,216.23
Recipiente hermético de vidrio	1		C 6,664.25
² LM1117T	1	\$ 4.00	C 2,318.00
Total Prototipo			= C 82,404.90

¹ PCE Instruments (<https://www.pce-instruments.com/espanol/>)

² CR.Cibernetica (<https://www.crcibernetica.com/>)

³ Sandbox Electronics (<https://sandboxelectronics.com/>)

tipo de cambio 579 \$/C

Entre sus restricciones se denota que el sistema requirió de estar conectado a un computador para mantener la recolección de datos continua, ya que la capacidad de procesamiento del microcontrolador se encontraba en sus límites debido a la utilización de los diferentes puertos de comunicación de los sensores empleados lo que no permitía su correcto funcionamiento al ser conectado solamente a una fuente de poder independiente.

CONCLUSIONES

1. La temperatura de almacenamiento influyó en gran medida la cantidad y cinética del CO₂ liberado. En general se tiene que una reducción de 10°C en la temperatura de almacenamiento con respecto a la temperatura ambiente, disminuye en 46,6 % el CO₂, por otro lado un aumento de 10°C genera un aumento de 34,3%, a través de los diferentes niveles de tueste..
2. A medida que se aumentó el nivel de tueste se liberó una mayor cantidad y cinética de CO₂. En general se calculó que el tueste claro liberó 70,4 % menos que el tueste medio, mientras que el tueste moderadamente oscuro liberó 15,6% más gas que el tueste medio a una misma temperatura de almacenamiento.
3. La reducción del tamaño de partícula producido por la molienda generó pérdidas de gas adicionales debido a la destrucción de la estructura porosa de los granos, facilitando su difusión en el aire. En comparación con los obtenidos para el grano entero se determinó que la pérdida de CO₂ fue mayor para la molienda fina de un 24,8 %, mientras que para el tratamiento de molienda gruesa el resultado fue muy similar al tueste medio de grano entero, se observó una disminución del 0,9 %.
4. El ordenamiento mediante el criterio de información de Akaike fue una herramienta útil para discernir cuales modelos resultaron con una mejor parsimonia.

5. Se concluye que el *Ajuste 1*, fue el más adecuado para enfocar el análisis de la cinética del proceso ya que presentó los parámetros estadísticos aceptables. Sus valores de R^2 superaron en la gran mayoría de los tratamientos al resto de los modelos y sus residuos se calificaron como aleatorios en todos los tratamientos al no mostrar ninguna tendencia aparente.
6. Se concluye que los *Ajustes 1* y *2* destacaron como los únicos con una tendencia termodinámica coherente con la literatura revisada, sin embargo el *Ajuste 1* fue superior al *Ajuste 2* en cuanto a parámetros estadísticos y comportamiento de residuos. Esta particularidad fue instrumental en la decisión de determinar el *Ajuste 1* como el más adecuado para la predicción del fenómeno estudiado.
7. El parámetro cinético (k) de los modelos matemáticos presentó en forma general un valor creciente de acuerdo con el aumento de la temperatura de almacenamiento y con el aumento del grado de tueste. Para el *Ajuste 1* se obtuvieron rangos de 13,08-7,99 h en tueste claro, 4,73-9,22 h en tueste medio y de 2,67-5,87 h en tueste moderadamente oscuro.
8. El prototipo microcontrolado registra eficientemente la concentración del CO_2 en el aire, el sensor seleccionado (MHZ16) resultó con una diferencia relativa de 5,0 % con respecto al medidor de gases GS3LW/P.

9. El uso de micro-controladores así como sus sensores asociados permiten la medición y registro de varios parámetros para una comprensión mas completa de los cambios ocurridos en el aire por un costo económico mucho menor al de otras opciones presentes en el mercado.

10. Otras propiedades físicas del aire como la humedad relativa, la temperatura y la presión se pueden medir y almacenar con el uso del prototipo microcontrolado, a un costo significativamente menor que otros equipos en el mercado que miden cumplen las mismas funciones.

RECOMENDACIONES

Debido a las reducciones considerables del CO₂ liberado en todos los tratamientos de tueste almacenados a 15 °C, se recomienda refrigerar el café en al menos 10 °C menos que la temperatura ambiente por un tiempo de al menos 24 h posterior al tueste, con el objetivo de conservar un a mayor cantidad de CO₂ y volátiles aromáticos dentro de los granos.

Los grados de molienda resultantes en tamaños de partícula menores generan pérdidas mayores de gas, sin embargo, por la facilidad comercial que presenta la venta de los granos molidos para el consumidor, se recomienda realizar el mismo proceso de refrigeración con 10 °C menos que la temperatura ambiente por un tiempo de al menos 24 h, previo a la molienda y el empaque del café.

Tanto el sensor MHZ16 como el medidor de gases Gaspac Advance GS3LW/P emplean sistemas infrarrojos en su fabricación, estos presentan características deseables en cuanto a consistencia y estabilidad en la toma de datos por lo cual se consideran como herramientas adecuadas para la medición de CO₂ en el aire. Sensores de sistemas electroquímicos en su fabricación mostraron comportamientos aleatorios he inconsistentes, de acuerdo con resultados obtenidos en los ensayos iniciales de este proyecto por lo que se recomienda evitar su uso.

BIBLIOGRAFIA

1. Canet G. Evolución de la Caficultura Costarricense y Situación Actual de la Actividad. En: IX Congreso Nacional Agropecuario y de Recursos Naturales. San José, Costa Rica: Ministerio de Agricultura y Ganadería; 1993. p. 15. Disponible en : http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_ix/A01-1277-74.pdf
2. David G. Costa Rica País Único, Café Único. Café Origen [Internet]. 2014; p. 6. Disponible en: http://www.forumdelcafe.com/sites/default/files/biblioteca/costa_rica.pdf
3. ICAFE. El mejor Café del Mundo [Internet]. Instituto del Café de Costa Rica. 2019 [citado el 12 de julio de 2019]. Disponible en: <http://www.icafe.cr/nuestro-cafe/el-mejor-cafe-del-mundo/>
4. ICAFE. Informe Sobre la Actividad Cafetalera de Costa Rica. Heredia, Costa Rica, 2 de Diciembre; 2018. Disponible en http://www.icafe.cr/wp-content/uploads/informacion_mercado/informes_actividad/actual/Informe%20Actividad%20Cafetalera.pdf
5. SCA.CR. Taza de la Excelencia [Internet]. Asociacion de Cafés Finos de Cosa Rica. 2019 [citado el 12 de febrero de 2019]. Disponible en: <http://www.sca.cr/taza-de-la-excelencia>

6. Productor Agropecuario. Mejor café de Costa Rica rompe record en Taza de la Excelencia [Internet]. Revista Productor Agropecuario. 2016 [citado el 12 de julio de 2019]. Disponible en: <https://revistaproagro.com/mejor-cafe-de-costa-rica-rompe-record-en-taza-de-la-excelencia/>
7. Barquero M. Café de Costa Rica de alta calidad se cotiza a precio récord de \$30.000 el quintal. La Nacion [Internet]. 2018; Disponible en: <https://www.nacion.com/economia/agro/cafe-de-costa-rica-de-alta-calidad-se-cotiza-a/TZGLDKKOZBDCDD5USCJMBHI2RM/story/>
8. Karina L. El mercado mundial del café tostado. PROCOMER IC-IM-05-2014; 2014, p. 7-8. Disponible en : <http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2016/08/El-mercado-mundial-del-cafe-tostado.pdf>
9. Gutierrez T. Cafetaleros ganarían 6 veces más si exportaran grano tostado [Internet]. CRHoy. 2016 [citado el 12 de julio de 2019]. Disponible en: <https://archivo.crhoy.com/cafetaleros-ganarian-6-veces-mas-si-exportaran-grano-tostado/economia/>
10. Manzocco L, Calligaris S, Nicoli MC. The stability and shelf life of coffee products [Internet]. Food and Beverage Stability and Shelf Life. Elsevier Ltd; 2011. p. 615–640 . Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100435-7.00013-7>
11. Wang X, Lim LT. Effect of roasting conditions on carbon dioxide degassing behavior

- in coffee. *Food Res Int* [Internet]. 2014;61:p. 144–51. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.027>
12. Shimoni E, Labuza TP. Degassing Kinetics and Sorption Equilibrium of Carbon Dioxide in Fresh Roasted and Ground Coffee. *J Food Process Eng*. 2000;23: p.419–36.
 13. Milos G. The Coffee-Storage Conundrum: How to Keep Beans Fresh. *The Atlantic* [Internet]. 2016; p. 1. Disponible en: <https://www.theatlantic.com/health/archive/2010/10/the-coffee-storage-conundrum-how-to-keep-beans-fresh/64118/>
 14. Clarke R, Macrae R. *COFFE Volume 1: Chemistry* [Internet]. First Edit. Vol. 1, Elsevier Applied Science. Essex: Science, Elsevier; 1985. p. 42–43. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095175000188>
 15. Illy A, Viani R. *Espresso coffee: the science of quality* [Internet]. Second Edi. Elsevier Academic Press. California, London, Boston, Heidelberg, New York, Oxford, Paris, San Fransisco, Singapore, Syney, Tokyo: Elsevier Academic Press; 2005. p. 417 . Disponible en: <http://www.fstadirect.com/GetRecord.aspx?AN=2006-04-Hn1236>
 16. Geiger R, Perren R, Kuenzli R, Escher F. Carbon dioxide evolution and moisture evaporation during roasting of coffee beans. *J Food Sci* [Internet]. 2005;70(2):124–30. Disponible en: <http://%5C%5CRobsrv-05%5Creference>

manager%5CArticles%5C5192.pdf

17. Schenker S, Handschin S, Frey B, Perren R, Escher F. Pore Structure of Coffee Beans. *J Food Sci* [Internet]. 2000;65(3): p. 452–7. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2621.2000.tb16026.x>
18. Wang X. Understanding the formation of CO₂ and its degassing behaviours in coffee. University of Guelph; 2014. p 1-106. Disponible en : https://atrium.lib.uoguelph.ca/xmlui/bitstream/handle/10214/8152/Wang_Xiuju_201405-PhD.pdf?isAllowed=y&sequence=2
19. Webb S. Theory and Applications of Transport in Porous Media. Bear J, editor. Vol. 20, Gas Transport in Porous Media. Dordrecht: Springer; 2006. p. 440.
20. Özdemir M, Onur Devres Y. Thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *J Food Eng.* 1999;42(4): p. 225–33.
21. Younis M, Abdelkarim D, Zein El-Abdein A. Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of garlic slices. *Saudi J Biol Sci* [Internet]. 2017;p. 7. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.06.011>
22. Abarca R. Estudio del proceso de torrefacción del café (*Coffea arabica*) en tostador convencional. Universidad de Costa Rica; 2017 ; p. 70. Disponible en : <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/75352>

23. Castillo M, Munoz M, Frank E. Manual básico de buenas prácticas para el tostado del café. Ecuador; 2016; p. 17-21. Disponible en https://www.swisscontact.org/fileadmin/user_upload/COUNTRIES/Ecuador/Documents/Content/ManualTuesteCafe.pdf
24. Moshenin N. Physical properties of plant and animal materials. New York: Seconded Gordon and Breach Science Publishers.; 1986. p. 730.
25. Vargas G. Avilacao das Propiedades Fisicas e Qualidade do Cafe em Diferentes condiciones de Torrefacao. Universidade Federal de Vicosa; 2011. Disponible en <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/75349>
26. Alfaro V. Efectos de la Altitud Sobre Las Características Físicas y Organolépticas del Café de la Zona de los Santos . Universidad de Costa Rica; 2015 ; p. 62 . Disponible en <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2016/02/tesis-veronica-alfaro.pdf>
27. Valerio O. Cinética de la masa y expansión volumétrica del frijol en hidratación. Universida de Costa Rica; 2016 ; p. 5. Disponible en <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/74676>
28. Smrke S. Time-Resolved Gravimetric Method To Assess Degassing of Roasted Coffee. J Agric Food Chem. 2017;66: p. 5293–300.
29. Gutierrez H, Slazar R. Analisis y Diseño de Experimentos. 3ra ed. C.V MES. de,

- editor. Mexico; 2012. p. 322–325.
30. Burnham KP, Anderson DR. Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information- Theoretic Approach. 2da ed. Verlag New York: Springer; 2002. p. 60–76 .
 31. Upadhayay S. Chemical Kinetics and Reaction Dynamics. Springer, editor. Anamaya Publisher; 206d. C. p 46–53.
 32. Vargas G. Kinetics of mass loss of arabica coffee during roasting process. J Brazilian Assoc Agric Eng. 2016;4430(31): p. 300–8.
 33. Ministerio De La Presidencia. Real Decreto 1676/2012 [Internet]. La Vicepresidenta del Gobierno y Ministra de la Presidencia; 2012 p. 7-886. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2012-15656>
 34. Anderson BA, Shimoni E, Liardon R, Labuza TP. The diffusion kinetics of carbon dioxide in fresh roasted and ground coffee. J Food Eng. 2003;59(1): p. 71–8.
 35. Roger W. Statistical thinking: Improving Business Performance. ASQ / Duxbury Press; 2002. p. 2.
 36. Samuels, P & Gilchrist, M. Statistical Hypothesis Testing. Birmingham City University 2014; p. 2. Disponible en <http://www.statstutor.ac.uk/resources/uploaded/statisticalhypothesistesting3.pdf>

37. Baptestini F. Efeito da Granulometria e da Embalagem na Sorção de Água Pelo Café Torrado e Moído. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa , como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola , para obtenção do título Magister Viçosa Minas Gerais - Brasil. 2011; p 76. Disponible en <http://www.sbicafe.ufv.br/bitstream/handle/123456789/61/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
38. Cardelli C, Labuza TP. Application of Weibull Hazard Analysis to the Determination of the Shelf Life of Roasted and Ground Coffee. *Leb u-Technol.* 2001;278(34):p. 273–8.
39. Williams D. Earth Fact Sheet [Internet]. Greenbelt, MD 20771; 2019 [citado el 2 de mayo de 2019]. Disponible en: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>
40. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Full Record Global CO2 [Internet]. 2019 [citado el 15 de enero de 2019]. p. 1. Disponible en: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/gl_full.html
41. Universidad de Costa Rica. Registro de Presión Atmosférica de la última semana en la Fac. Ingeniería, UCR [Internet]. 2018 [citado el 5 de septiembre de 2018]. p. 1. Disponible en: http://meteor.ucr.ac.cr/estaciones/ingenieria/hist_patmos.html

42. Universidad de Costa Rica. Annual Climatological Summary[Internet]. 2018 [citado el 5 de septiembre de 2018]. p. 1. Disponible en: <http://meteoro.ucr.ac.cr/estaciones/ingenieria/NOAAYR.TXT>
43. Cengel Y, Cimbala J. Mecanica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones. Segunda ed. McGRAW-HILL / Interamericana Editores SA de CV, . 2012. p. 1007 .
44. Occidental Chemical Corporation. Calcium Chloride [Internet]. 2019 [citado el 5 de enero de 2019]. p. 12. Disponible en: www.oxycalciumchloride.com
45. Windholz M. The Merck Index An Encyclpidia of Chemicals and Drugs.pdf. Ninth Edit. New Jersey: Merck & CO, INC; 1976; p 66-69.
46. Greenspan L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. Journal of Research of the National Bureau of Standards- A. Physics and Chemistry. 1977 ; 81(1) ; p 92. Disponible en : https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/81A/jresv81An1p89_A1b.pdf

ANEXO 1. Código del prototipo microcontrolado.

```
//TARJETA MEMORIA SD
//Coneccion de Pines:
//CS 10
//SCK 13
//MOSI 11
//MOSO 12
#include <SD.h>
#include <SPI.h>

File archivo;

//SENSORES HUMEDAD Y TEMPERATURA

#include "DHT.h"
#define Sensor2 4 // El pin digital al que está conectado el sensor DHT22
#define DHTTYPE DHT22 // DHT 22
DHT dht2(Sensor2, DHTTYPE);

//SENSORES PRESION
//Any Arduino pins labeled: SDA SCL
//Uno, Redboard, Pro: A4 A5
#include <SFE_BMP180.h>
SFE_BMP180 pressure1;

//SENSOR MHZ16
#include <Wire.h>
#include <SC16IS750.h>
#include <string.h>
#include <NDIRZ16.h>
SC16IS750 i2cuart =
SC16IS750(SC16IS750_PROTOCOL_I2C,SC16IS750_ADDRESS_BB);
NDIRZ16 mySensor = NDIRZ16(&i2cuart);

void setup() {

Serial.begin(115200);

if (!SD.begin(10)) {
Serial.println("SD no conectada");
while (1);
}
```

```

} Serial.println("SD inicializada");

//SENSOR MHZ16

i2cuart.begin(9600);

//SENSORES HUMEDAD Y TEMPERATURA

dht2.begin();

//IMPRESION EN MONITOR SERIAL DE VARIABLES
  Serial.print("Tiempo(s)");
  Serial.print(" ");
  Serial.print("T.DHT22(C)");
  Serial.print(" ");
  Serial.print("HR(%)");
  Serial.print(" ");
  Serial.print("T.BMP180(C) ");
  Serial.print(" ");
  Serial.print("Presion(mPa)");
  Serial.print(" ");
  Serial.println("CO2(ppm)");

//TARJETA MEMORIA SD

delay(1000);
archivo= SD.open("x.txt",FILE_WRITE); //abre y nombra el archivo
delay(1000);
if (archivo){
  archivo.print("Tiempo (s)");
  archivo.print(" ");
  archivo.print("T.DHT22-1(C)");
  archivo.print(" ");
  archivo.print("HR-1(%)");
  archivo.print(" ");
  archivo.print("T.BMP180-1(C) ");
  archivo.print(" ");
  archivo.print("Presion-1(mPa)");
  archivo.print(" ");
  archivo.println("CO2-1(ppm)");
  delay(1000);
  archivo.close();
  delay(1000);
}

```

```

        }
        else{ Serial.println("Error al abrir el archivo");}
    }

    void loop() {

        double Tiempo= millis()/1000;

        //SENSOR MHZ16

        int tref=Tiempo/3600;
        if (tref==20.00){power(0);}
        if (tref==40.00){power(0);}
        if (tref==60.00){power(0);}
        if (tref==80.00){power(0);}
        if (tref==90.00){power(0);}
        if (tref==100.00){power(0);}
        if (tref==120.00){power(0);}
        if (tref==140.00){power(0);}
        if (tref==160.00){power(0);}
        if (tref==180.00){power(0);}
        else {power(1);};

        if (mySensor.measure()) {
            double co2=(mySensor.ppm);

            } else {
                Serial.println("Sensor communication error.");
            }
        }

        //SENSORES HUMEDAD Y TEMPERATURA

        float h2 = dht2.readHumidity(); // lee la humedad relativa
        float t2 = dht2.readTemperature(); //lee la temperatura

        //SENSORES PRESION
        char status;
        double T1,P1;

        if(pressure1.begin()) {status = pressure1.startTemperature();

            if (status != 0) {delay(status);
                status = pressure1.getTemperature(T1);
            }
        }
    }
}

```

```

if (status != 0) {status = pressure1.startPressure(3);

    if (status != 0) {delay(status);
        status = pressure1.getPressure(P1,T1);
        }else Serial.println("error starting pressure measurement\n");

        }else Serial.println("error retrieving temperature measurement\n");
    }else Serial.println("error starting temperature measurement\n");
}

```

//IMPRESION EN MONITOR SERIAL DE VARIABLES

```

Serial.print(Tiempo);
Serial.print(" ");
Serial.print(t2);
Serial.print(" ");
Serial.print(h2);
Serial.print(" ");
Serial.print(T1,2);
Serial.print(" ");
Serial.print(P1*100000,2);
Serial.print(" ");
Serial.println(mySensor.ppm);

```

//TARJETA MEMORIA SD

```

delay(1000);
archivo= SD.open("x.txt",FILE_WRITE); //abre y nombra el archivo
delay(1000);
if (archivo){
    archivo.print(Tiempo);
    archivo.print(" ");
    archivo.print(t2);
    archivo.print(" ");
    archivo.print(h2);
    archivo.print(" ");
    archivo.print(T1,2);
    archivo.print(" ");
    archivo.print(P1*100000,2);
    archivo.print(" ");
    archivo.println(mySensor.ppm);
    delay(1000);
    archivo.close();
}

```

```
        delay(1000);
    }
    else{ Serial.println("Error al abrir el archivo");}
delay(1000); //cada 5s
}
```

//Funcion que Controla Encendido y Apagado de MHZ16 . 1=ON, 0=OFF

```
void power (uint8_t state) {
    i2cuart.pinMode(0, INPUT);
    if (state) {i2cuart.pinMode(0, INPUT); }
    else {i2cuart.pinMode(0, OUTPUT);
        i2cuart.digitalWrite(0, 0);}}
```

