



Universidad
Europea
del Atlántico

ÁREA DE MEDIO AMBIENTE

TÍTULO DEL PROYECTO FINAL

**Análisis de la capacidad adsorbente de residuos agroindustriales
en la remoción de colorantes**

Tesis para optar al grado de:

Máster en Gestión y Auditorías Ambientales

Presentado por:

Roberto Antonio Santos Amaya

SVSNCHS2126011

Director:

Dra. Elena Sánchez

SAN SALVADOR, EL SALVADOR

30 DE AGOSTO DE 2021



ÁREA DE MEDIO AMBIENTE

TÍTULO DEL PROYECTO FINAL

**Análisis de la capacidad adsorbente de residuos agroindustriales
en la remoción de colorantes**

Tesis para optar al grado de:

Maestría en Gestión y Auditorías Ambientales

Presentado por:

Roberto Antonio Santos Amaya

SVSNCHS2126011

Director:

Dra. Elena Sánchez

SAN SALVADOR, EL SALVADOR

30 DE AGOSTO DE 2021

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a todos los investigadores interesados en la temática.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que, desinteresadamente y de forma sincera, me brindaron su apoyo para la realización de esta tesis.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
MARCO TEÓRICO.....	5
CAPÍTULO 1: EL COLOR	6
1.1. Definición	6
1.2. Teorías sobre el color	7
1.3. La percepción del color	10
1.3.1. El iluminante (fuente de luz)	12
1.3.2. El objeto (la materia).....	15
1.3.3. El observador (ojo y corteza cerebral)	16
1.4. Atributos o propiedades del color.....	19
1.4.1. Matiz, tinte, tono o hue	19
1.4.2. Saturación, intensidad, croma o saturation.....	20
1.4.3. Luminosidad, valor, brillo o lightness	20
1.5. Los juegos de color.....	23
1.5.1. Colores primarios.....	23
1.5.2. Colores secundarios	26
1.5.3. Colores terciarios.....	26
1.6. Escalas de medición de color	27
1.6.1. Sistema Munsell	27
1.6.2. Sistemas de color CIE	30
1.6.2.1. CIELAB ($L^*a^*b^*$)	31
1.6.2.2. CIELCH ($L^*C^*h^0$)	36
1.6.2.3. Diferencias de color: Delta CIELAB y Delta CIELCH	39
1.7. Técnicas de medición de color.....	42
1.7.1. Colorímetros	42
1.7.2. Espectrofotómetros.....	43
1.7.2.1. Geometría de medición	44

1.7.2.2. Curva de reflectancia espectral	47
1.7.3. Sistemas de visión computarizada (SVC).....	49
CAPÍTULO 2: LOS COLORANTES.....	51
2.1. Introducción	51
2.2. Colorantes azoicos	55
2.2.1. FD&C Rojo No. 40	55
2.3. Colorantes diaril y triaril metano.....	57
2.3.1. FD&C Azul No. 1	57
2.4. Contaminación del agua por colorantes.....	59
2.5. Tratamientos para la remoción o destrucción de colorantes en aguas residuales.	61
2.5.1. Físicos	61
2.5.1.1. Adsorción	61
2.5.1.2. Intercambio iónico	62
2.5.1.3. Irradiación.....	62
2.5.1.4. Filtración de membrana.....	63
2.5.2. Químicos	63
2.5.2.1 Oxidación química.....	63
2.5.2.2. Coagulación y precipitación.....	64
2.5.3. Biológicos.	64
2.5.3.1. Aerobios	64
2.5.3.2. Anaerobios	65
2.5.4. Acoplados.....	65
CAPÍTULO 3: LA ADSORCIÓN	67
3.1. Generalidades.....	67
3.2. Funcionamiento de los procesos de adsorción	69
3.3. Tipos de adsorbentes	71
3.3.1. Convencionales	71
3.3.1.1. Carbón activado	71
3.3.1.2. Alúmina activada.....	73