ANEXO 2. Código sistema de medición.

```
//TARJETA MEMORIA SD
```

```
//Conexion de Pines:
```

```
//CS 53
```

```
//SCK 52
```

```
//MOSI 51
```

```
//MOSO 50
```

```
#include <SD.h>
```

```
#include <SPI.h>
```

```
File archivo;
```

```
//String Nombre = "P8";//CAMBIAR NOMBRE EN CADA PRUEBA
```

```
//SENSORES HUMEDAD Y TEMPERATURA
```

```
#include "DHT.h"
```

```
#define Sensor1 7 // El pin digital al que está conectado el sensor DHT22
```

```
#define DHTTYPE DHT22 // DHT 22
```

```
DHT dht1(Sensor1, DHTTYPE);
```

```
#define Sensor2 2 // El pin digital al que está conectado el sensor DHT22
```

```
#define DHTTYPE DHT22 // DHT 22
```

```
DHT dht2(Sensor2, DHTTYPE);
```

```
#define Sensor3 3 // El pin digital al que está conectado el sensor DHT22
```

```
#define DHTTYPE DHT22 // DHT 22
```

```
DHT dht3(Sensor3, DHTTYPE);
```

```
#define Sensor4 4 // El pin digital al que está conectado el sensor DHT22
```

```
#define DHTTYPE DHT22 // DHT 22
```

```
DHT dht4(Sensor4, DHTTYPE);
```

```
#define Sensor5 5 // El pin digital al que está conectado el sensor DHT22
```

```
#define DHTTYPE DHT22 // DHT 22
```

```
DHT dht5(Sensor5, DHTTYPE);
```

```
#define Sensor6 6 // El pin digital al que está conectado el sensor DHT22
```

```

#define DHTTYPE DHT22 // DHT 22
DHT dht6(Sensor6, DHTTYPE);

//MULTIPLEXER I2C
#include <Wire.h>
#define TCAADDR 0x70

void tcaselect(uint8_t i) {
  if (i > 7) return;

  Wire.beginTransmission(TCAADDR);
  Wire.write(1 << i);
  Wire.endTransmission();
}

//SENSORES PRESION
//Any Arduino pins labeled: SDA SCL
//Uno, Redboard, Pro:   A4 A5
//Mega2560, Due:       20 21
//Leonardo:           2 3

#include <SFE_BMP180.h>

SFE_BMP180 pressure1;
SFE_BMP180 pressure2;
SFE_BMP180 pressure3;
SFE_BMP180 pressure4;
SFE_BMP180 pressure5;
SFE_BMP180 pressure6;

void setup() {

  Serial.begin(9600);

  //TARJETA MEMORIA SD

  Serial.println("SD iniciando....");
  pinMode(53,OUTPUT);
  if (!SD.begin(53)){
    Serial.println("SD NO conectda....");
  }
}

```

```

        return;
    }
Serial.println("SD conectada");

//SENSORES HUMEDAD Y TEMPERATURA

dht1.begin();
dht2.begin();
dht3.begin();
dht4.begin();
dht5.begin();
dht6.begin();

//IMPRESION EN MONITOR SERIAL DE VARIABLES
Serial.print("Tiempo(s)");
Serial.print(" ");
Serial.print("T.DHT22-1(C)");
Serial.print(" ");
Serial.print("HR-1(%)");
Serial.print(" ");
Serial.print("T.DHT22-2(C)");
Serial.print(" ");
Serial.print("HR-2(%)");
Serial.print(" ");
Serial.print("T.DHT22-3(C)");
Serial.print(" ");
Serial.print("HR-3(%)");
Serial.print(" ");
Serial.print("T.DHT22-4(C)");
Serial.print(" ");
Serial.print("HR-4(%)");
Serial.print(" ");
Serial.print("T.DHT22-5(C)");
Serial.print(" ");
Serial.print("HR-5(%)");
Serial.print(" ");
Serial.print("T.DHT22-6(C)");
Serial.print(" ");
Serial.print("HR-6(%)");
Serial.print(" ");
Serial.print("T.BMP180-1(C) ");
Serial.print(" ");

```

```

Serial.print("Presion-1(mPa)");
Serial.print(" ");
Serial.print("T.BMP180-2(C) ");
Serial.print(" ");
Serial.print("Presion-2(mPa)");
Serial.print(" ");
Serial.print("T.BMP180-3(C) ");
Serial.print(" ");
Serial.print("Presion-3(mPa)");
Serial.print(" ");
Serial.print("T.BMP180-4(C) ");
Serial.print(" ");
Serial.print("Presion-4(mPa)");
Serial.print(" ");
Serial.print("T.BMP180-5(C) ");
Serial.print(" ");
Serial.print("Presion-5(mPa)");
Serial.print(" ");
Serial.print("T.BMP180-6(C) ");
Serial.print(" ");
Serial.println("Presion-6(mPa)");

```

//TARJETA MEMORIA SD

```
delay(1000);
```

```
archivo= SD.open("P8.txt",FILE_WRITE); //abre y nombra el archivo
```

```
delay(1000);
```

```
if (archivo){
```

```

    archivo.print("Tiempo (s)");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("T.DHT22-1(C)");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("HR-1(%)");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("T.DHT22-2(C)");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("HR-2(%)");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("T.DHT22-3(C)");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("HR-3(%)");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("T.DHT22-4(C)");
    archivo.print(" ");

```

```

    archivo.print("HR-4(%)");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("T.DHT22-5(C)");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("HR-5(%)");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("T.DHT22-6(C)");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("HR-6(%)");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("T.BMP180-1(C)");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("Presion-1(mPa) ");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("T.BMP180-2(C)");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("Presion-2(mPa) ");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("T.BMP180-3(C)");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("Presion-3(mPa) ");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("T.BMP180-4(C)");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("Presion-4(mPa) ");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("T.BMP180-5(C)");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("Presion-5(mPa) ");
    archivo.print(" ");
    archivo.print("T.BMP180-6(C)");
    archivo.print(" ");
    archivo.println("Presion-6(mPa)");
    delay(1000);
    archivo.close();
    delay(1000);
}
else{ Serial.println("Error al abrir el archivo");}
}

void loop() {

//SENSORES HUMEDAD Y TEMPERATURA

```

```

float h1 = dht1.readHumidity(); // lee la humedad relativa
float t1 = dht1.readTemperature(); //lee la temperatura

float h2 = dht2.readHumidity();
//float h2s = dht2.readHumidity(); // lee la humedad relativa
//float h2 = 0.9741*h2s+0.8135;
float t2 = dht2.readTemperature(); //lee la temperatura

float h3s = dht3.readHumidity(); // lee la humedad relativa
float h3 = 0.9651*h3s+0.0966;
float t3 = dht3.readTemperature(); //lee la temperatura

float h4s = dht4.readHumidity(); // lee la humedad relativa
float h4 = 0.9809*h4s+0.5594;
float t4 = dht4.readTemperature(); //lee la temperatura

float h5s = dht5.readHumidity(); // lee la humedad relativa
float h5 = 0.7988*h5s+8.6101;
float t5 = dht5.readTemperature(); //lee la temperatura

float h6s = dht6.readHumidity(); // lee la humedad relativa
float h6 = 0.816*h6s+8.4168;
float t6 = dht6.readTemperature(); //lee la temperatura

//MULTIPLEXER I2C + SENSORES PRESION
char status;
double T1,P1,T2,P2,T3,P3,T4,P4,T5,P5,T6,P6;

tcselect(1);
if(pressure1.begin())
{
// Serial.println("BMP180-7 conectado!");

status = pressure1.startTemperature();

if (status != 0) {
delay(status);
status = pressure1.getTemperature(T1);

if (status != 0) {
status = pressure1.startPressure(3);
}
}
}

```

```

        if (status != 0) {
            delay(status);
            status = pressure1.getPressure(P1,T1);

                }else Serial.println("error starting pressure
measurement\n");
        }else Serial.println("error retrieving temperature
measurement\n");
        }else Serial.println("error starting temperature measurement\n");
    }

    tcselect(2);
    if(pressure2.begin()){
        status = pressure2.startTemperature();

if (status != 0) {
    delay(status);
    status = pressure2.getTemperature(T2);

        if (status != 0) {
            status = pressure2.startPressure(3);

                if (status != 0) {
                    delay(status);
                    status = pressure2.getPressure(P2,T2);

                        }else Serial.println("error starting pressure
measurement\n");
                    }else Serial.println("error retrieving temperature
measurement\n");
                }else Serial.println("error starting temperature measurement\n");
            }

            tcselect(3);
            if(pressure3.begin()){

                status = pressure3.startTemperature();

if (status != 0) {
    delay(status);

```

```

    status = pressure3.getTemperature(T3);

    if (status != 0) {
        status = pressure3.startPressure(3);

        if (status != 0) {
            delay(status);
            status = pressure3.getPressure(P3,T3);

                }else Serial.println("error starting pressure
measurement\n");
            }else Serial.println("error retrieving temperature
measurement\n");
        }else Serial.println("error starting temperature measurement\n");
    }

tcselect(4);
if(pressure4.begin()) {
status = pressure4.startTemperature();
if (status != 0) {
    delay(status);
    status = pressure4.getTemperature(T4);

    if (status != 0) {
        status = pressure4.startPressure(3);

        if (status != 0) {
            delay(status);
            status = pressure4.getPressure(P4,T4);

                }else Serial.println("error starting pressure
measurement\n");
            }else Serial.println("error retrieving temperature
measurement\n");
        }else Serial.println("error starting temperature measurement\n");
    }

tcselect(5);

```

```

if(pressure5.begin()) {
status = pressure5.startTemperature();
if (status != 0) {
    delay(status);
    status = pressure5.getTemperature(T5);

    if (status != 0) {
        status = pressure5.startPressure(3);

        if (status != 0) {
            delay(status);
            status = pressure5.getPressure(P5,T5);

            }else Serial.println("error starting pressure
measurement\n");
        }else Serial.println("error retrieving temperature
measurement\n");
        }else Serial.println("error starting temperature measurement\n");
    }
}
tcselect(6);
if(pressure6.begin()) {
status = pressure6.startTemperature();
if (status != 0) {
    delay(status);
    status = pressure6.getTemperature(T6);

    if (status != 0) {
        status = pressure6.startPressure(3);

        if (status != 0) {
            delay(status);
            status = pressure6.getPressure(P6,T6);

            }else Serial.println("error starting pressure
measurement\n");
        }else Serial.println("error retrieving temperature
measurement\n");
        }else Serial.println("error starting temperature measurement\n");
    }
}

```

//IMPRESION EN MONITOR SERIAL DE VARIABLES

```
double Tiempo;
Tiempo= millis()/1000;
Serial.print(Tiempo);
Serial.print(" ");
Serial.print(t1);
Serial.print(" ");
Serial.print(h1);
Serial.print(" ");
Serial.print(t2);
Serial.print(" ");
Serial.print(h2);
Serial.print(" ");
Serial.print(t3);
Serial.print(" ");
Serial.print(h3);
Serial.print(" ");
Serial.print(t4);
Serial.print(" ");
Serial.print(h4);
Serial.print(" ");
Serial.print(t5);
Serial.print(" ");
Serial.print(h5);
Serial.print(" ");
Serial.print(t6);
Serial.print(" ");
Serial.print(h6);
Serial.print(T1,2);
Serial.print(" ");
Serial.print(P1*100000,2);
Serial.print(" ");
Serial.print(T2,2);
Serial.print(" ");
Serial.print(P2*100000,2);
Serial.print(" ");
Serial.print(T3,2);
Serial.print(" ");
Serial.print(P3*100000,2);
Serial.print(" ");
Serial.print(T4,2);
Serial.print(" ");
```

```
Serial.print(P4*100000,2);  
Serial.print(" ");  
Serial.print(T5,2);  
Serial.print(" ");  
Serial.print(P5*100000,2);  
Serial.print(" ");  
Serial.print(T6,2);  
Serial.print(" ");  
Serial.println(P6*100000,2);
```

```
//TARJETA MEMORIA SD
```

```
delay(1000);  
archivo= SD.open("P8.txt",FILE_WRITE); //abre y nombra el archivo  
delay(1000);
```

```
if (archivo){  
    archivo.print(Tiempo);  
    archivo.print(" ");  
    archivo.print(t1);  
    archivo.print(" ");  
    archivo.print(h1);  
    archivo.print(" ");  
    archivo.print(t2);  
    archivo.print(" ");  
    archivo.print(h2);  
    archivo.print(" ");  
    archivo.print(t3);  
    archivo.print(" ");  
    archivo.print(h3);  
    archivo.print(" ");  
    archivo.print(t4);  
    archivo.print(" ");  
    archivo.print(h4);  
    archivo.print(" ");  
    archivo.print(t5);  
    archivo.print(" ");  
    archivo.print(h5);  
    archivo.print(" ");  
    archivo.print(t6);  
    archivo.print(" ");  
    archivo.print(h6);  
    archivo.print(" ");
```

```
archivo.print(T1,2);
archivo.print(" ");
archivo.print(P1*100000,2);
archivo.print(" ");
archivo.print(T2,2);
archivo.print(" ");
archivo.print(P2*100000,2);
archivo.print(" ");
archivo.print(T3,2);
archivo.print(" ");
archivo.print(P3*100000,2);
archivo.print(" ");
archivo.print(T4,2);
archivo.print(" ");
archivo.print(P4*100000,2);
archivo.print(" ");
archivo.print(T5,2);
archivo.print(" ");
archivo.print(P5*100000,2);
archivo.print(" ");
archivo.print(T6,2);
archivo.print(" ");
archivo.println(P6*100000,2);
delay(1000);
archivo.close();
delay(1000);
}
else{ Serial.println("Error al abrir el archivo");}
```

```
delay(48000);//cada60s
}
```

ANEXO 3. Calibración de los equipos.

3.1 Calibración del Gaspac Advance GS3LW/P

Se utilizó un recipiente plástico de 4,2 L como volumen de control Figura 1, al cual se le hicieron dos perforaciones en su tapa, la primera para tomar la muestra de aire con el medidor de gases y la segunda para adicionar un volumen conocido de dióxido de carbono. La adición de dióxido de carbono se hizo mediante una bureta para gases tipo jeringa de 500 mL Figura 2, llenada utilizando un tanque de dióxido de carbono puro. Se evaluaron tres intervalos diferentes de concentración 50 mL, 100 mL y 200 mL. Se hizo uso de la (ec.1) para transformar los diferenciales volumétricos a porcentaje y compararlos con las lecturas del Gaspac Advance GS3LW/P. Se tomó como referencia el estándar de dióxido de carbono atmosférico de 410 ppm(0,041%) presentado por la NASA (39).



Figura 1. Recipiente plástico. 1) Entrada de aguja para toma de muestra de aire 2) Entrada de la boquilla de la bureta tipo jeringa. (Fuente: Autor)



Figura 2. Bureta 500mL tipo jeringa hermética. (Fuente: Autor)

$$\Delta C_T = \frac{V_{CO_2}}{V_T} * 100 \quad (ec. 1)$$

Donde:

ΔC_T , cambio en la concentración dióxido de carbono teórico (%)

V_{CO_2} , volumen de dióxido de carbono (L)

V_T , volumen total de la muestra (L)

Los cambios en la concentración registrados por el medidor de gases se calcularon haciendo uso de la (ec.2).

$$\Delta C_E = C_f - C_i \quad (ec. 2)$$

Donde:

ΔC_E , cambio en la concentración dióxido de carbono experimental (%)

C_i , concentración inicial (%)

C_f , concentración final (%)

Los resultados se compararon haciendo uso de la (ec.3)

$$E = \frac{(\Delta C_T - \Delta C_E)}{\Delta C_T} * 100 \quad (ec. 3)$$

Donde:

E , porcentaje de error (%)

3.1.1 Resultados calibración Gaspac Advance GS3LW/P.

En el cuadro 1 se observa la comparación realizada entre los valores reportados por la NASA y el equipo medidor de gases utilizado, los valores del nitrógeno y el oxígeno experimentales son muy cercanos a los supuestos teóricos evidenciado por baja porcentaje de diferencia, el cual se encuentre dentro del rango de incertidumbre presentado por el fabricante.

El cambio más grande lo presenta el dióxido de carbono con un 25 % de diferencia, esto se atribuye a que este equipo fue calibrado en el año 2013, para ese año osciló alrededor de las 390 ppm ó 0,0390 %, para el a año 2019 se reporta un aumento a 410 ppm ó 0,041 % (40). Por lo que se determina que el valor inicial de dióxido de carbono computarizado se encuentra desactualizado.

Cuadro 1. Resultados medición aire

Compuesto	NASA (%) ¹	Gaspac Advance GS3LW/P (%)	Error (%)
Oxígeno	20,95	20,9	0,24
Nitrógeno	78,08	78,8	0,92
Dióxido de Carbono	0,04	0,03	25,00

¹ (39)

El cuadro 2 muestra la respuesta a tres cambios distintos de concentración realizados dentro del volumen de control. De los tres cambios de volumen de dióxido de carbono aplicado el volumen de control, el que presentó mayor porcentaje de error fue el de 50 mL con un 9,44 %, aun así los otros dos volúmenes de analizados de 100 y 200 mL mantienen porcentajes aceptables de diferencia.

Los datos registrados presentan muy poca variabilidad en todos los casos siendo menor a un 0,5 %, y el valor de sus lecturas se encontraron dentro del intervalo inferior de la incertidumbre del equipo. Por lo que se determina que el medidor de gases cuenta con una buena precisión en sus mediciones, pero se encuentra con poca exactitud en la prueba realizada de 50mL en particular. La poca exactitud puede deberse a que no se contaba con un sistema de mezclado incorporado dentro del volumen de control por lo que las muestras tomadas pudieron haber comprendido una falta de homogeneidad a la hora de ser analizadas. Sin embargo, se determina que el equipo posee una respuesta adecuada a los cambios de concentración a los que fue expuesto.

Cuadro 2. Resultados de la respuesta a los cambios en la concentración.

ΔCO_2 (mL)	ΔCO_2 Teórico (%)	Prueba 1 ΔCO_2 (%)	Prueba 2 ΔCO_2 (%)	Prueba 3 ΔCO_2 (%)	ΔCO_2 Prom (%)	Des.Est (%)	Error (%)
50	1,19	0,50	0,50	0,80	0,6	$\pm 0,17$	9,44
100	2,38	2,00	2,50	2,80	2,4	$\pm 0,40$	1,95
200	4,76	4,40	4,60	4,40	4,5	$\pm 0,12$	5,83

3.2 Calibración de los sensores BMP180.

La calibración de los sensores BMP180, fue evaluada con respecto a dos condiciones de medición, establecida en condiciones a presión atmosférica y luego en una atmosfera presurizada con un incremento determinado, cada prueba fue llevada a cabo por triplicado.

3.2.1 Condición de Presión Atmosférica

La presión atmosférica fue revisada contra los registros de la estación meteorológica de la Universidad de Costa Rica ubicada en la Facultad de Ingeniería (EMFI), San Pedro Montes de Oca, latitud: 9°56'14"N, longitud: 84°02'39"W y a una altura de 1236 msnm (41), y con una velocidad de viento promedio de 8,8 km/h (2,44 m/s) (42). El Centro para Investigaciones en Granos y Semillas de la Universidad de Costa Rica (CIGRAS) a donde fue realizada esta prueba, se encuentra ubicado latitud: 9°56'22,73"N, longitud: 84°02'54,43"W y a una altura de 1210 msnm y con una velocidad de viento de 0 m/s asumida, debido a que la prueba se llevó a cabo en un recinto cerrado. Esta diferencia de altura entre los dos puntos, hace que los datos obtenidos de la Estación Meteorológica requieran de un ajuste antes de ser comparados con las lecturas del sensor BMP180, el cual fue determinado con la ecuación de Bernoulli (43).

$$P + \frac{V^2 \rho}{2g} + \rho g z = cte \quad (ec. 4)$$

Donde:

P , presión (Pa).

V , velocidad (m/s).

ρ , densidad del aire (kg/m^3).

g , aceleración de la gravedad (9,81 m/s²).

z , altura (m).

Aplicando el principio de la conservación de la energía a la (ec. 4) se tiene la expresión para determinar el ajuste mencionado denotada como (ec. 5).

$$P_1 + \frac{V_1^2 \rho}{2g} + \rho g z_1 = P_2 + \frac{V_2^2 \rho}{2g} + \rho g z_2$$
$$P_1 = P_2 + \frac{V_2^2 \rho}{2g} + \rho g (z_2 - z_1) \quad (ec. 6)$$

Donde:

P_1 , presión atmosférica en el CIGRAS (Pa).

P_2 , presión atmosférica en la EMFI (Pa).

V_1 , velocidad viento en el CIGRAS (m/s).

V_2 , velocidad viento en la EMFI (m/s).

z_1 , altura del CIGRAS (m).

z_2 , altura de EMFI (m).

ρ , densidad del aire (1,184 kg/m³ a 25 °C y 1 atm) (43).

g , aceleración de la gravedad (9,81 m/s²).

Una vez hecha esta corrección se procedieron a comparar las mediciones realizadas por los sensores BMP180 contra esta presión corregida y mostrar el comportamiento general y variación general en sus lecturas, utilizando la (ec. 7)

$$E = \frac{VT - VE}{VT} * 100 \quad (ec. 7)$$

Donde:

E , error.

VT , presión atmosférica CIGRAS (Pa)

VE , lecturas de los sensores BMP180 (Pa)

3.2.2 Condición Presurizada

Para determinar la respuesta de los sensores cambios de presión generados en la atmósfera que los rodea se hizo uso del compresor de aire Gast DOA-P704-AA, mostrado en la Figura 5. Este fue condicionado para generar un diferencial de presión de 250 hPa (± 125 hPa).

Los sensores BMP180 fueron colocados dentro un recipiente plástico, el cual contaba con tres aberturas en su tapa, señaladas en la Figura 3. La abertura 3 fue utilizada para acoplar la manguera conectada a la salida del compresor y aplicar el diferencial de presión deseado, como se observa en la Figura 7. Las aberturas 1 y 2 cumplen la función de válvulas de alivio, las cuales permiten que el diferencial de presión generado por el compresor se mantenga constante dentro del recipiente.

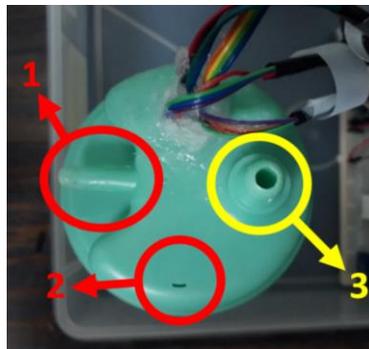


Figura 3. Descripción del equipo utilizado para medir condición presurizada (Fuente: Autor)



Figura 4. Ejecución de la prueba en condición presurizada (Fuente: Autor).

Los diferenciales de presión registrado por el BMP180, calculado haciendo uso de la (ec. 8), fueron comparados contra el diferencial generado por el compresor de 250 hPa (± 125 hPa), para determinar la precisión y exactitud de sus mediciones utilizando la (ec. 9).

$$\Delta P = P_f - P_i \quad (ec. 8)$$

Donde:

ΔP , diferencial de presiones (hPa).

P_1 , presión inicial (hPa).

P_2 , presión final (hPa).

El error fue calculado mediante:

$$E = \frac{250 - \Delta P}{250} * 100 \quad (ec. 9)$$

Donde:

E , error

3.2.3 Resultados calibración sensores de presión BMP180.

El cuadro 3 muestra el resumen de lecturas registradas por la estación meteorológica de los cuales se puede determinar que la presión atmosférica vista a través de períodos de tiempo mayores tiende a presentar una variabilidad mayor que si se mide en lapsos más cortos de tiempo. Sin embargo los valores promedio en el valor diario contra el mensual o el anual, se obtiene un porcentaje error del 0,10%, por lo que se puede considerar como una lectura estable.

Cuadro 3. Registros de la Estación Meteorológica en la Facultad de Ingeniería

Período	Máxima	Promedio*	Mínima	Desviación Estándar (%) *
Presión Hoy (hPa)	880,2	878,75	877,3	±2,05
Presión Mensual (hPa)	882,2	877,85	873,5	±6,15
Presión Anual (hPa)	882,2	877,85	873,5	±6,15

*calculados por el autor

Al realizar el ajuste requerido, se tiene que la presión en el CIGRAS debe de ser 3,024 hPa mayor a la registrada por la estación meteorológica, el cuadro 4 muestra los resultados de la presión ajustada. Además de este incremento de presión los datos presentan el mismo comportamiento de los datos presentados en el cuadro 3.

Cuadro 4. Presión atmosférica ajustada para el CIGRAS.

Período	Máxima	Promedio*	Mínima	Desviación Estándar (%)*
Presión Hoy (hPa)	883,22	881,77	880,32	±2,05
Presión Mensual (hPa)	885,22	880,87	876,52	±6,15
Presión Anual (hPa)	885,22	880,87	876,52	±6,15

*calculado por el autor

El cuadro 5 muestra el resumen las lecturas de las tres pruebas realizadas a presión atmosférica en el CIGRAS, se determina que los sensores presentan un comportamiento estable tanto al ser comparados entre ellos, ya que su mayor variación se encuentra en sus lecturas de valor promedio y mínima con una desviación estándar de 0,91 %; por otro lado, el sensor que mas variación presentó a lo largo de las pruebas fue el Sensor 3 con una desviación estándar de 0,21 %. Estos dos valores se consideran lo suficientemente bajos para determinar que los sensores poseen un sistema de medición estable y relativamente invariable, al compararlos con sus incertidumbres reportados por el fabricante.

Cuadro 5. Mediciones presión atmosférica sensores BMP180.

Sensor	P.max (hPa)	P.prom (hPa)	P.min (hPa)	Desviación Estándar (%)**
1	885.05	883.83	883.58	±0.17
2	884.57	883.31	883.04	±0.18
3	885.44	884.10	883.80	±0.21
4	882.92	881.56	881.31	±0.18
5	884.81	883.57	883.31	±0.17
6	884.18	882.83	882.56	±0.20
Desviación Estándar (%)*	±0.88	±0.91	±0.91	

*Entre las mediciones de los 6 sensores

**Entre las mediciones de cada sensor individual

El cuadro 6 muestra los porcentaje de error entre las lecturas de los sensores BMP 180 y la presión atmosférica del CIGRAS en el Cuadro 4, el mayor error lo presenta el Sensor 4 con un 0,29 % en su lectras de presión mínima, sin embargo este valor se considera lo suficientemente bajo como para determinar la validez de las lecturas dadas por los sensores BMP180.

Cuadro 6. Porcentajes de error Presión atmosférica

Sensor	Error P.max (%)	Error P.prom (%)	Error P.min (%)
1	0,13	0,01	0,04
2	0,08	0,07	0,10
3	0,17	0,02	0,01
4	0,11	0,26	0,29
5	0,10	0,04	0,07
6	0,14	0,14	0,15

El cuadro 7 muestra el comportamiento de los sensores BMP180 durante la prueba presurizada, en este caso se puede determinar que los sensores presentaron poca variación con la excepción de las lecturas máximas ya estas presentan desviación estándar de 2,41 %. También se observó que esta variación se duplica al comparar las mediciones individuales de cada sensor, sin embargo es una variación constante y le puede ser atribuida a la forma en que el compreso inyecta aire al sistema ya que este no aplica un flujo de aire constante, sino por cortas descargas consecutivas, produciendo los picos de presión máxima y mínima observados periódicamente. Aún así las lecturas promedio mantuvieron una desviación estándar de 0,34 % lo cual se considera un valor lo suficientemente bajo para determinar que los sensores se mantienen estables al ser expuestos a cambios de presión.

Cuadro 7. Diferenciales de presión registrados durante la prueba presurizada.

Sensor	ΔP .max (hPa)	ΔP .prom (hPa)	ΔP .min (hPa)	Desviacion Estandar (%) ²
1	268,34	244,97	233,68	±6,96
2	274,15	245,51	235,46	±6,34
3	274,74	245,73	234,62	±6,17
4	270,37	245,81	233,85	±6,28
5	271,25	245,24	234,57	±6,65
6	272,56	245,77	234,24	±6,23
Desviacion estandar (%) ¹	±2,41	±0,34	±0,64	

¹Entre las mediciones de los 6 sensores

²Entre las mediciones de cada sensor individual

El cuadro 8 muestra los porcentajes de error de la prueba presurizada la cual muestra que las lecturas promedio registradas durante la prueba que poseen el mayor porcentaje de error correspondieron al Sensor 1 con un 2,83%, nuevamente este error se considera lo suficientemente pequeño para determinar que los sensores responden de forma correcta a cambios de presión en su ambiente. Los errores de la lecturas máxima y mínimas son mostrados mas no poseen mayor peso en el análisis debido a que corresponden al comportamiento del compresor previamente descrito.

Cuadro 8. Porcentajes error de ΔP

Sensor	Error P.max (%)	Error P.prom (%)	Error P.min (%)
1	7,34	2,83	0,02
2	9,66	2,57	0,01
3	9,90	2,32	0,02
4	8,15	2,30	0,06
5	8,50	2,70	0,01
6	9,02	2,31	0,04

3.3 Calibración de los sensores DHT22.

Los sensores de humedad relativa y temperatura se calibraron de acuerdo a cuatro condiciones de humedad relativa distintas, utilizando tres soluciones sobresaturadas de las sales y una sal en estado sólido, mostradas en el Cuadro 9, así como el sensor marca *HOBO*, el cual cumplió la función de ser el sensor de control.

Cuadro 9. Soluciones de sales utilizadas

Sal	Temperatura Teórica (°C)	HR Teórica (%)
$CaCl_2(s)$ ¹	25	15,00
$CaCl_2(ac)$ ²	24,5	31
$NaCl(ac)$ ³	28	75,16
$KNO_3(ac)$ ³	25	93,58

¹(44), ²(45), ³(46)

Las concentraciones necesarias fueron determinadas de acuerdo a lo expuesto en la enciclopedia MERCK (45), realizando los cálculos con base a un volumen de 500mL de agua destilada. Dando como resultado las concentraciones mostradas en el Cuadro 10

Cuadro 10. Concentraciones de Sales utilizadas.

Sal	Concentración (g/mL)
$CaCl_{2(ac)}^2$	1,432
$NaCl_{(ac)}^3$	0,687
$KNO_{3(ac)}^3$	0,724

Posteriormente las disoluciones fueron colocadas en los desecadores mostrados en la Figura 5, en conjunto con el HOBO y un ventilador de computador de 12V con el objetivo de reducir el tiempo para llegar a la condición de equilibrio. Como sellador entre las tapa y recipiente se aplicó grasa de alto vacío Dow Corning ®. La condición de equilibrio fue determinada cuando la diferencia entre mediciones correspondió a un 0,5 %.



Figura 5. Soluciones de sales utilizadas. (Fuente: Autor)

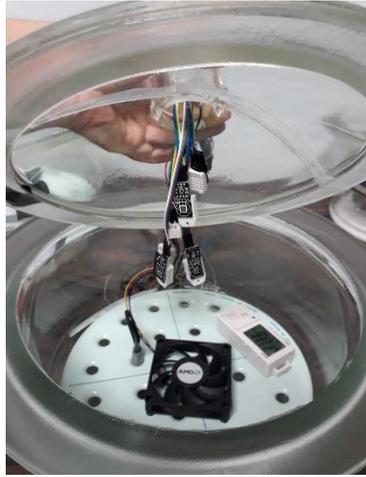


Figura 6. Ensamble de la prueba. (Fuente: Autor).

3.3.1 Calibración sensores de temperatura y humedad relativa DHT22.

El cuadro 11 muestra los resultados de las pruebas del comportamiento de los sensores DHT22 en las diferentes soluciones de sales, el CaCl_2 (s) fue el que llegó al equilibrio con mayor rapidez mientras que el NaCl (ac) fue la que tardó más en llegar al equilibrio. En esta solución también fue donde todos los sensores tuvieron los menores porcentajes de error en cuanto a las lecturas de temperatura y humedad relativa. Con respecto al registro de temperatura, todos los sensores con excepción del HOBO en tuvieron porcentajes de error por debajo del 5 %.

En cuanto a las lecturas de la humedad relativa A través de todas las soluciones los sensores 1 y 2 resultaron los de mejor desempeño a lo largo de todas las soluciones, mientras que los sensores 5 y 6 en conjunto con el HOBO en ciertas ocasiones como en la solución de CaCl_2

(ac) fueron los de peor desempeño, particularmente en la solución de CaCl₂ (s) llegaron a reportar porcentajes de error de 46,67 y 83,33 respectivamente.

Cuadro 31. Resultados del comportamiento de los sensores DHT22

Sal	Sensor	tiempo equilibrio (h)	Temperatura, equilibrio (°C)	HR.eq (%)	Error.Temp (%)	Error.HR (%)
CaCl ₂ (s)	1	11,78	25,00	12,80	0,00	14,67
	2		24,90	11,40	0,40	24,00
	3		24,80	12,80	0,80	14,67
	4		24,60	12,60	1,60	16,00
	5		24,70	8,00	1,20	46,67
	6		24,80	2,50	0,80	83,33
	Hobo		23,79	14,19	4,84	5,40
CaCl ₂ (ac)	1	19,22	24,70	33,40	0,82	7,74
	2		24,60	32,80	0,41	5,81
	3		24,60	33,70	0,41	8,71
	4		24,40	34,20	0,41	10,32
	5		24,60	29,30	0,41	5,48
	6		24,40	29,40	0,41	5,16
	Hobo		24,77	39,80	1,10	28,39
NaCl (ac)	1	22,14	28,00	75,00	0,00	0,21
	2		27,90	77,40	0,36	2,98
	3		28,00	78,50	0,00	4,44
	4		27,70	78,00	1,07	3,78
	5		27,90	91,00	0,36	21,08
	6		27,80	86,7	0,71	15,35
	Hobo		23,57	80,55	15,82	7,17
KNO ₃ (ac)	1	9,78	25,00	94,10	0,00	0,56
	2		25,10	94,90	0,40	3,98
	3		25,10	97,30	0,40	2,69
	4		24,80	96,10	0,80	6,75
	5		25,00	99,90	0,00	6,75
	6		25,00	99,90	0,00	6,75
	Hobo		24,99	95,00	0,04	1,52

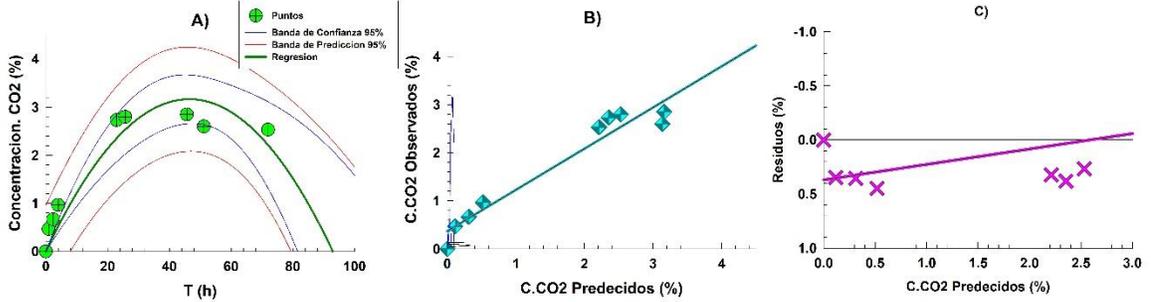
Para disminuir los porcentajes de error en los sensores no solo de peor desempeño como 5 y 6 sino también en el resto con la excepción del sensor 1, se realizó una regresión lineal entre los valores de humedad relativa observados y teóricos, dando como resultados las relaciones mostradas en el cuadro 12. Estas ecuaciones fueron utilizadas como forma de uniformizar las lecturas de todos los sensores y realizar correcciones a sus mediciones.

Cuadro 12. Resultados de la calibración de los DHT22

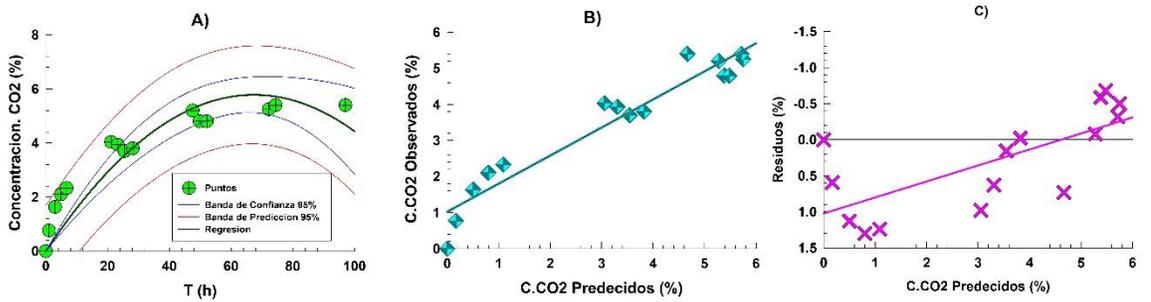
Regresión lineal	Sensor	a	B	R ²
$y = ax + b$	1	1,012	-0,755	99,99
	2	0,974	0,813	99,99
	3	0,965	-0,097	99,97
	4	0,981	0,559	99,99
	5	0,799	8,610	97,76
	6	0,816	8,417	99,22
	Hobo	0,986	-2,886	98,68

ANEXO 4. Gráficos para Ajuste 5: regresión A), observados vs predcidos B) y residuos C).

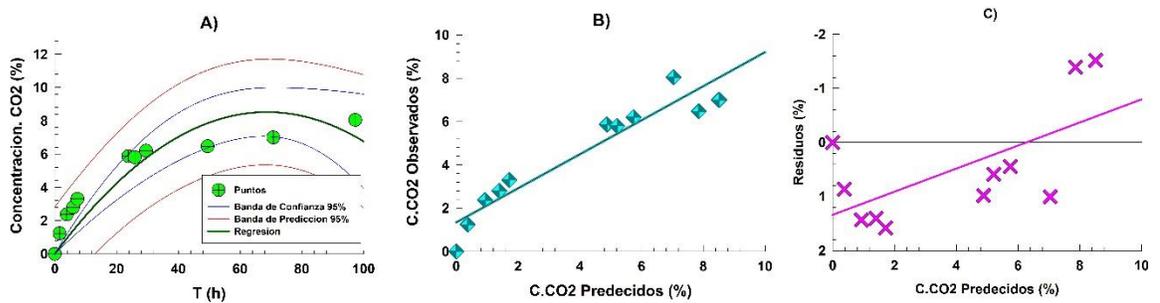
Tueste Claro 15°C



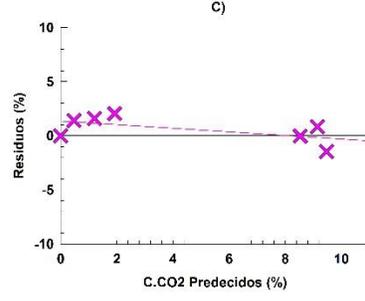
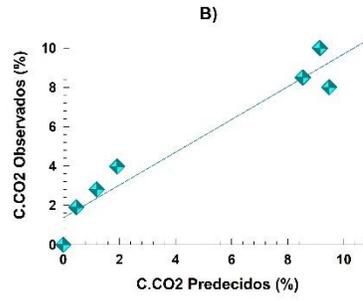
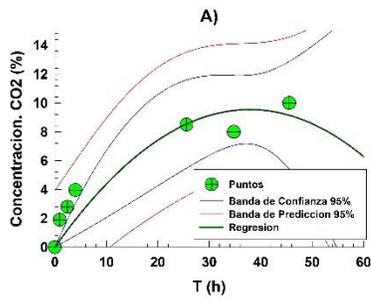
Tueste Claro 25°C



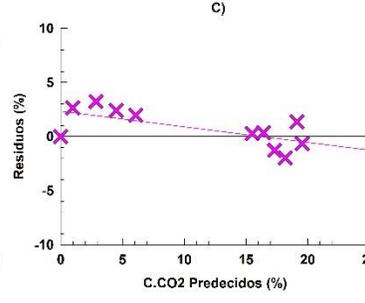
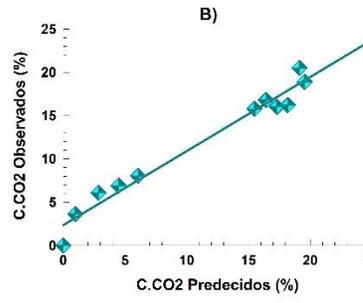
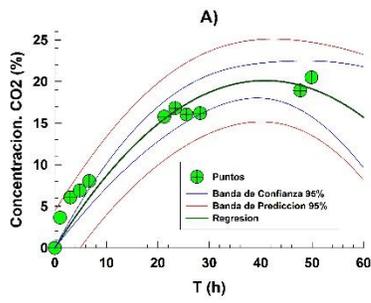
Tueste Claro 35°C



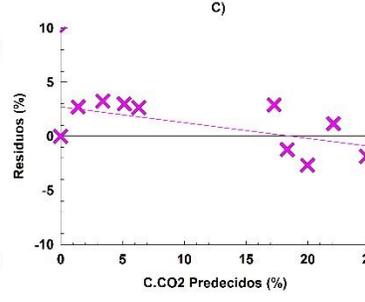
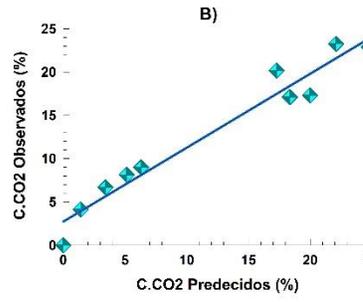
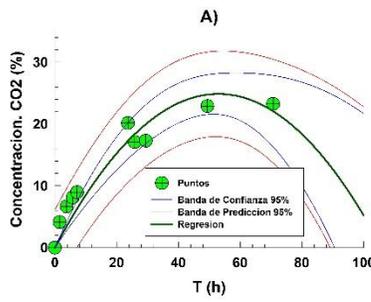
Tuete Medio 15°C