3.3.1.3. Gel de sílice.....	74
3.3.2. Adsorbentes no convencionales (bioadsorbentes)	74
3.4. Adsorbentes utilizados en la investigación	77
3.4.1 Derivados del pescado	77
3.4.1.1. Escamas	77
3.4.2. Derivados del maíz	79
3.4.2.1. Orote.....	79
3.4.2.2. Brácteas	80
3.5. Factores que influyen en el proceso de adsorción.....	81
3.5.1. pH.....	81
3.5.2. Temperatura	81
3.5.3. Tamaño de partícula.....	82
METODOLOGÍA.....	83
CAPÍTULO 4: DISEÑO METODOLÓGICO	84
4.1. Introducción	84
4.2. Variables	88
4.3. Muestra	89
4.4. Instrumentos de Medición y Técnicas.....	90
4.5. Procedimientos	91
4.5.1. Preparación de los bioadsorbentes	91
4.5.2. Caracterización de los bioadsorbentes.....	94
4.5.2.1. Análisis de humedad de las materias primas	94
4.5.2.2. Análisis de humedad de los productos secos.....	95
4.5.3. Preparación de los reactivos para ajuste de pH	96
4.5.3.1. Solución de ácido clorhídrico (HCl) 0.1 N.....	96
4.5.3.2. Solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N.....	97
4.5.4. Preparación de las soluciones sintéticas de los adsorbatos.....	98
4.5.5. Construcción del módulo para adsorción en lecho fijo.....	100
4.5.6. Construcción de la cabina de luz.....	101

4.5.7. Ensayos de bioadsorción.....	104
4.5.7.1. Obtención de los filtrados	104
4.5.7.2. Obtención de las coordenadas del espacio de color de las soluciones estándar de colorantes	107
4.5.7.3. Obtención de las coordenadas del espacio de color de los filtrados.....	109
4.5.8. Análisis estadístico de los datos.	111
4.6. Hipótesis de trabajo	111
CAPÍTULO 5: RESULTADOS	113
5.1. Caracterización de los bioadsorbentes	113
5.2. Ensayos de bioadsorción	115
5.3. Cálculo de la diferencia de color (ΔE^*ab)	132
5.4. Análisis de Varianza (ANOVA).....	137
5.4.1. Diseño factorial 2^k	137
5.4.1.1. Escamas de pescado y FD&C Azul No. 1	137
5.4.1.2. Escamas de pescado y FD&C Rojo No. 40.....	142
5.4.1.3. Olote y FD&C Azul No. 1	147
5.4.1.4. Olote y FD&C Rojo No. 40	151
5.4.1.5. Brácteas de maíz y FD&C Azul No. 1	156
5.4.1.6. Brácteas de maíz y FD&C Rojo No. 40	160
5.4.2. Diseño completamente al azar	165
5.4.2.1. Residuos agroindustriales y FD&C Azul No. 1	165
5.4.2.2. Residuos agroindustriales y FD&C Rojo No. 40.....	168
5.4.3. Diseño de bloques completamente al azar	170
CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN.....	176
6.1. Caracterización de los bioadsorbentes	176
6.2. Ensayos de bioadsorción	177
6.3. Cálculo de la diferencia de color (ΔE^*ab)	178
6.4. Análisis de Varianza (ANOVA).....	179
6.4.1. Diseño factorial 2^k	179

6.4.2. Diseño completamente al azar	183
6.4.3. Diseño de bloques completamente al azar	184
6.5. Comparación con otras investigaciones.	184
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES GENERALES	190
CAPÍTULO 8: RECOMENDACIONES	193
BIBLIOGRAFÍA	195
ANEXOS	203