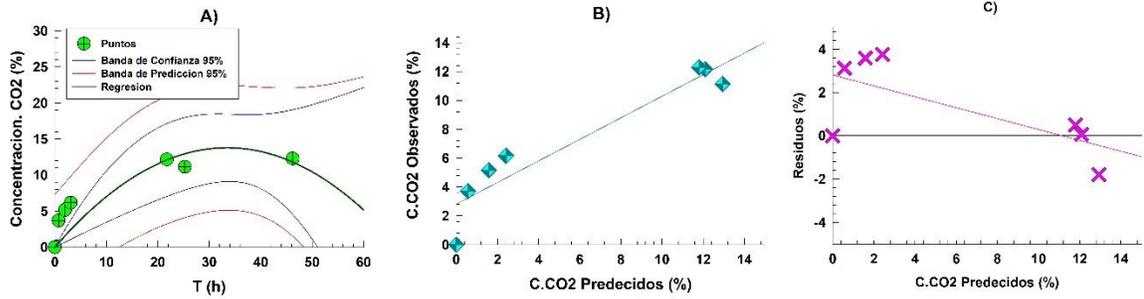
Tuete Medio 25°C



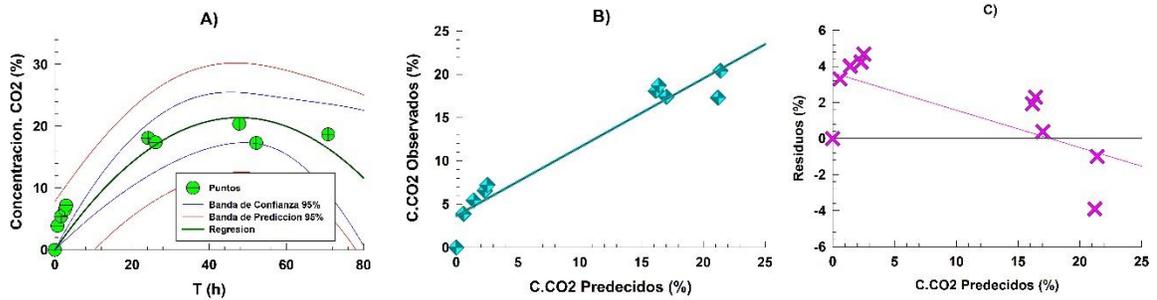
Tuete Medio 35°C



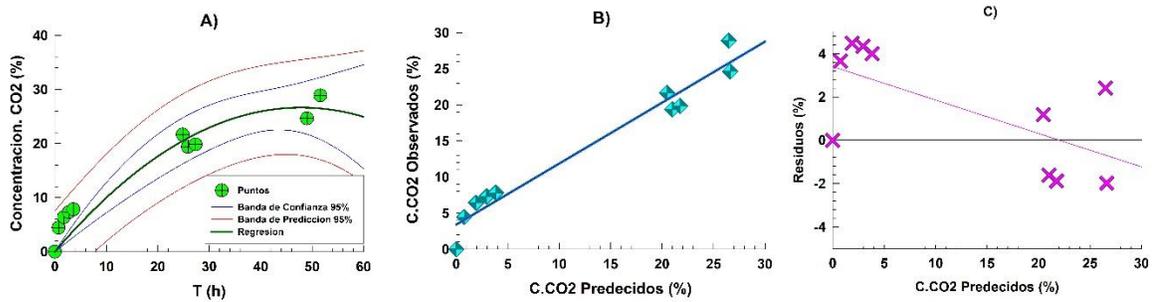
Tuete Moderadamente Oscuro 15°C



Tuete Moderadamente Oscuro 25°C

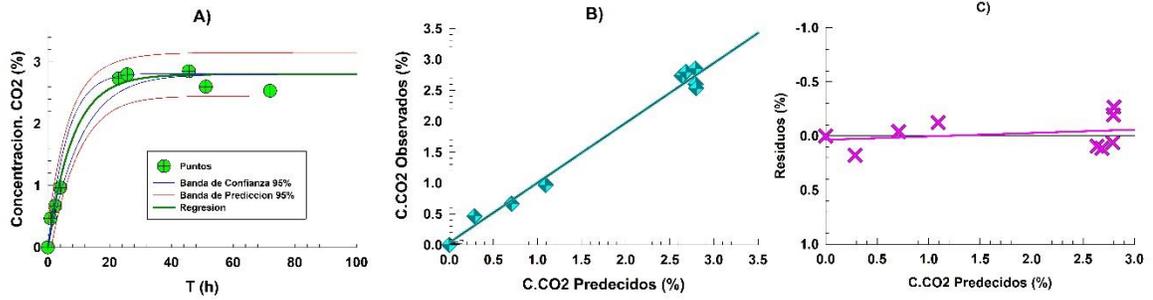


Tuete Moderadamente Oscuro 35°C

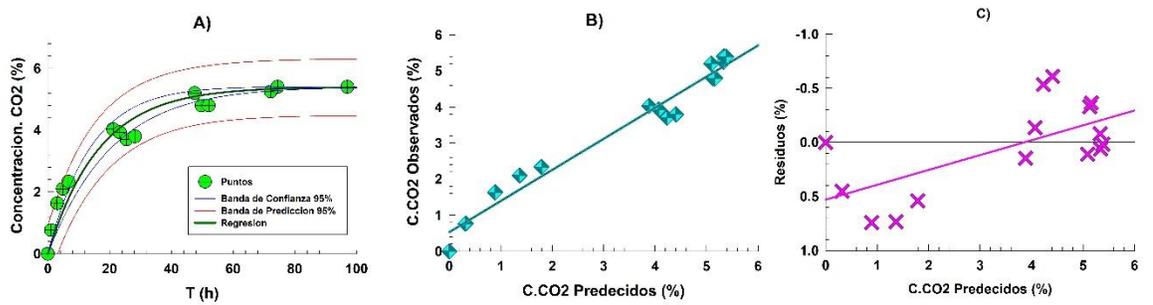


ANEXO 5. Gráficos para Ajuste 3: de regresión A), observados vs predecidos B) y residuos C).

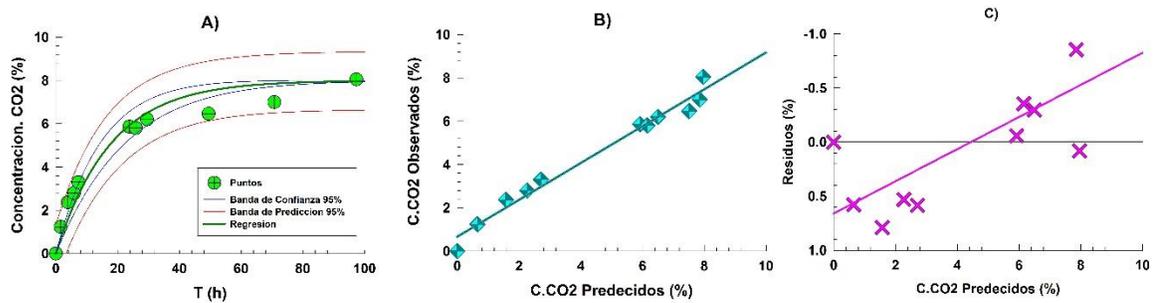
Tuete Claro 15°C



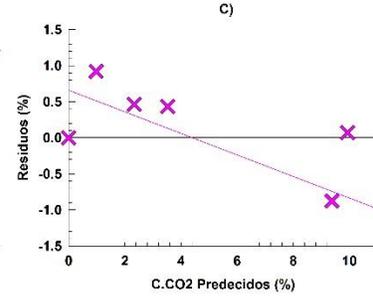
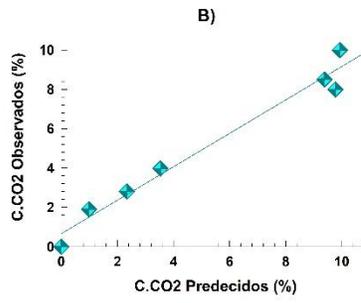
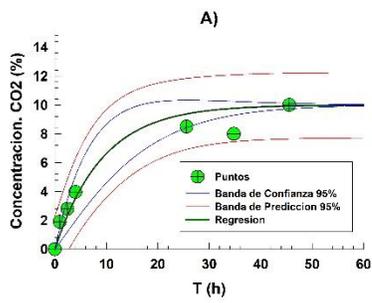
Tuete Claro 25°C



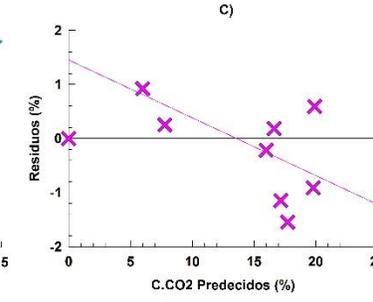
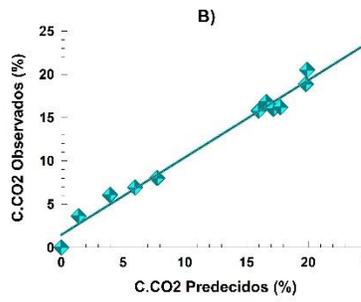
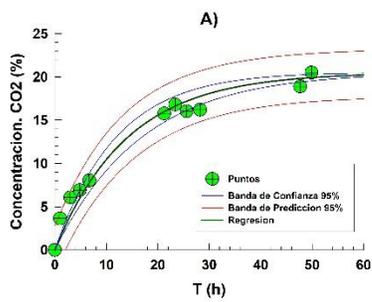
Tuete Claro 35°C



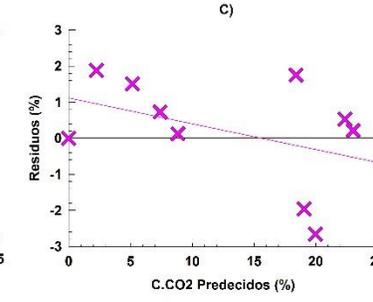
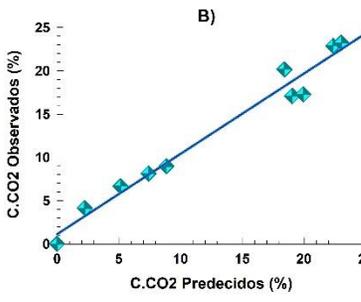
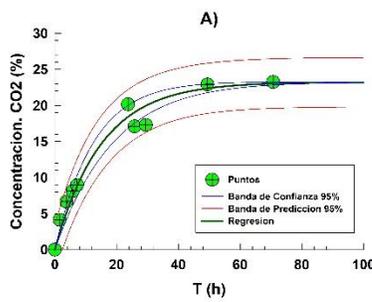
Tuete Medio 15°C



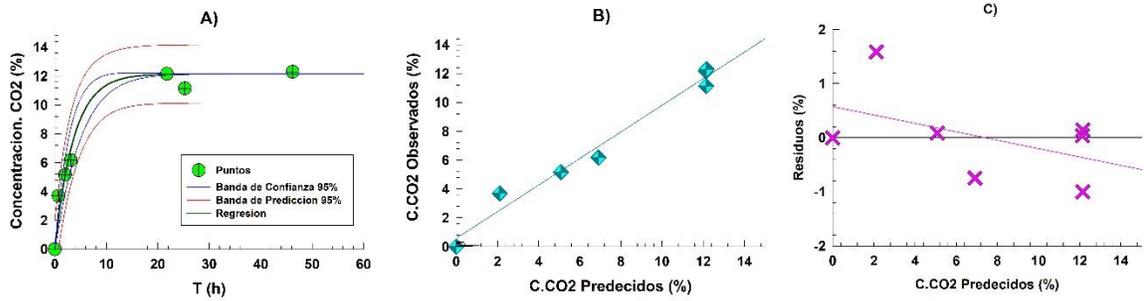
Tuete Medio 25°C



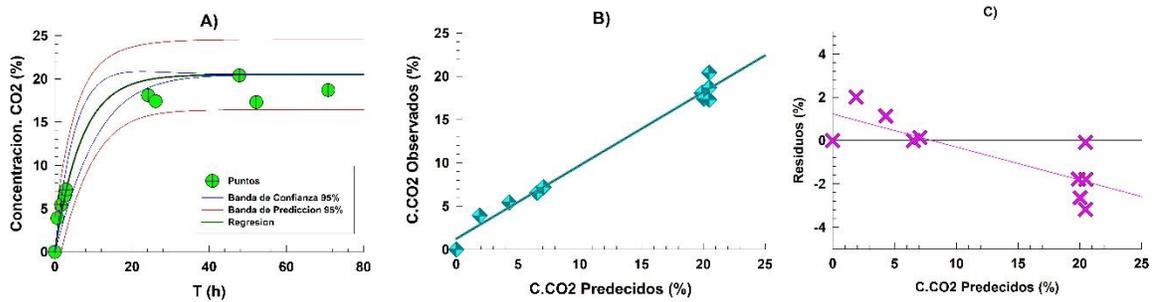
Tuete Medio 35°C



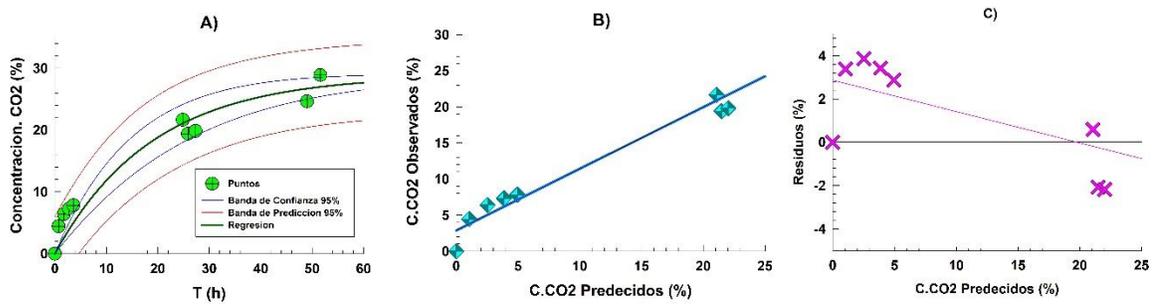
Tuete Moderadamente Oscuro 15°C



Tuete Moderadamente Oscuro 25°C

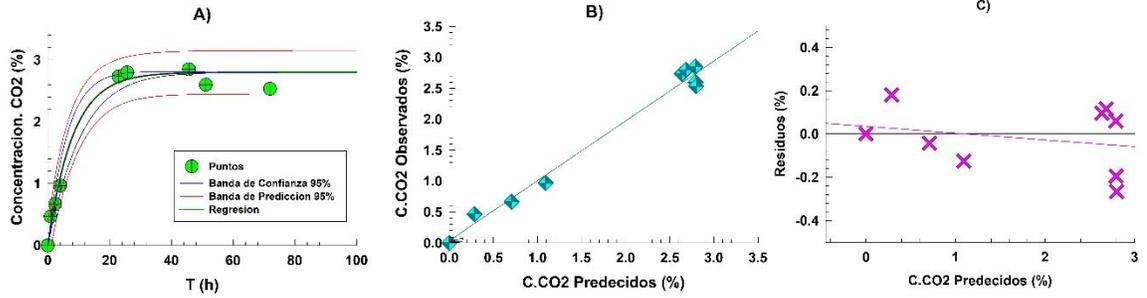


Tuete Moderadamente Oscuro 35°C

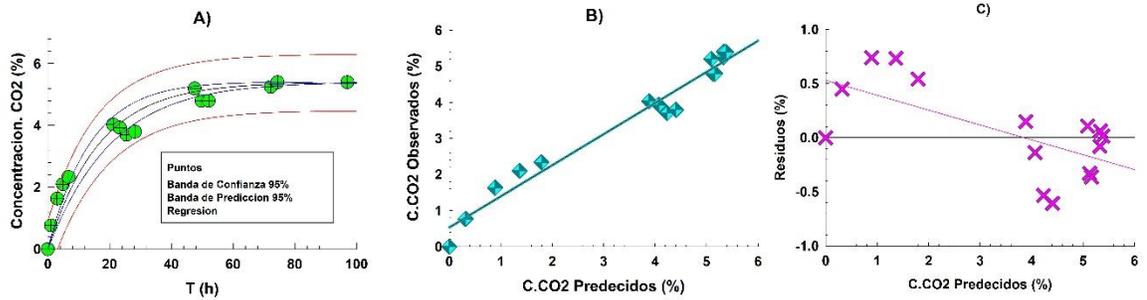


ANEXO 6. Gráficos para Ajuste 6: de regresión A), observados vs predcidos B) y residuos C).

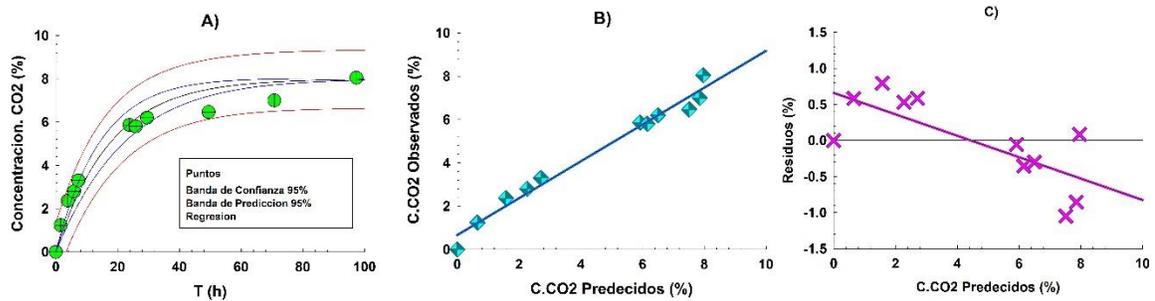
Tuete Claro 15°C



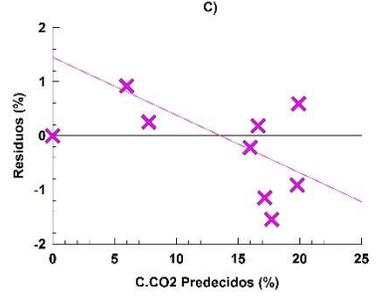
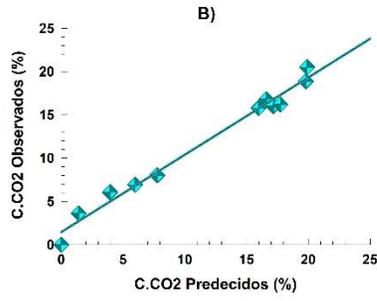
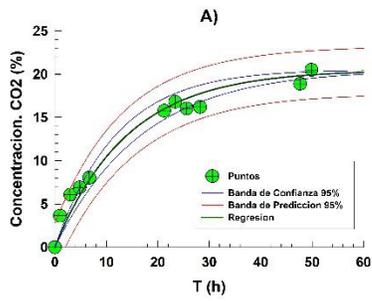
Tuete Claro 25°C



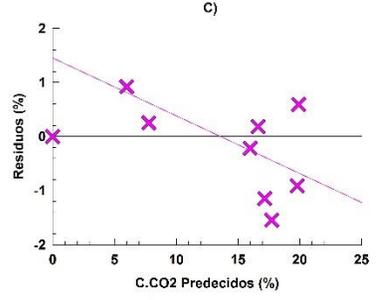
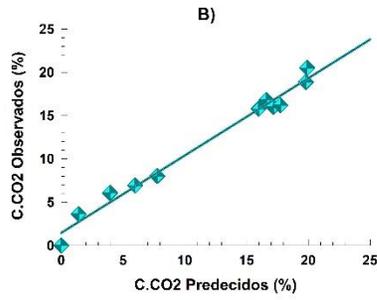
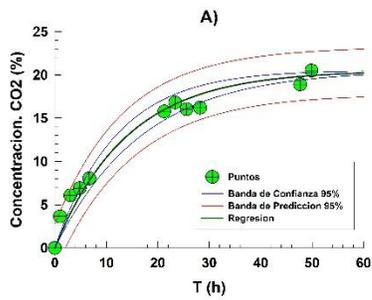
Tuete Claro 35°C



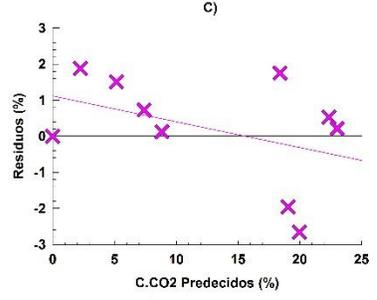
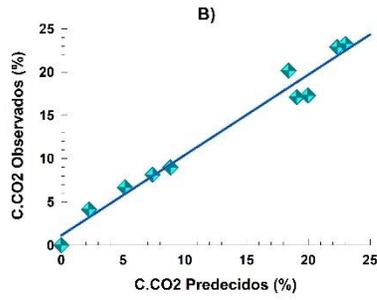
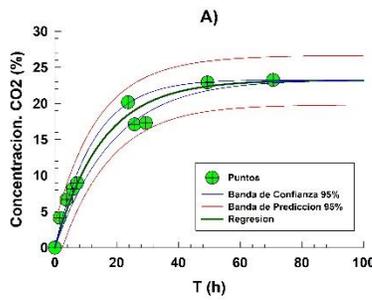
Tuete Medio 15°C



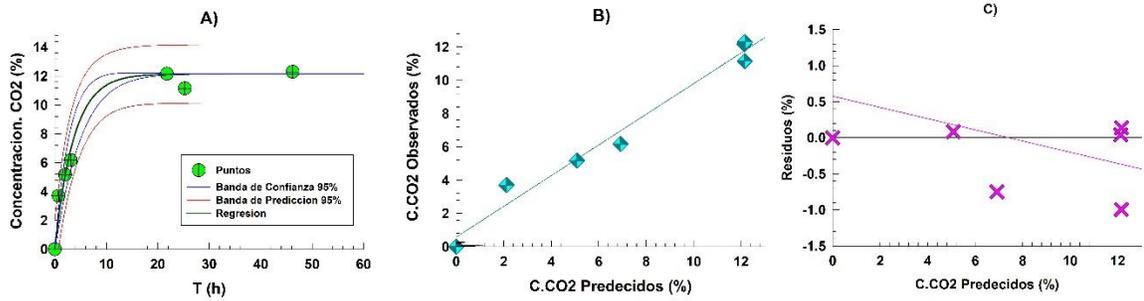
Tuete Medio 25°C



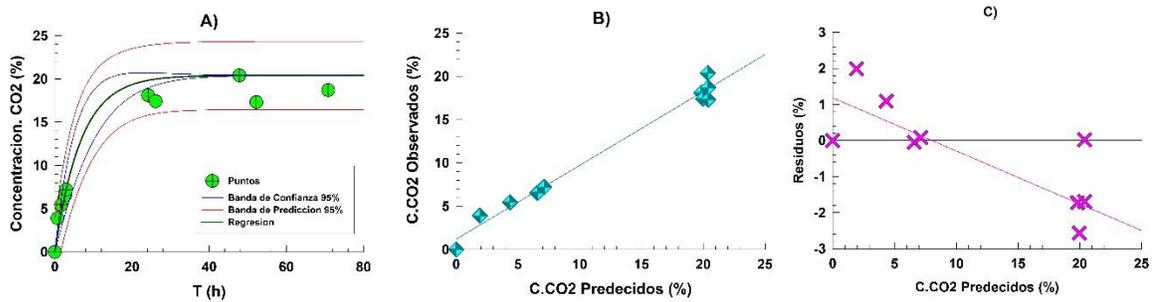
Tuete Medio 35°C



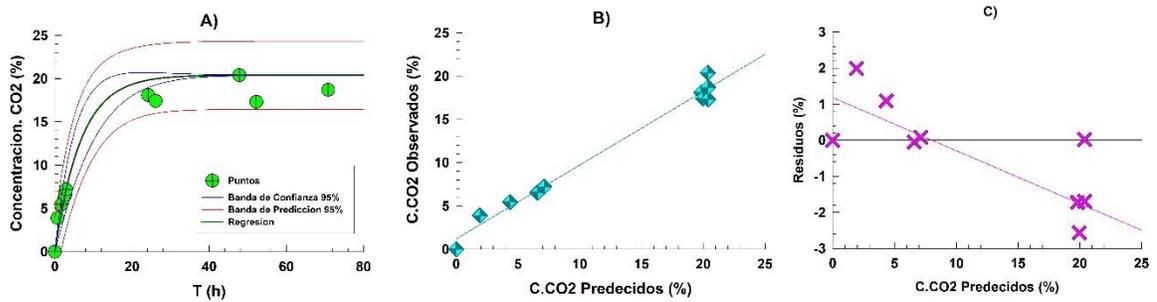
Tuete Moderadamente Oscuro 15°C



Tuete Moderadamente Oscuro 25°C

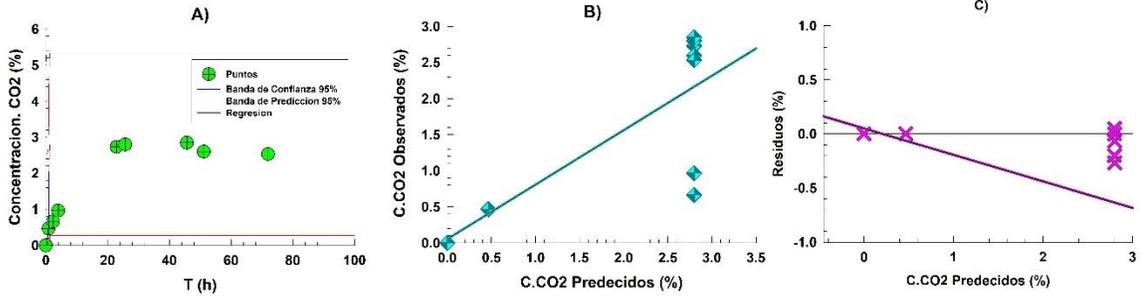


Tuete Moderadamente Oscuro 35°C

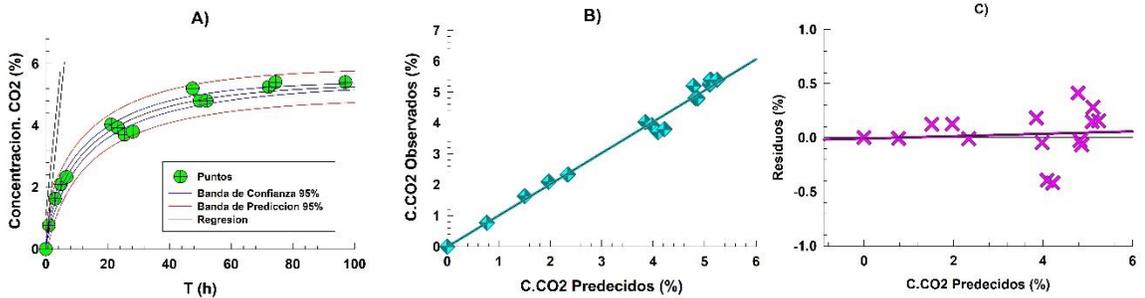


ANEXO 7. Gráficos para Ajuste 4: de regresión A), observados vs predcidos B) y residuos C).

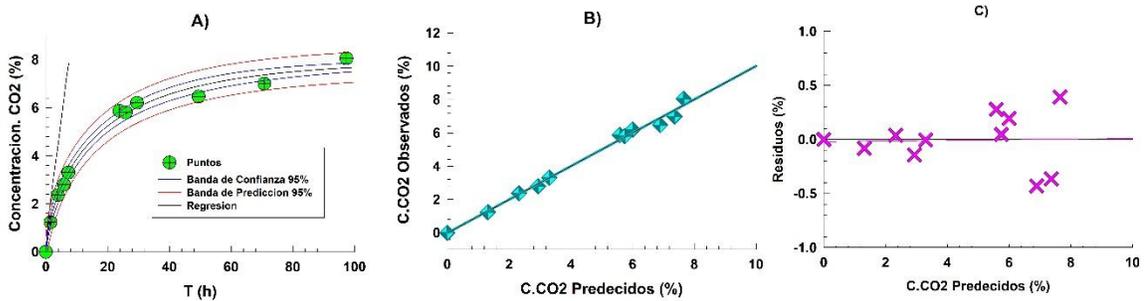
Tuete Claro 15°C



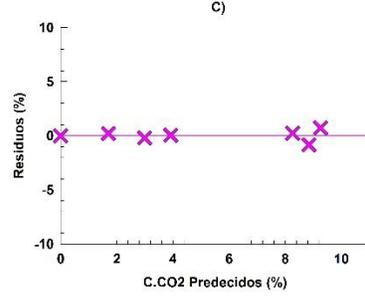
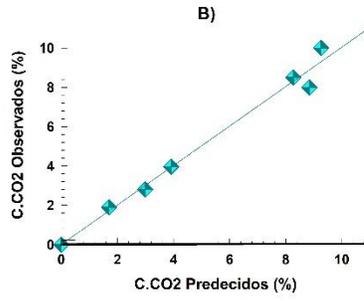
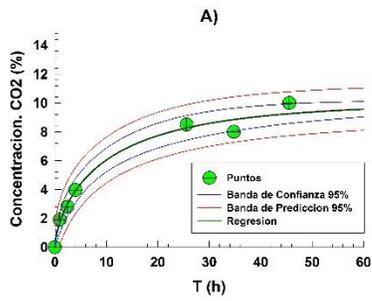
Tuete Claro 25°C



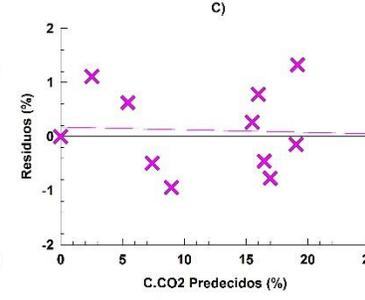
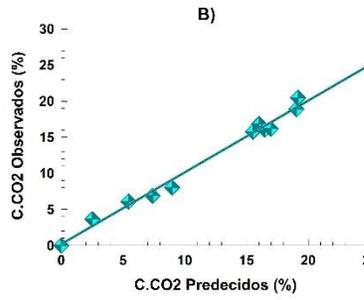
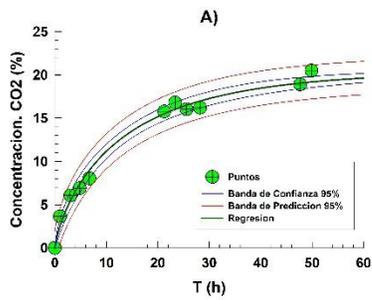
Tuete Claro 35°C



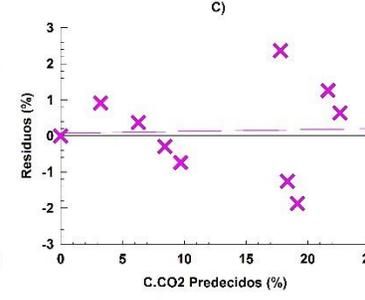
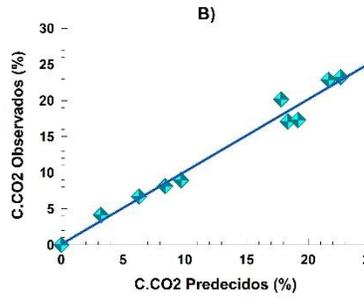
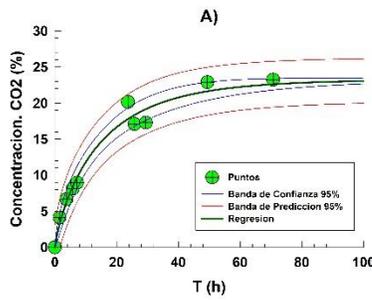
Tuete Medio 15°C



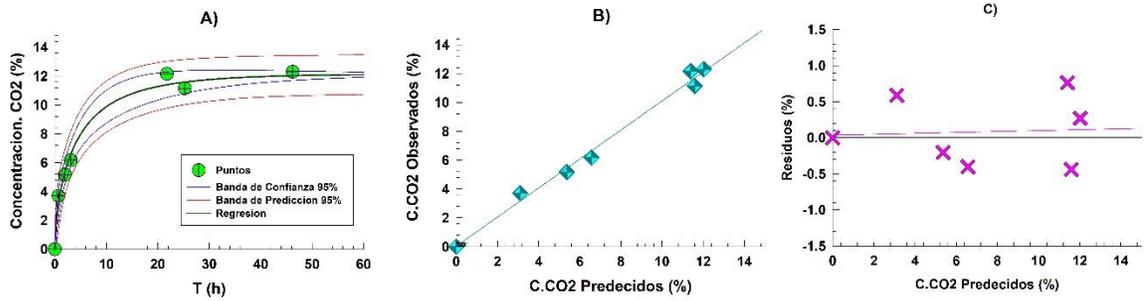
Tuete Medio 25°C



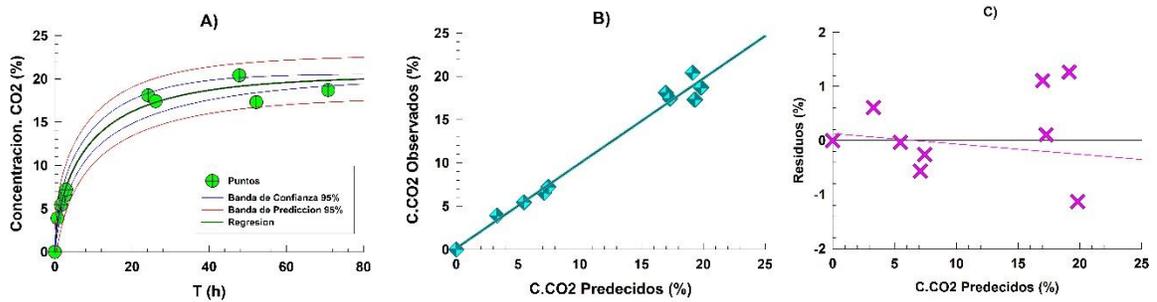
Tuete Medio 35°C



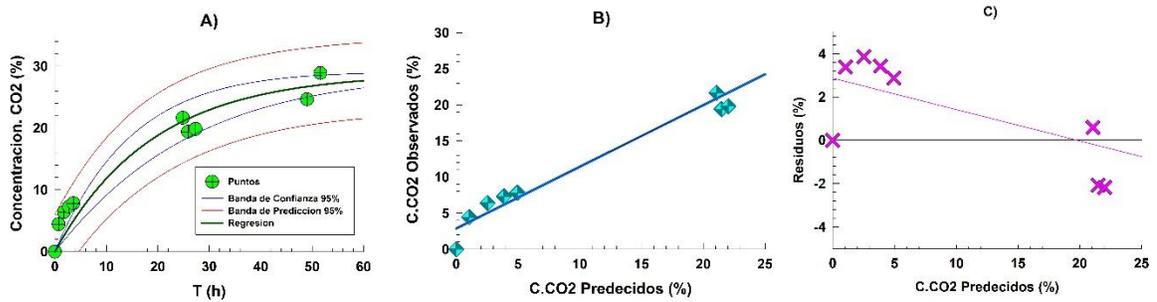
Tuete Moderadamente Oscuro 15°C



Tuete Moderadamente Oscuro 25°C

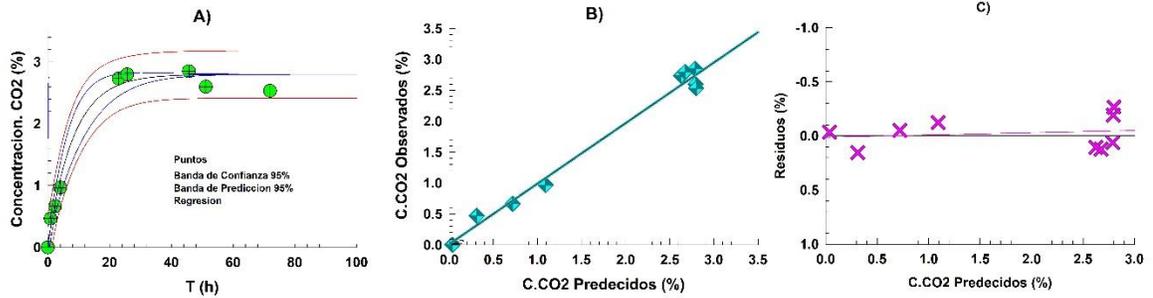


Tuete Moderadamente Oscuro 35°C

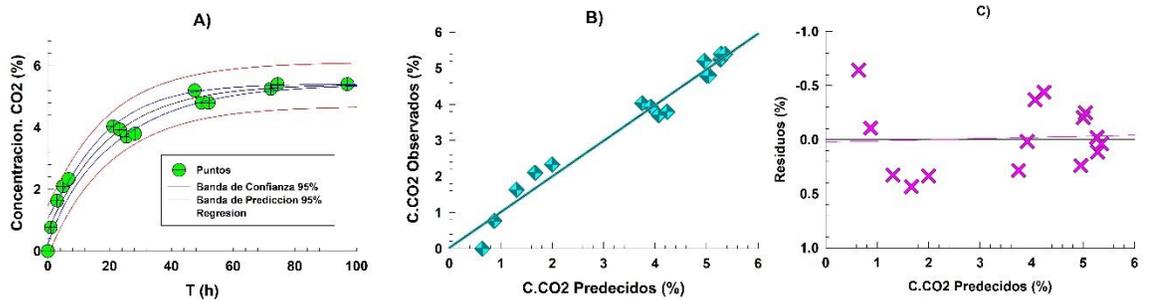


ANEXO 8. Gráficos para Ajuste 7: de regresión A), observados vs predecidos B) y residuos C).

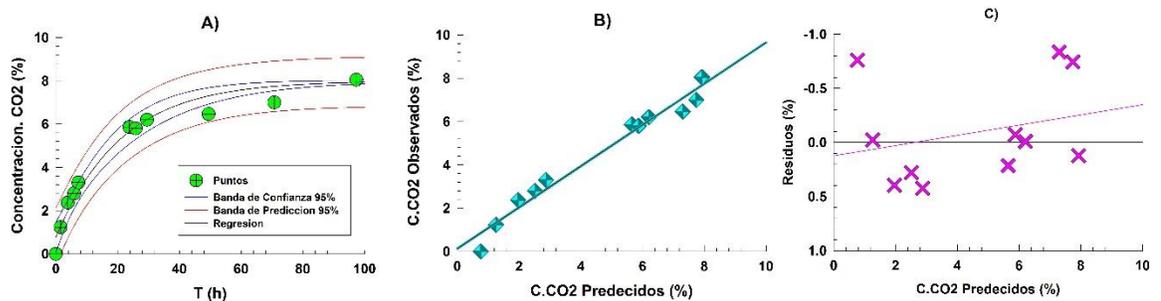
Tuete Claro 15°C



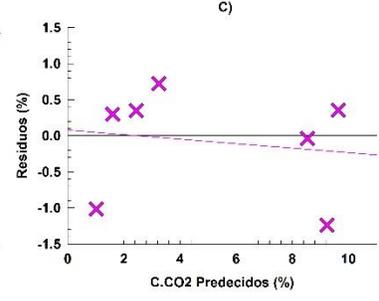
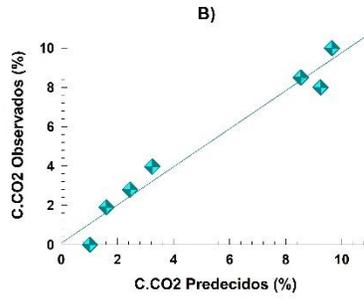
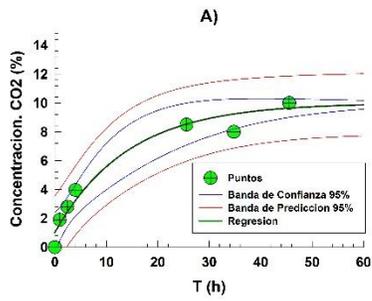
Tuete Claro 25°C



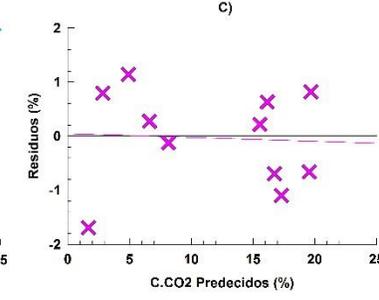
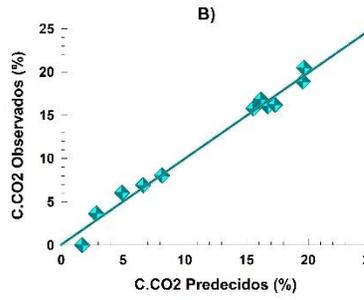
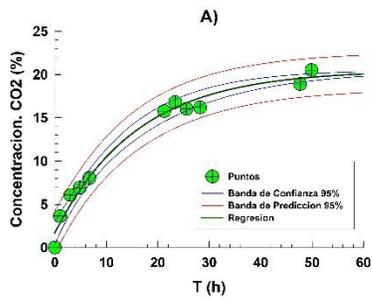
Tuete Claro 35°C



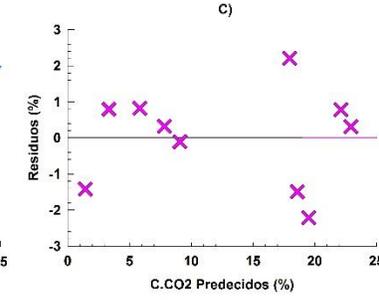
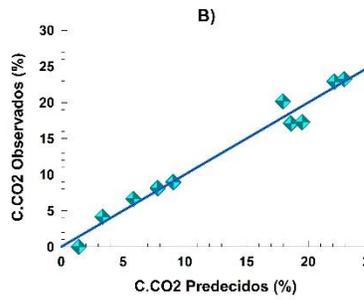
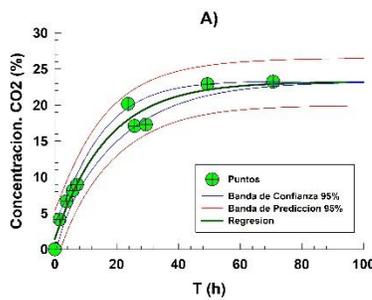
Tuete Medio 15°C