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Teoría de los siete colores de Aristóteles.....	7
Figura 1.2. El color según Leonardo Da Vinci.....	8
Figura 1.3. Teoría de Isaac Newton sobre la descomposición de la luz.....	9
Figura 1.4. Círculo y triángulo de Goethe.....	9
Figura 1.5. Contenido emocional de los colores.....	10
Figura 1.6. La percepción del color.....	11
Figura 1.7. Espectro de luz visible para el ojo humano.....	13
Figura 1.8. Temperaturas de color.....	14
Figura 1.9. Fenómenos de reflexión y transmisión de la luz.....	15
Figura 1.10. Anatomía del ojo humano.....	17
Figura 1.11. Anatomía de conos y bastones de la retina.....	17
Figura 1.12. Matiz.....	19
Figura 1.13. Croma.....	20
Figura 1.14. Sistema de color tridimensional que muestra la luminosidad.....	21
Figura 1.15. Sólido tridimensional.....	22
Figura 1.16. Sólido de colores.....	23
Figura 1.17. Colores saturados.....	24
Figura 1.18. Colores luz.....	25
Figura 1.19. Colores pigmento.....	26
Figura 1.20. Círculo cromático Munsell.....	28
Figura 1.21. Ficha de color Munsell (El brillo y el cromatismo de 2.5R).....	29
Figura 1.22. Árbol de color de Munsell.....	30
Figura 1.23. Representación del sólido de colores para el espacio $L^*a^*b^*$	32
Figura 1.24. Valores $L^*a^*b^*$ para las flores A (amarilla) y B (roja).....	33
Figura 1.25. Gráfica de color CIELAB.....	34
Figura 1.26. El valor de L^* se representa en el eje central. Los ejes a^* y b^* aparecen sobre el plano horizontal.....	35
Figura 1.27. Gráfico que muestra la Luminosidad frente la Cromaticidad.....	36
Figura 1.28. Fórmulas para calcular el cromatismo y el ángulo del tono.....	37
Figura 1.29. Valores $L^*C^*h^\circ$ para la manzana.....	37
Figura 1.30. Ubicación del punto A en la gráfica de color CIELAB.....	38
Figura 1.31. Vista de Cromatismo frente a la Luminosidad en el espacio CIELCH.....	38
Figura 1.32. Diferencia de color entre dos manzanas.....	39
Figura 1.33. Diferencia de color entre la muestra y la referencia.....	41

Figura 1.34. Colorímetro.....	43
Figura 1.35. Espectrofotómetro.....	44
Figura 1.36. Geometría angular 0/45.....	45
Figura 1.37. Geometría de esfera.....	46
Figura 1.38. Geometría multi-ángulo.....	46
Figura 1.39. Gráfico espectral de una manzana.....	47
Figura 1.40. Reflexión y absorción de la luz para la manzana.....	48
Figura 1.41. Gráfico espectral de un limón.....	48
Figura 1.42. Reflexión y absorción de la luz para el limón.....	49
Figura 1.43. Propuesta de una estructura para un sistema de captación de imágenes...50	
Figura 2.1. Estructura del grupo azo.....	55
Figura 2.2. Estructura química de FD&C Rojo No. 40.....	56
Figura 2.3. Estructura química del FD&C Azul No. 1.....	58
Figura 3.1. Diferentes configuraciones para el proceso de adsorción.....	70
Figura 3.2. Carbón activado en polvo.....	72
Figura 3.3. Carbón activado granular.....	72
Figura 3.4. Alúmina activada.....	73
Figura 3.5. Gel de sílice.....	74
Figura 3.6. Escamas secas de tilapia.....	78
Figura 3.7. Olotes secos.....	80
Figura 3.8. Brácteas de maíz.....	81
Figura 5.1. Distribución F indicando F_c , F_o , α y Sig. para escamas de pescado y FD&C Azul No. 1.....	139
Figura 5.2. Diagrama de caja: Diferencia de color vs. Tamaño de partícula para escamas de pescado y FD&C Azul No. 1.....	140
Figura 5.3. Diagrama de caja: Diferencia de color vs. pH para escamas de pescado y FD&C Azul No. 1.....	141
Figura 5.4. Gráfico de perfil: Medias marginales estimadas según Tamaño de partícula y pH para escamas de pescado y FD&C Azul No. 1.....	142
Figura 5.5. Distribución F indicando F_c , F_o , α y Sig. para escamas de pescado y FD&C Rojo No. 40.....	144
Figura 5.6. Diagrama de caja: Diferencia de color vs. Tamaño de partícula para escamas de pescado y FD&C Rojo No. 40.....	145
Figura 5.7. Diagrama de caja: Diferencia de color vs. pH para escamas de pescado y FD&C Rojo No. 40.....	146
Figura 5.8. Gráfico de perfil: Medias marginales estimadas según Tamaño de partícula y pH para escamas de pescado y FD&C Rojo No. 40.....	147