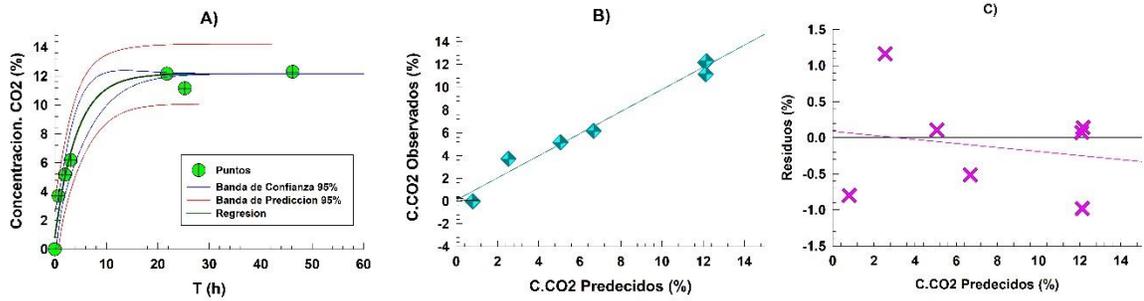
Tuete Medio 25°C



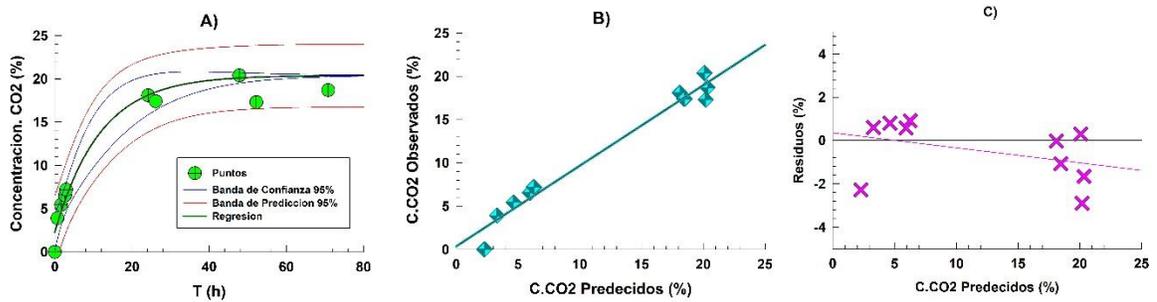
Tuete Medio 35°C



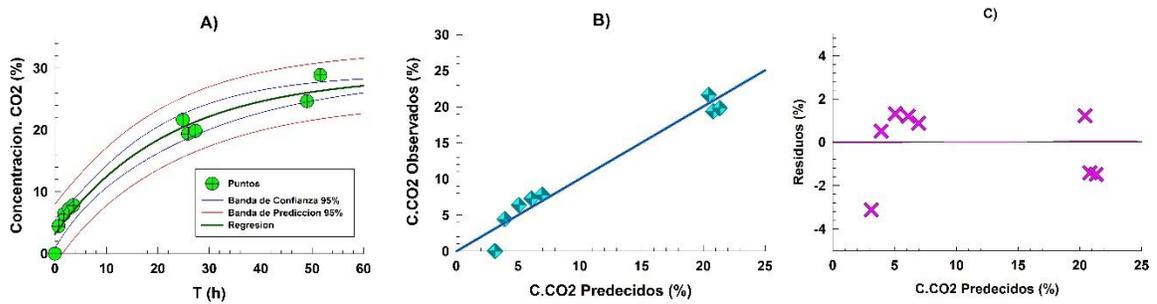
Tuete Moderadamente Oscuro 15°C



Tuete Moderadamente Oscuro 25°C

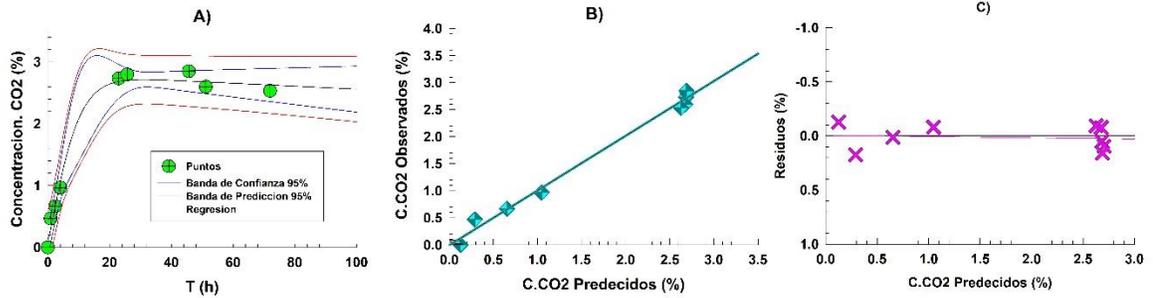


Tuete Moderadamente Oscuro 35°C

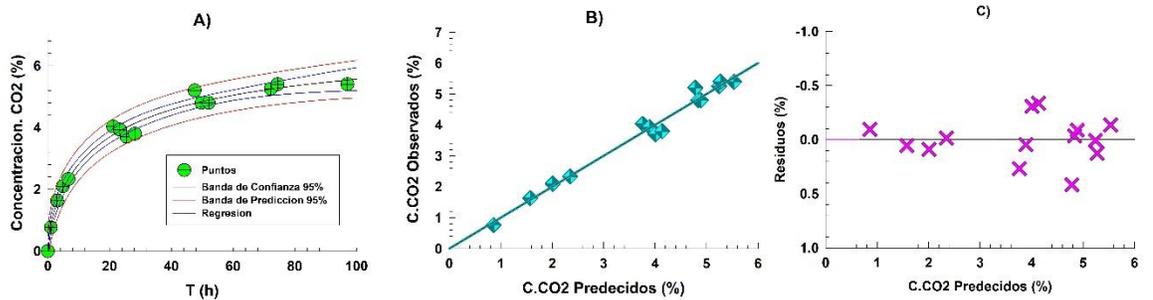


ANEXO 9. Gráficos para Ajuste 1: de regresión A), observados vs predecidos B) y residuos C).

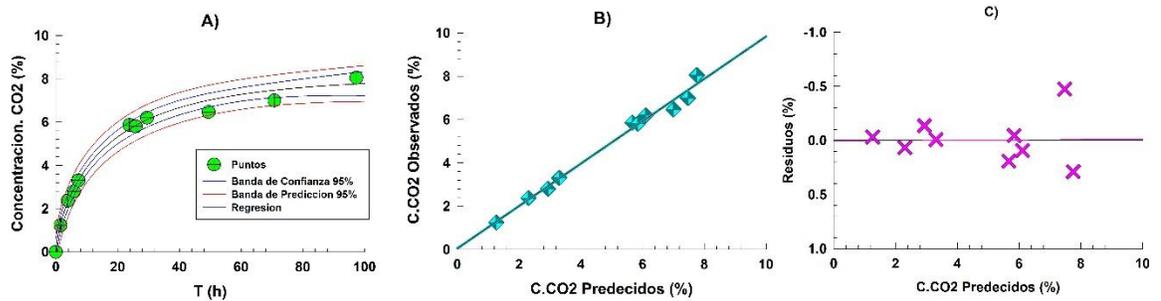
Tuete Claro 15°C



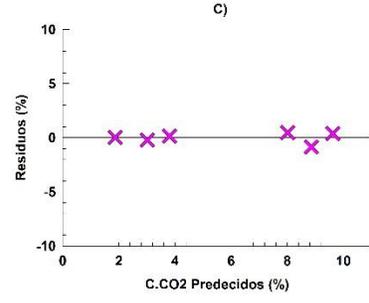
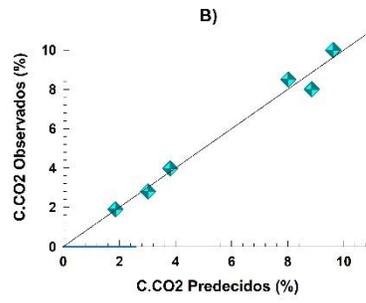
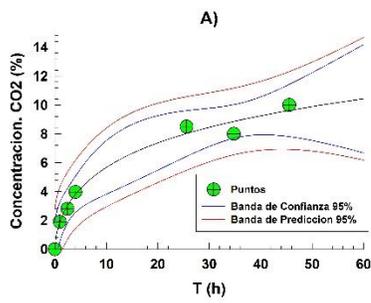
Tuete Claro 25°C



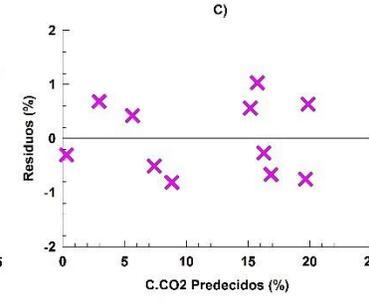
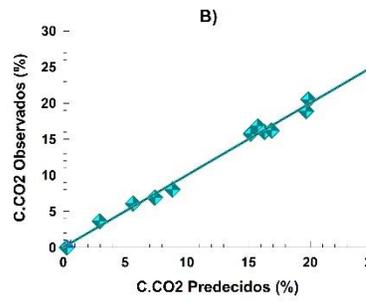
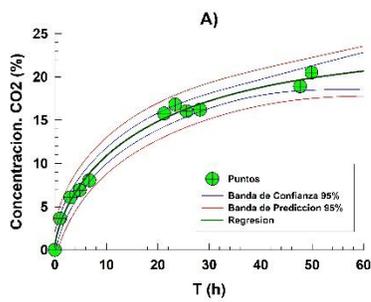
Tuete Claro 35°C



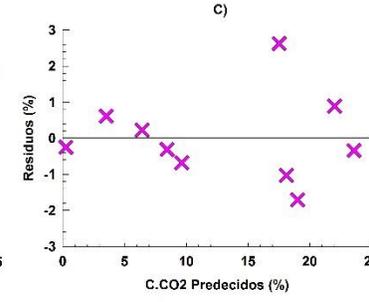
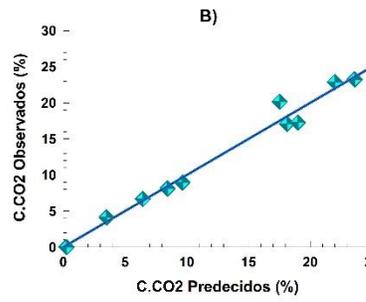
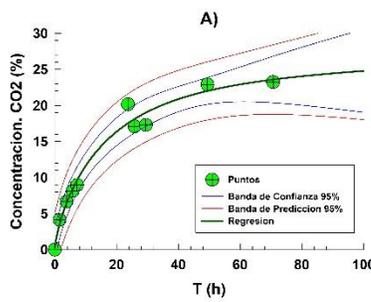
Tuete Medio 15°C



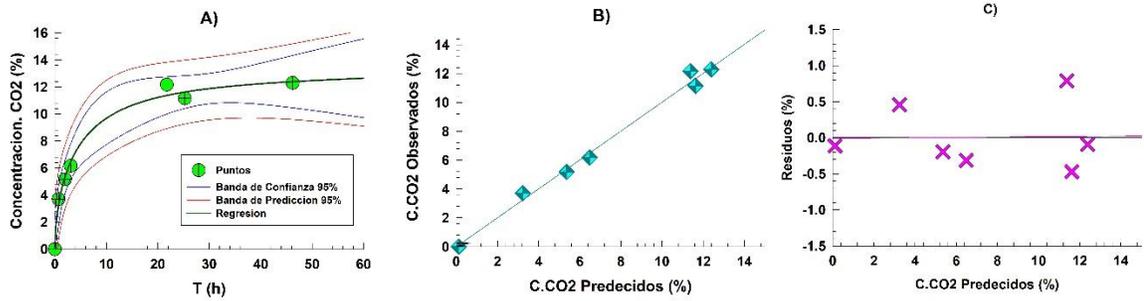
Tuete Medio 25°C



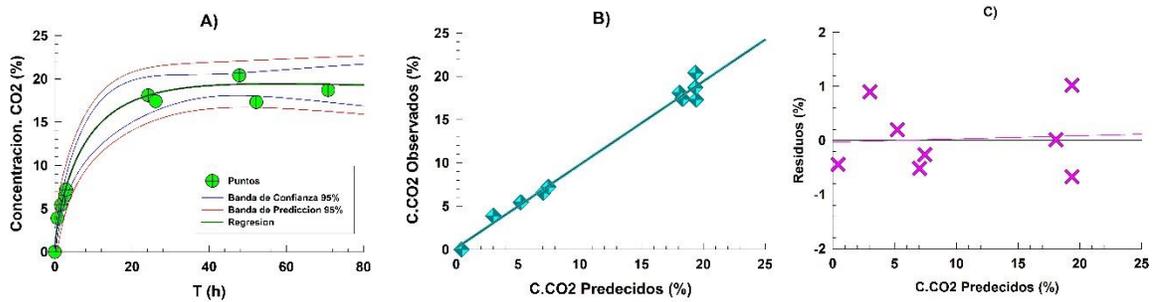
Tuete Medio 35°C



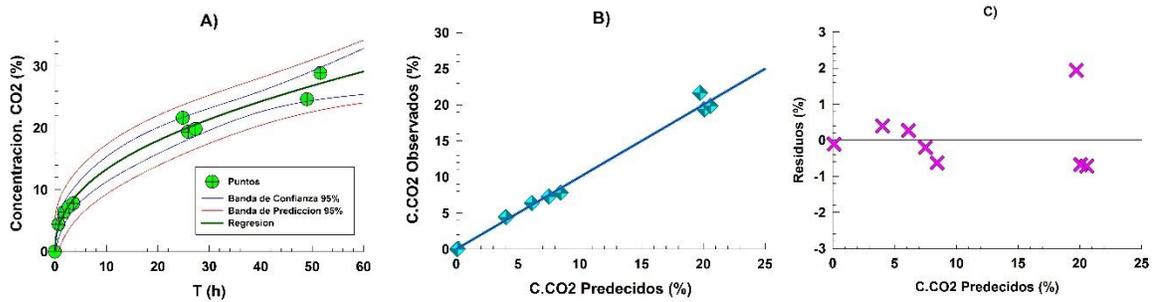
Tuete Moderadamente Oscuro 15°C



Tuete Moderadamente Oscuro 25°C

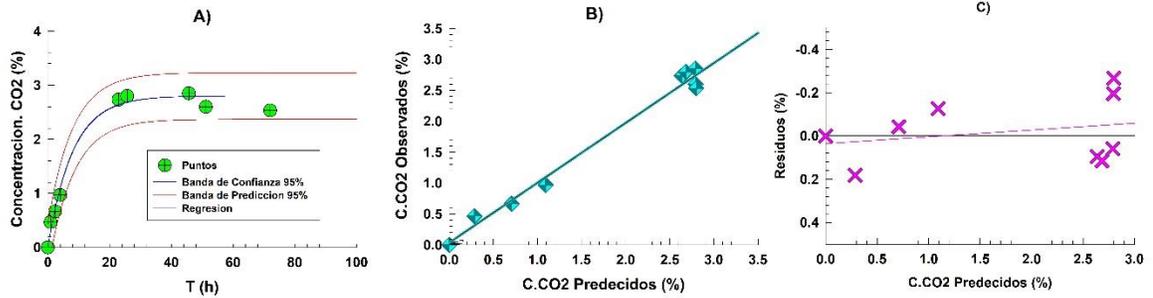


Tuete Moderadamente Oscuro 35°C

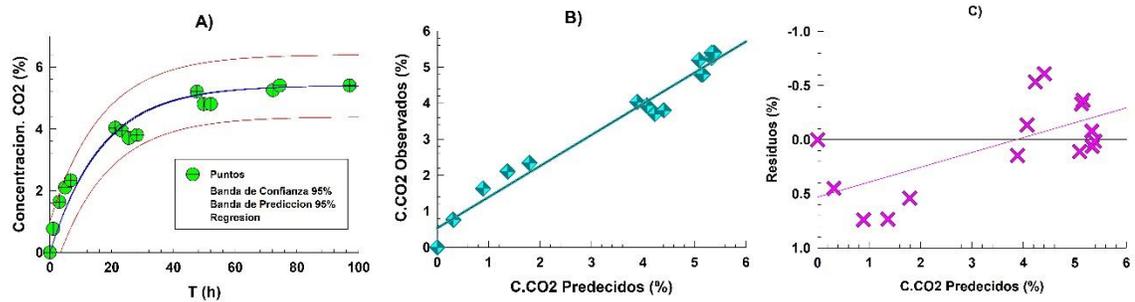


ANEXO 10. Gráficos para Ajuste 8: de regresión A), observados vs predcidos B) y residuos C).

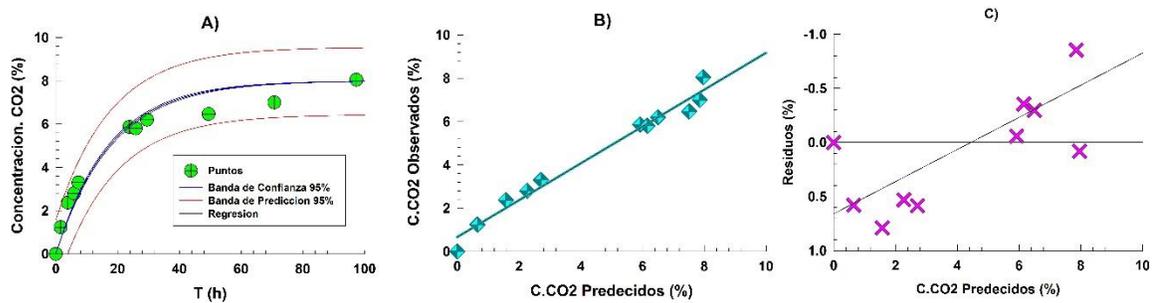
Tuete Claro 15°C



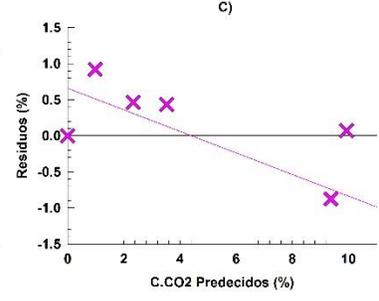
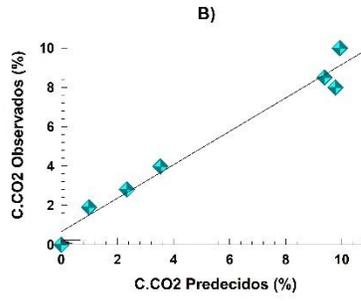
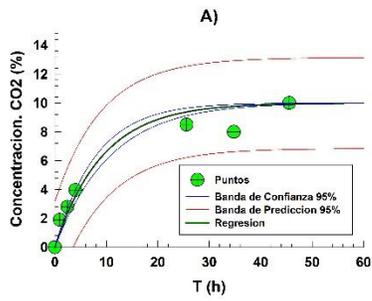
Tuete Claro 25°C



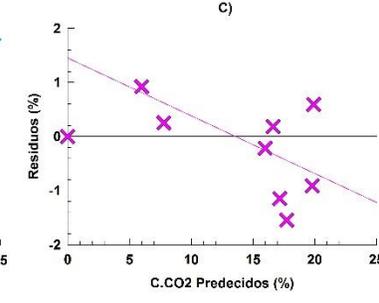
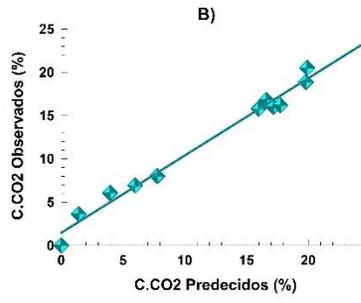
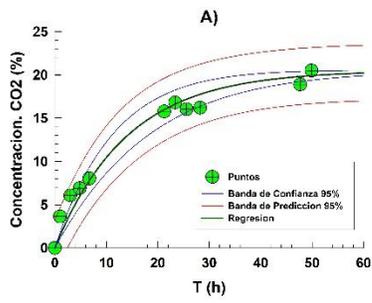
Tuete Claro 35°C



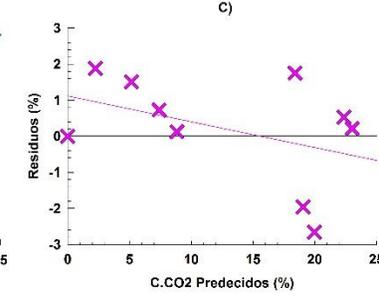
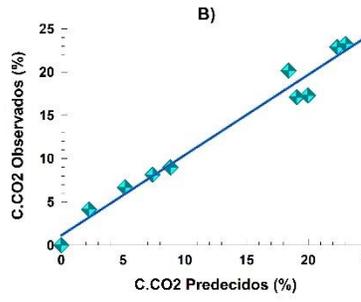
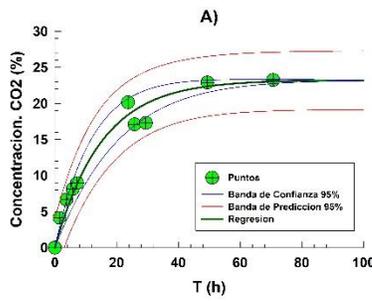
Tuete Medio 15°C