Figura 5.9. Distribución F indicando F_c , F_o , α y Sig. para para olote y FD&C Azul No. 1.....	149
Figura 5.10. Diagrama de caja: Diferencia de color vs. Tamaño de partícula para olote y FD&C Azul No. 1.....	150
Figura 5.11. Diagrama de caja: Diferencia de color vs. pH para olote y FD&C Azul No. 1.....	150
Figura 5.12. Gráfico de perfil: Medias marginales estimadas según Tamaño de partícula y pH para olote y FD&C Azul No. 1.....	151
Figura 5.13. Distribución F indicando F_c , F_o , α y Sig. para olote y FD&C Rojo No. 40.....	153
Figura 5.14. Diagrama de caja: Diferencia de color vs. Tamaño de partícula para olote y FD&C Rojo No. 40.....	154
Figura 5.15. Diagrama de caja: Diferencia de color vs. pH para olote y FD&C Rojo No. 40.....	155
Figura 5.16. Gráfico de perfil: Medias marginales estimadas según Tamaño de partícula y pH para olote y FD&C Rojo No. 40.....	156
Figura 5.17. Distribución F indicando F_c , F_o , α y Sig. para brácteas de maíz y FD&C Azul No. 1.....	158
Figura 5.18. Diagrama de caja: Diferencia de color vs. Tamaño de partícula para brácteas de maíz y FD&C Azul No. 1.....	159
Figura 5.19. Diagrama de caja: Diferencia de color vs. pH para brácteas de maíz y FD&C Azul No. 1.....	159
Figura 5.20. Gráfico de perfil: Medias marginales estimadas según Tamaño de partícula y pH para brácteas de maíz y FD&C Azul No. 1.....	160
Figura 5.21. Distribución F indicando F_c , F_o , α y Sig. para brácteas de maíz y FD&C Rojo No. 40.....	162
Figura 5.22. Diagrama de caja: Diferencia de color vs. Tamaño de partícula para brácteas de maíz y FD&C Rojo No. 40.....	163
Figura 5.23. Diagrama de caja: Diferencia de color vs. pH para brácteas de maíz y FD&C Rojo No. 40.....	164
Figura 5.24. Gráfico de perfil: Medias marginales estimadas según Tamaño de partícula y pH para brácteas de maíz y FD&C Rojo No. 40.....	165
Figura 5.25. Distribución F indicando F_c , F_o , α y Sig. para residuos agroindustriales y FD&C Azul No. 1.....	167
Figura 5.26. Distribución F indicando F_c , F_o , α y Sig. para residuos agroindustriales y FD&C Rojo No. 40.....	170

Figura 5.27. Distribución F indicando F_c , F_o , α y Sig. para residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes.....173

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Colores del espectro visible: absorbido y complementario.....	16
Tabla 2.1. Clases de colorantes sintéticos según el Índice de color (C.I.).....	54
Tabla 2.2. Características del colorante FD&C Rojo No. 40.....	56
Tabla 2.3. Características del colorante FD&C Azul No. 1.....	58
Tabla 2.4. Contribución de los principales sectores industriales a la contaminación del agua a nivel mundial.....	60
Tabla 3.1. Comparación de adsorbentes activados utilizados en el tratamiento de aguas.....	73
Tabla 4.1. Características de estudios previos sobre bioadsorción.....	86
Tabla 4.2. Variables consideradas en la investigación.....	89
Tabla 4.3. Ensayos de adsorción considerados en la investigación.....	90
Tabla 4.4. Materiales utilizados según el tipo de bioadsorbente obtenido.....	91
Tabla 4.5. Materiales utilizados según el tipo de colorante.....	98
Tabla 5.1. Cantidad de materias primas.....	113
Tabla 5.2. Análisis de humedad de las escamas de pescado frescas.....	113
Tabla 5.3. Análisis de humedad del olote fresco.....	114
Tabla 5.4. Análisis de humedad de las brácteas de maíz frescas.....	114
Tabla 5.5. Análisis de humedad de las escamas de pescado secas.....	114
Tabla 5.6. Análisis de humedad del olote seco.....	114
Tabla 5.7. Análisis de humedad las brácteas de maíz secas.....	115
Tabla 5.8. Resumen: análisis de humedad de los productos frescos y secos.....	115
Tabla 5.9. Obtención de las coordenadas del espacio de color de la solución estándar ácida del colorante FD&C Azul No. 1.....	116
Tabla 5.10. Obtención de las coordenadas del espacio de color de la solución estándar alcalina del colorante FD&C Azul No. 1.....	116
Tabla 5.11. Obtención de las coordenadas del espacio de color de la solución estándar ácida del colorante FD&C Rojo No. 40.....	116
Tabla 5.12. Obtención de las coordenadas del espacio de color de la solución estándar alcalina del colorante FD&C Rojo No. 40.....	117
Tabla 5.13. Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Azul No. 1 para escamas de pescado $T < 1$ mm y sus coordenadas del espacio de color.....	117
Tabla 5.14. Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Azul No. 1 para escamas de pescado $T < 1$ mm y sus coordenadas del espacio de color.....	118

Tabla 5.15. Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Azul No. 1 para escamas de pescado $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color.....	118
Tabla 5.16. Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Azul No. 1 para escamas de pescado $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color.....	119
Tabla 5.17. Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Rojo No. 40 para escamas de pescado $T < 1\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color.....	119
Tabla 5.18. Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Rojo No. 40 para escamas de pescado $T < 1\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color.....	120
Tabla 5.19. Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Rojo No. 40 para escamas de pescado $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color.....	120
Tabla 5.20. Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Rojo No. 40 para escamas de pescado $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color.....	121
Tabla 5.21. Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Azul No. 1 para olote $T < 1\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color.....	121
Tabla 5.22. Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Azul No. 1 para olote $T < 1\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color.....	122
Tabla 5.23. Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Azul No. 1 para olote $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color.....	122
Tabla 5.24. Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Azul No. 1 para olote $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color.....	123
Tabla 5.25. Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Rojo No. 40 para olote $T < 1\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color.....	123
Tabla 5.26. Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Rojo No. 40 para olote $T < 1\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color.....	124
Tabla 5.27. Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Rojo No. 40 para olote $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color.....	124
Tabla 5.28. Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Rojo No. 40 para olote $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color.....	125
Tabla 5.29. Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Azul No. 1 para brácteas de maíz $T < 1\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color.....	125
Tabla 5.30. Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Azul No. 1 para brácteas de maíz $T < 1\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color.....	126
Tabla 5.31. Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Azul No. 1 para brácteas de maíz $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color.....	126
Tabla 5.32. Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Azul No. 1 para brácteas de maíz $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color.....	127