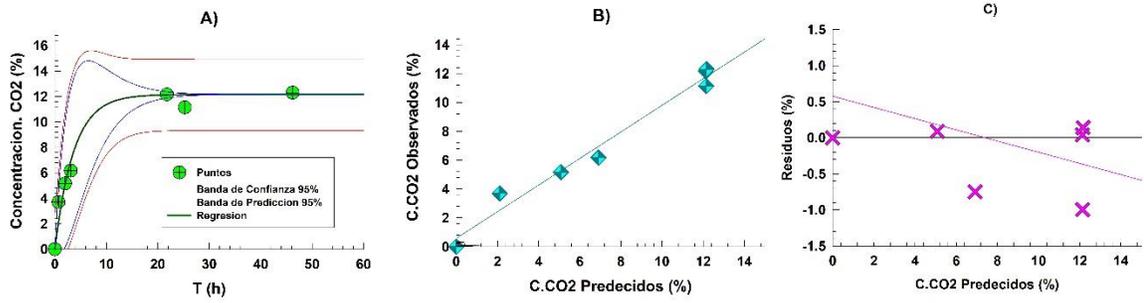
Tuete Medio 25°C



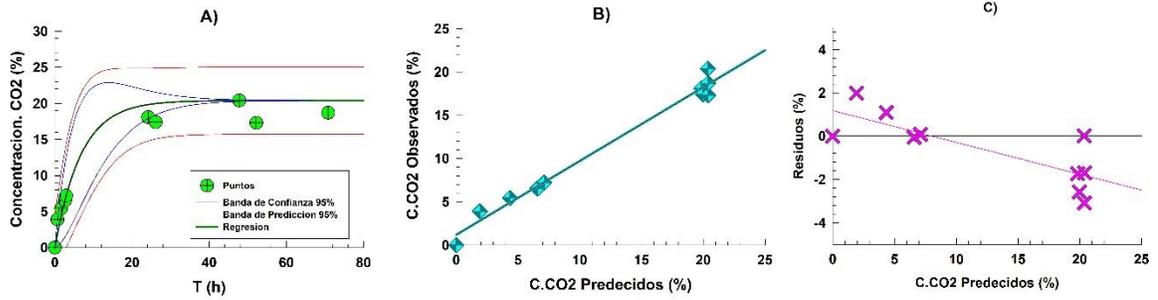
Tuete Medio 35°C



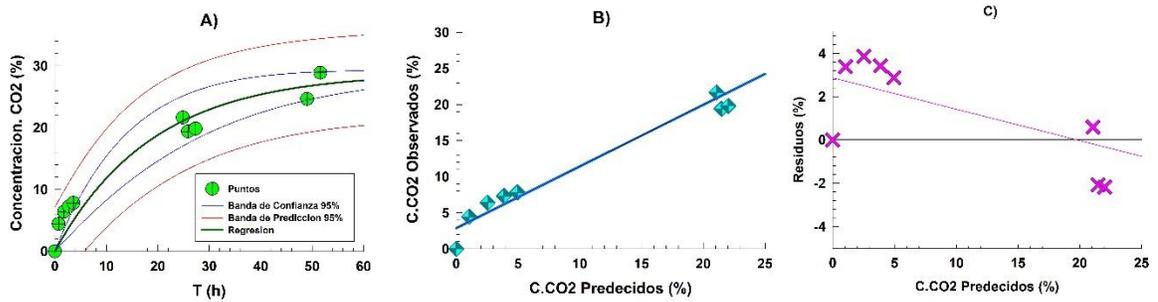
Tuete Moderadamente Oscuro 15°C



Tuete Moderadamente Oscuro 25°C

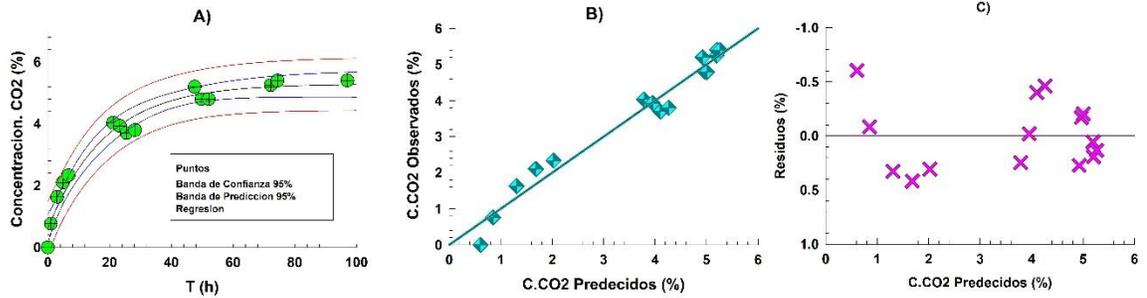


Tuete Moderadamente Oscuro 35°C

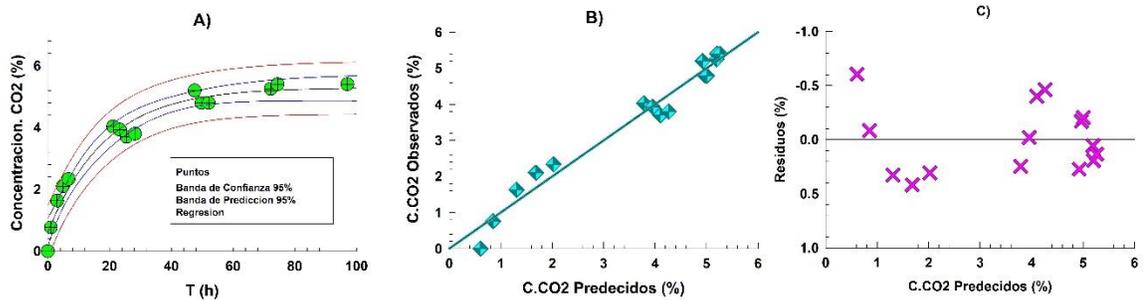


ANEXO 11. Gráficos para Ajuste 2: de regresión (A), observados vs predcidos (B) y residuos (C).

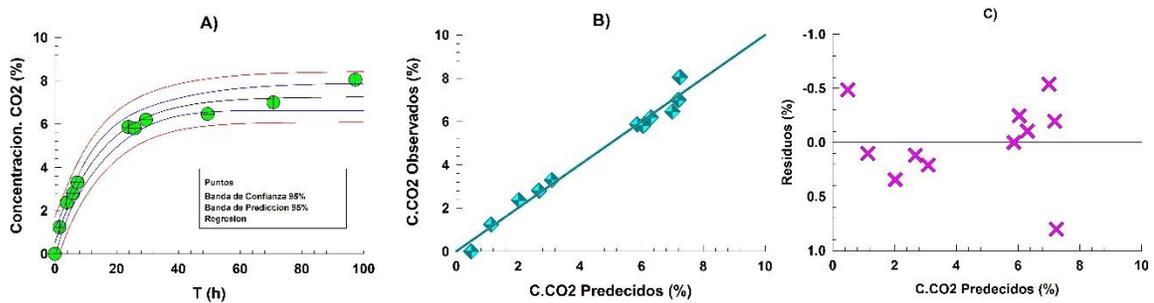
Tueste Claro 15°C



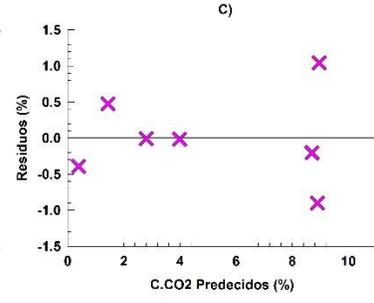
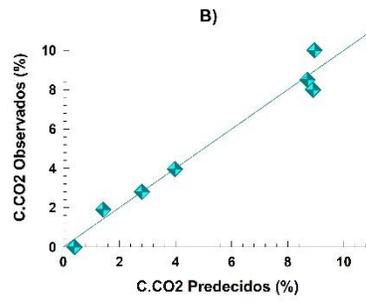
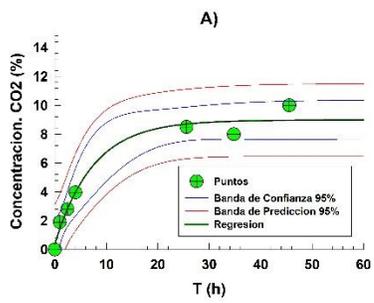
Tueste Claro 25°C



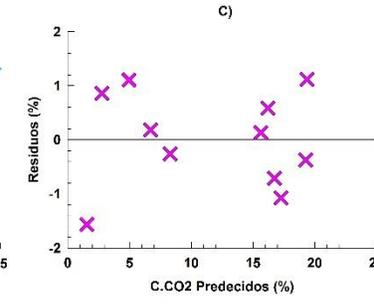
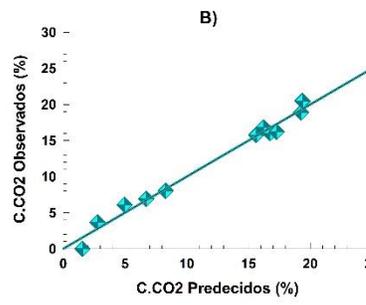
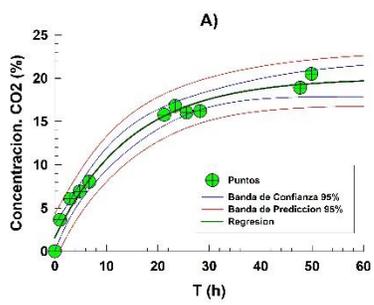
Tueste Claro 35°C



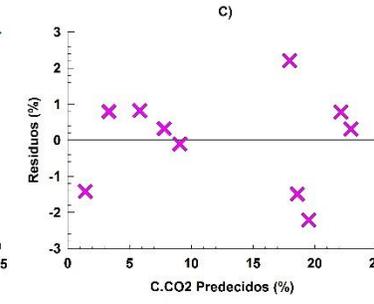
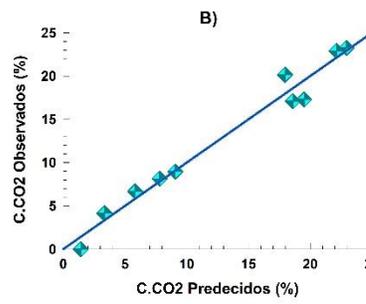
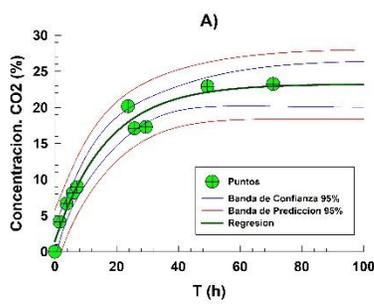
Tueste Medio 15°C



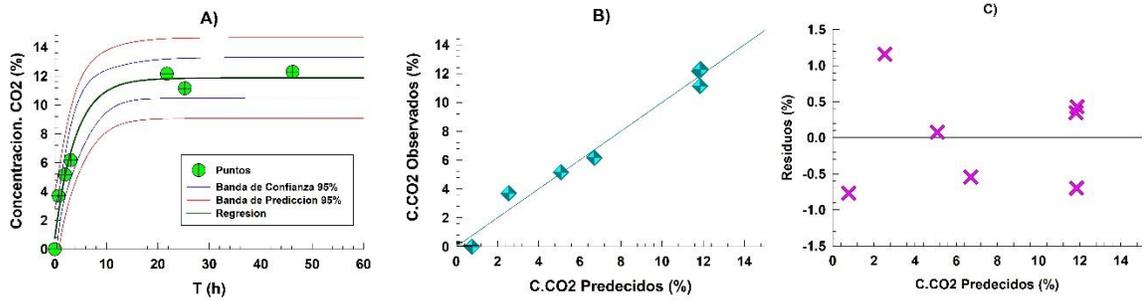
Tuete Medio 25°C



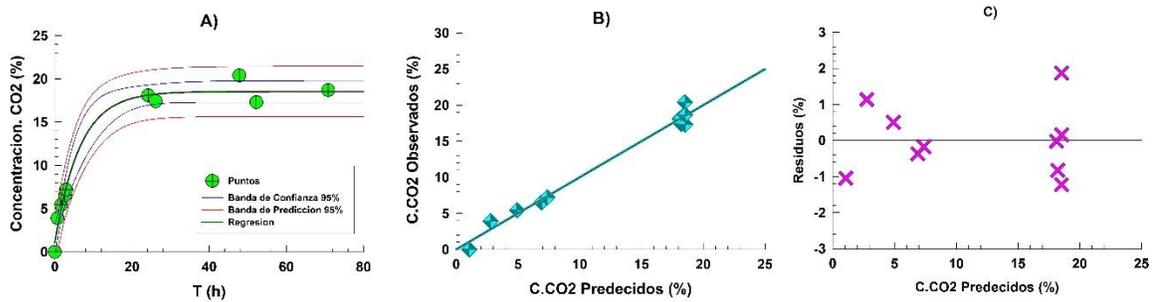
Tuete Medio 35°C



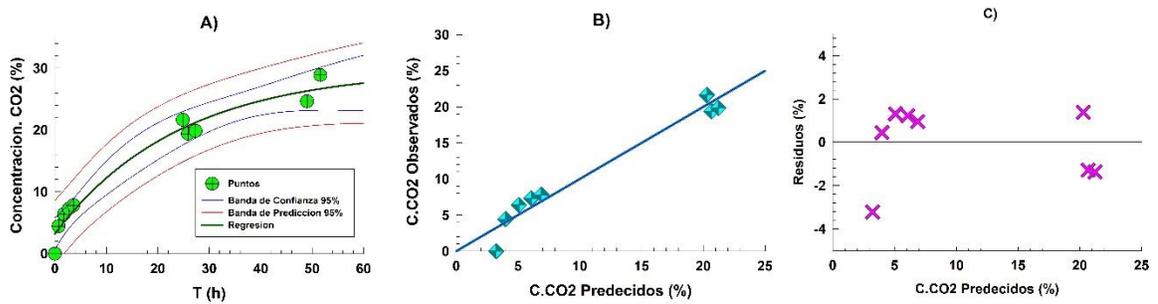
Tuete Moderadamente Oscuro 15°C



Tuete Moderadamente Oscuro 25°C

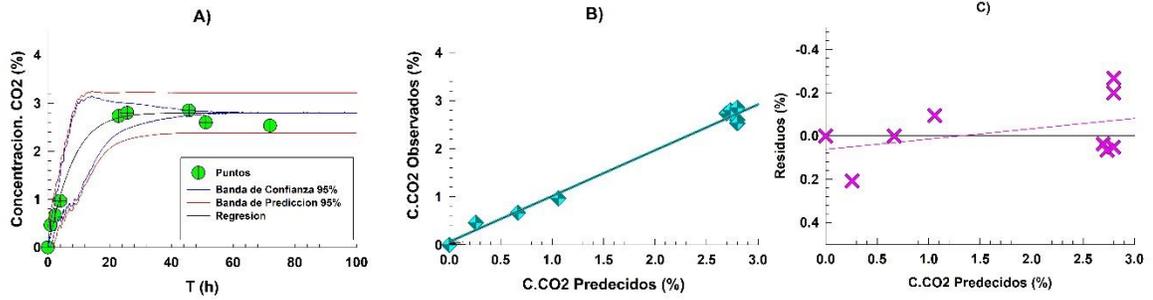


Tuete Moderadamente Oscuro 35°C

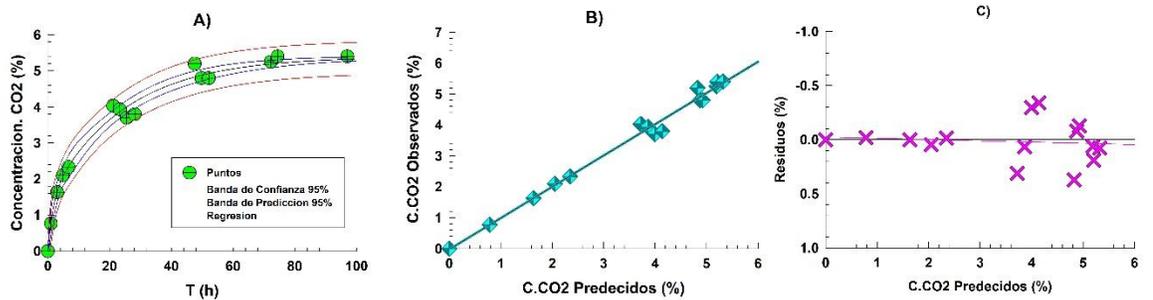


ANEXO 12. Gráficos para Ajuste 9: de regresión A), observados vs predcidos B) y residuos C).

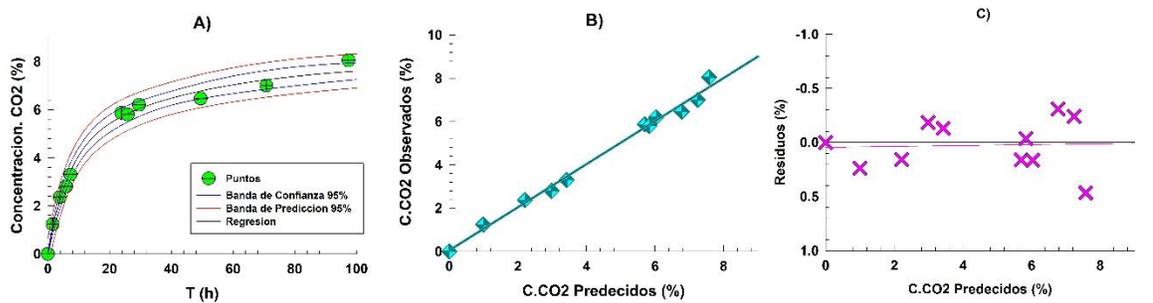
Tueste Claro 15°C



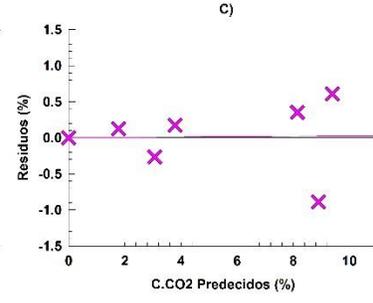
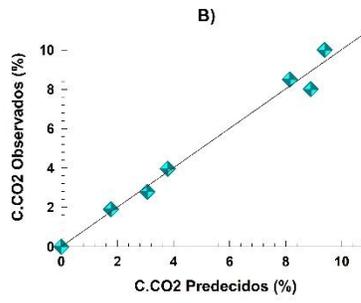
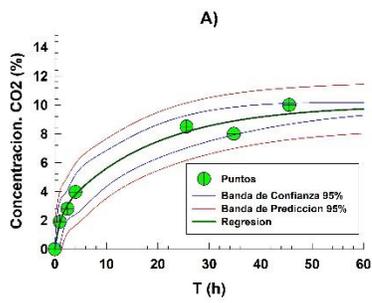
Tueste Claro 25°C



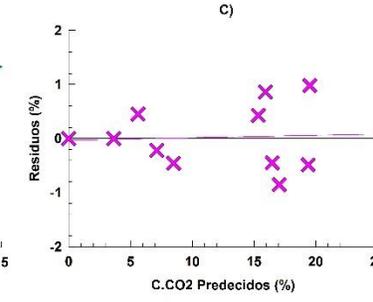
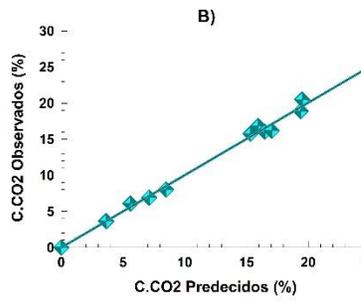
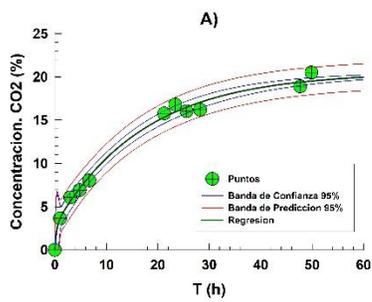
Tueste Claro 35°C



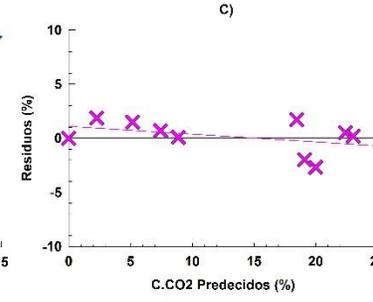
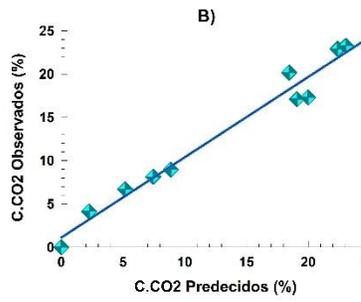
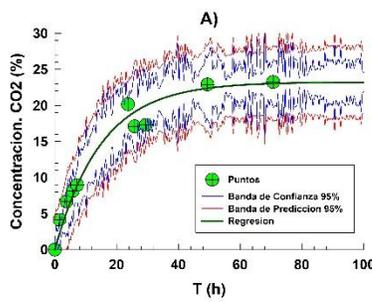
Tuete Medio 15°C