Tabla 5.33. Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Rojo No. 40 para brácteas de maíz $T < 1$ mm y sus coordenadas del espacio de color.....	127
Tabla 5.34. Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Rojo No. 40 para brácteas de maíz $T < 1$ mm y sus coordenadas del espacio de color.....	128
Tabla 5.35. Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Rojo No. 40 para brácteas de maíz $1 \text{ mm} < T < 3 \text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color.....	128
Tabla 5.36. Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Rojo No. 40 para brácteas de maíz $1 \text{ mm} < T < 3 \text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color.....	129
Tabla 5.37. Resumen: caracterización de los ensayos de bioadsorción para escamas de pescado.....	129
Tabla 5.38. Resumen: caracterización de los ensayos de bioadsorción para olote.....	130
Tabla 5.39. Resumen: caracterización de los ensayos de bioadsorción para brácteas de maíz.....	130
Tabla 5.40. Resumen: promedio de las coordenadas del espacio de color de estándares y filtrados para escamas de pescado.....	130
Tabla 5.41. Resumen: promedio de las coordenadas del espacio de color de estándares y filtrados para olote.....	131
Tabla 5.42. Resumen: promedio de las coordenadas del espacio de color de estándares y filtrados para brácteas de maíz.....	131
Tabla 5.43. Cálculo de la diferencia de color (ΔE^*_{ab}) entre estándar y filtrado para colorante FD&C Azul No. 1 en escamas de pescado.....	132
Tabla 5.44. Cálculo de la diferencia de color (ΔE^*_{ab}) entre estándar y filtrado para colorante FD&C Rojo No. 40 en escamas de pescado.....	133
Tabla 5.45. Cálculo de la diferencia de color (ΔE^*_{ab}) entre estándar y filtrado para colorante FD&C Azul No. 1 en olote.....	134
Tabla 5.46. Cálculo de la diferencia de color (ΔE^*_{ab}) entre estándar y filtrado para colorante FD&C Rojo No. 40 en olote.....	135
Tabla 5.47. Cálculo de la diferencia de color (ΔE^*_{ab}) entre estándar y filtrado para colorante FD&C Azul No. 1 en brácteas de maíz.....	136
Tabla 5.48. Cálculo de la diferencia de color (ΔE^*_{ab}) entre estándar y filtrado para colorante FD&C Rojo No. 40 en brácteas de maíz.....	137
Tabla 5.49. Factores inter-sujetos y etiqueta de valor para escamas de pescado y FD&C Azul No. 1.....	138
Tabla 5.50. Pruebas de efectos inter-sujetos para escamas de pescado y FD&C Azul No. 1.....	138
Tabla 5.51. Medias de la diferencia de color para escamas de pescado y FD&C Azul No. 1.....	140

Tabla 5.52. Factores inter-sujetos y etiqueta de valor para escamas de pescado y FD&C Rojo No. 40.....	142
Tabla 5.53. Pruebas de efectos inter-sujetos para escamas de pescado y FD&C Rojo No. 40.....	143
Tabla 5.54. Medias de la diferencia de color para escamas de pescado y FD&C Rojo No. 40.....	144
Tabla 5.55. Factores inter-sujetos y etiqueta de valor para olote y FD&C Azul No. 1.....	147
Tabla 5.56. Pruebas de efectos inter-sujetos para olote y FD&C Azul No. 1.....	148
Tabla 5.57. Medias de la diferencia de color para olote y FD&C Azul No. 1.....	149
Tabla 5.58. Factores inter-sujetos y etiqueta de valor para olote y FD&C Rojo No. 40.....	152
Tabla 5.59. Pruebas de efectos inter-sujetos para olote y FD&C Rojo No. 40.....	152
Tabla 5.60. Medias de la diferencia de color para olote y FD&C Rojo No. 40.....	153
Tabla 5.61. Factores inter-sujetos y etiqueta de valor para brácteas de maíz y FD&C Azul No. 1.....	156
Tabla 5.62. Pruebas de efectos inter-sujetos para brácteas de maíz y FD&C Azul No. 1.....	157
Tabla 5.63. Medias de la diferencia de color para brácteas de maíz y FD&C Azul No. 1.....	158
Tabla 5.64. Factores inter-sujetos y etiqueta de valor para brácteas de maíz y FD&C Rojo No. 40.....	161
Tabla 5.65. Pruebas de efectos inter-sujetos para brácteas de maíz y FD&C Rojo No. 40.....	161
Tabla 5.66. Medias de la diferencia de color para brácteas de maíz y FD&C Rojo No. 40.....	162
Tabla 5.67. Descriptivos de la diferencia de color de los residuos agroindustriales para FD&C Azul No. 1.....	165
Tabla 5.68. ANOVA de la diferencia de color de los residuos agroindustriales para FD&C Azul No. 1.....	166
Tabla 5.69. Comparaciones múltiples de los residuos agroindustriales según la Diferencia Mínima Significativa (DMS) para FD&C Azul No. 1.....	166
Tabla 5.70. Descriptivos de la diferencia de color de los residuos agroindustriales para FD&C Rojo No. 40.....	168
Tabla 5.71. ANOVA de la diferencia de color de los residuos agroindustriales para FD&C Rojo No. 40.....	168