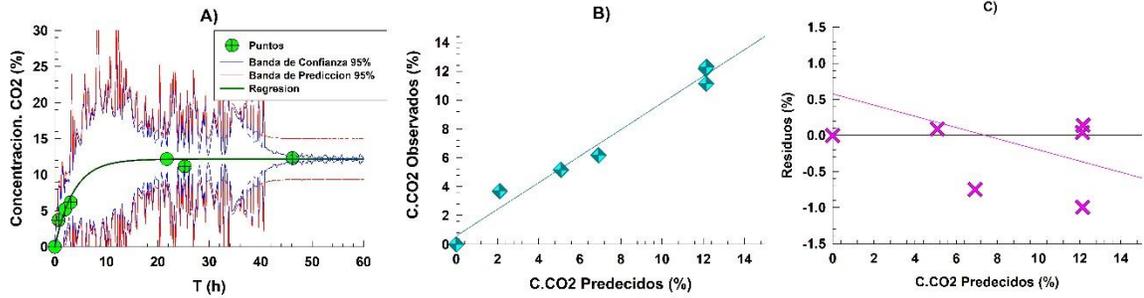
Tuete Medio 25°C



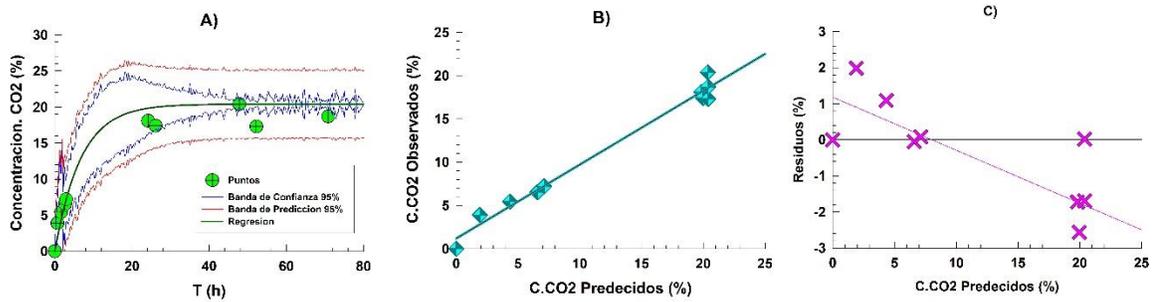
Tuete Medio 35°C



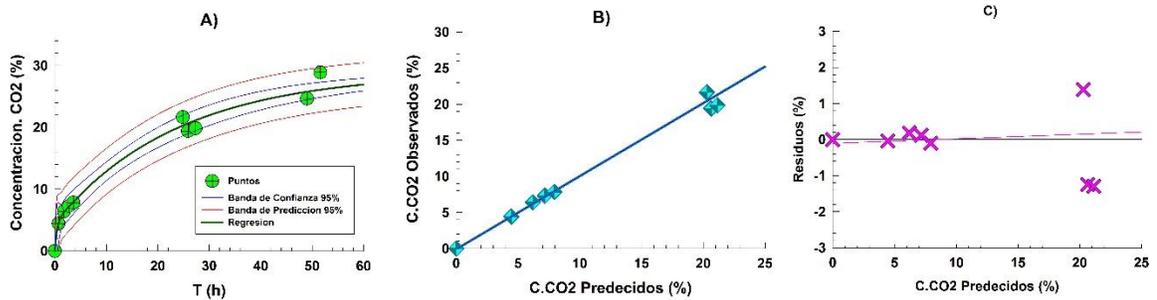
Tuete Moderadamente Oscuro 15°C



Tuete Moderadamente Oscuro 25°C

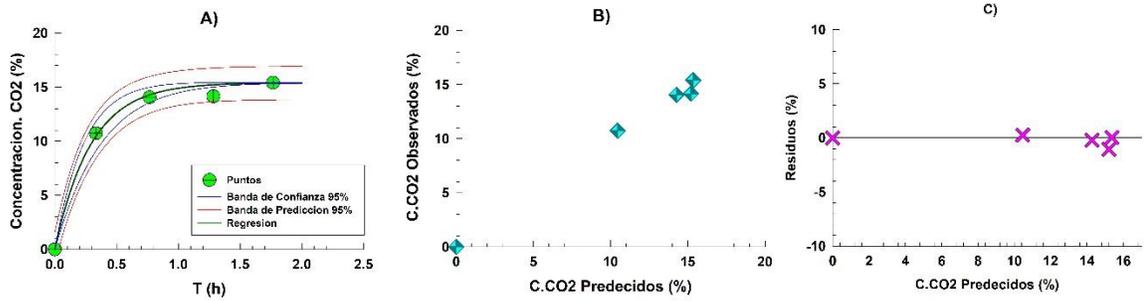


Tuete Moderadamente Oscuro 35°C

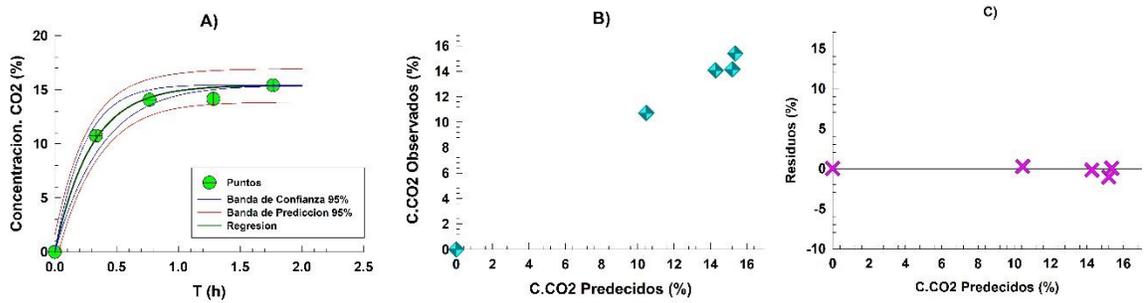


ANEXO 13. Gráficos para Molienda Fina a 25°C: de regresión A), observados vs predcidos B) y residuos C).

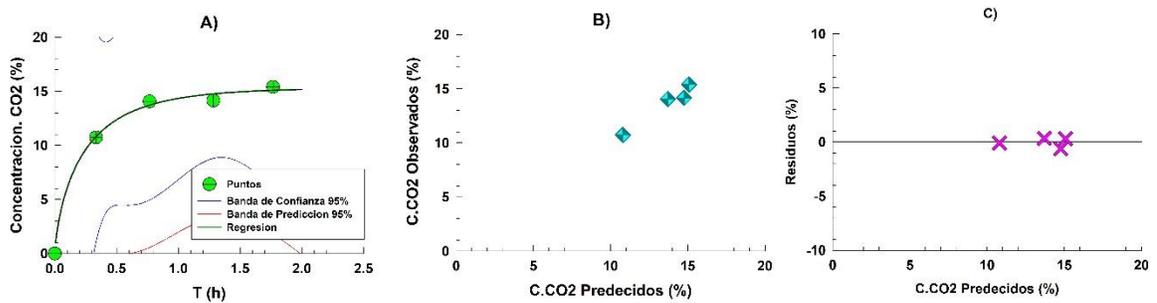
Ajuste 3



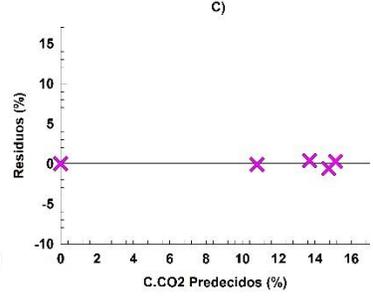
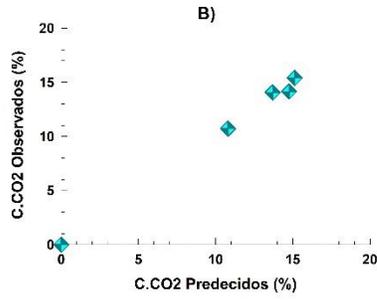
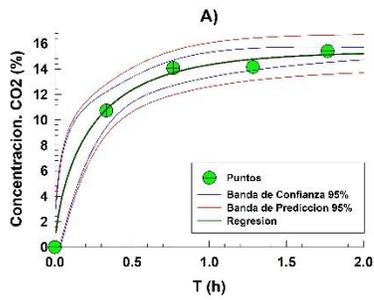
Ajuste 6



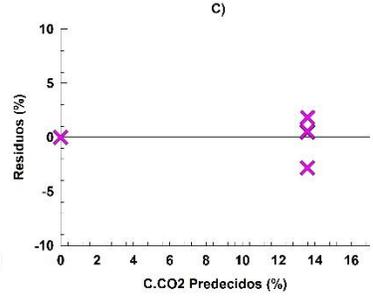
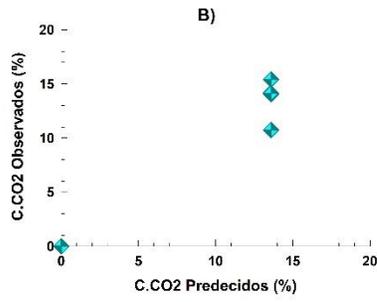
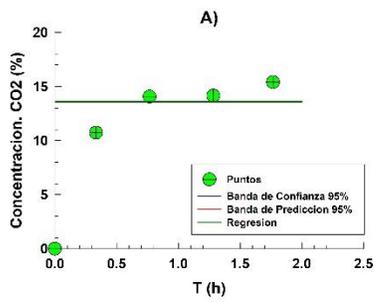
Ajuste 1



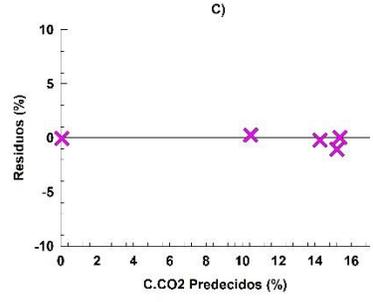
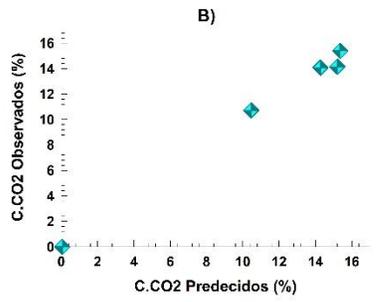
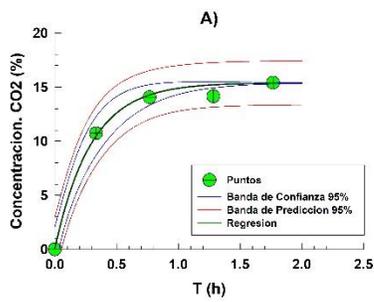
Ajuste 4



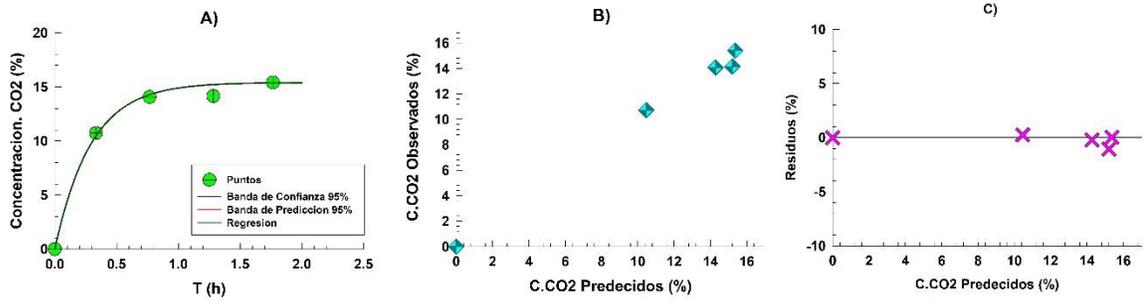
Ajuste 2



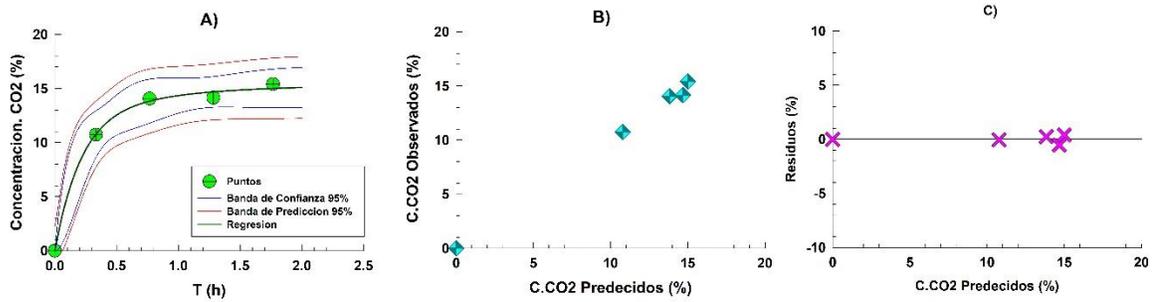
Ajuste 7



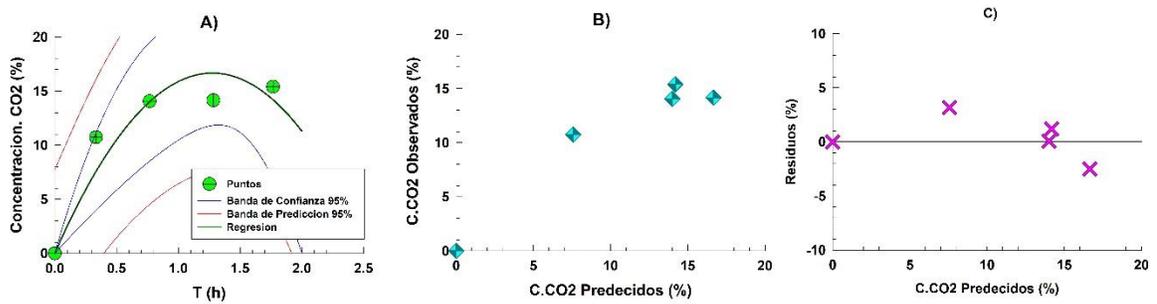
Ajuste 8



Ajuste 9

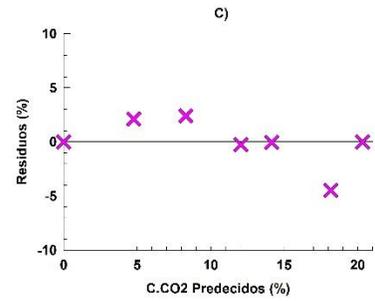
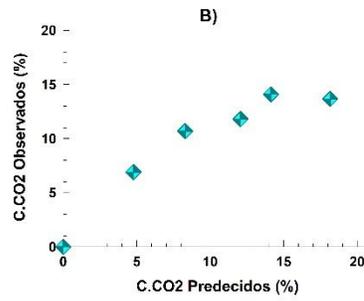
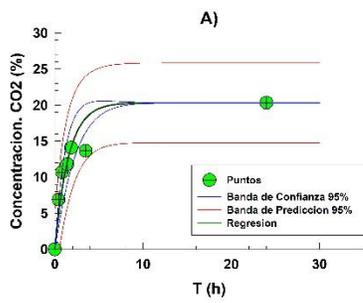


Ajuste 5

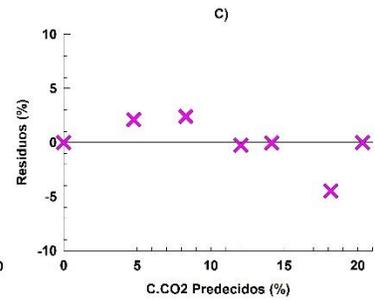
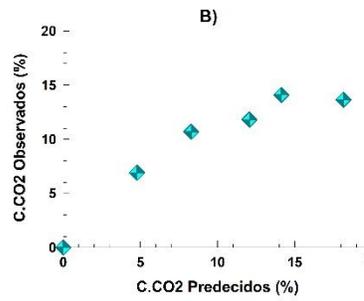
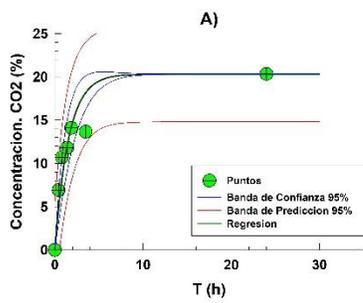


ANEXO 14. Gráficos para Molienda Gruesa a 25 °C: de regresión A), observados vs predcidos B) y residuos C).

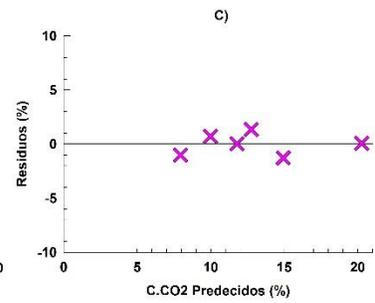
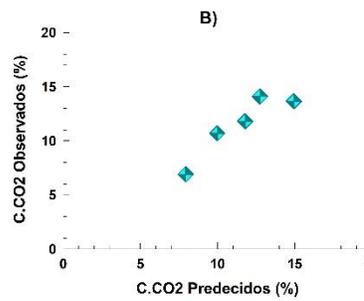
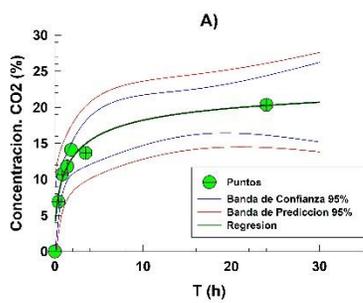
Ajuste 3



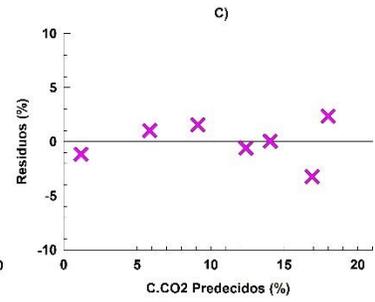
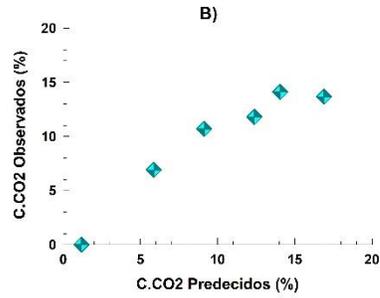
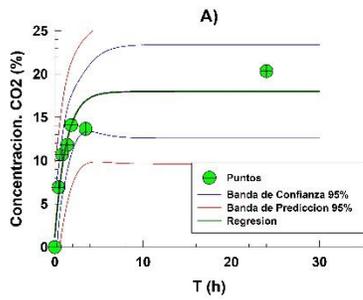
Ajuste 6



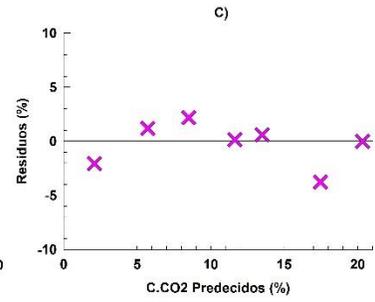
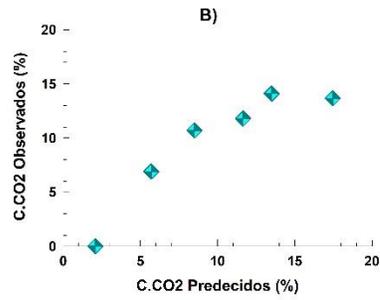
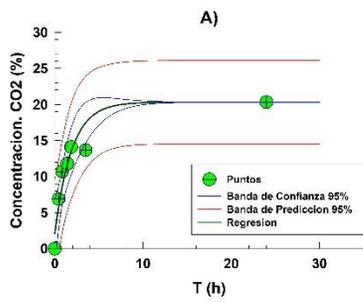
Ajuste 1



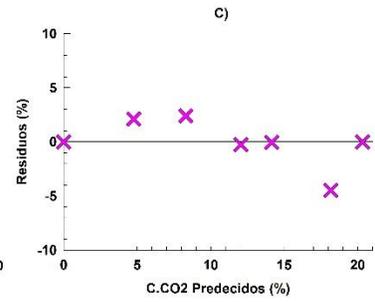
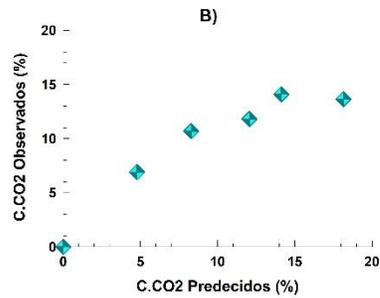
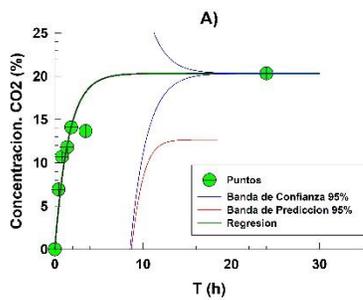
Ajuste 2



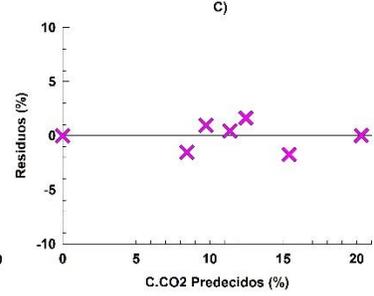
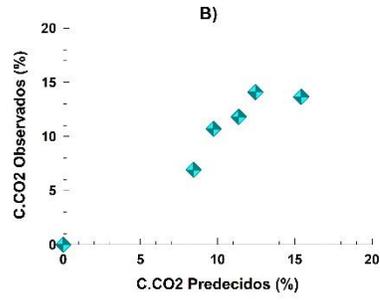
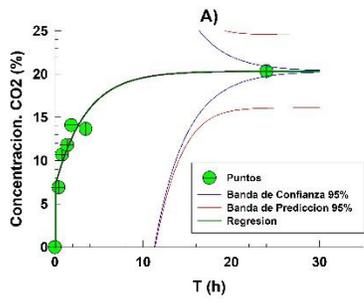
Ajuste 7



Ajuste 8



Ajuste 9



Ajuste 5