Tabla 5.72. Comparaciones múltiples de los residuos agroindustriales según la Diferencia Mínima Significativa (DMS) para FD&C Rojo No. 40.....	169
Tabla 5.73. Factores inter-sujetos de los residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes.....	171
Tabla 5.74. Descriptivos de la diferencia de color de los residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes.....	171
Tabla 5.75. Pruebas de efectos inter-sujetos de los residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes.....	172
Tabla 5.76. Comparaciones múltiples de los residuos agroindustriales según la Diferencia Mínima Significativa (DMS) al interactuar con los dos colorantes.....	172
Tabla 5.77. Valores críticos de la distribución F.....	175
Tabla 6.1. Discusión sobre la humedad de los residuos agroindustriales.....	176
Tabla 6.2. Discusión de los ensayos de bioadsorción.....	177
Tabla 6.3. Discusión de la diferencia de color (ΔE^*ab) entre estándares y filtrados.....	179
Tabla 6.4. Discusión sobre el diseño factorial 2^k aplicado a escamas de pescado.....	179
Tabla 6.5. Discusión sobre el diseño factorial 2^k aplicado a olote.....	181
Tabla 6.6. Discusión sobre el diseño factorial 2^k aplicado a brácteas de maíz.....	182
Tabla 6.7. Discusión sobre el diseño completamente al azar.....	183
Tabla 6.8. Discusión sobre el diseño de bloques completamente al azar.....	184
Tabla 6.9. Discusión en comparación a otras investigaciones.....	184

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Levantamiento fotográfico de evidencias.....	203
--	-----

RESUMEN

El presente trabajo de investigación consistió en analizar la capacidad bioadsorbente de escamas de pescado, olote y brácteas de maíz en la remoción de los colorantes FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40 de soluciones sintéticas. Estos materiales, considerados residuos agroindustriales, pueden constituir un tratamiento alternativo para la remoción de colorantes, como biomasa adsorbente, reduciendo así la contaminación del medioambiente, ya que al ser retenidos en la superficie de una matriz sólida se evita su dispersión en cauces de agua.

Por el tipo de estudio, la investigación tuvo un enfoque cuantitativo con un diseño experimental en contexto de laboratorio. Las materias primas fueron tratadas y caracterizadas en cuanto a su humedad, y las soluciones preparadas a 50 ppm de colorantes fueron sometidas a ensayos de adsorción en lecho fijo, modificando las variables: tamaño de partícula de los residuos (valor bajo: $T < 1$ mm, valor alto: $1 \text{ mm} < T < 3$ mm) y pH de las soluciones colorantes (valor bajo: 3, valor alto: 8); para ello, se construyó un módulo de adsorción que permitiera estandarizar las condiciones del experimento. Para la medición, por triplicado, de las coordenadas del espacio de color CIELAB de soluciones estándar de colorantes y muestras de filtrados, se construyó una cabina de luz para garantizar un ambiente controlado y se utilizó la aplicación para teléfono móvil "Colorimeter" brindando objetividad en los datos numéricos, todo esto permitió calcular la diferencia de color ΔE^*_{ab} .

Los datos se sometieron a Análisis de Varianza (ANOVA), utilizando el software IBM SPSS Statistics 22.0, aplicado a tres tipos de diseños experimentales: diseño factorial 2^k , para evaluar la interacción de los niveles (bajo y alto) de los factores (tamaño de partícula y pH) para los tres residuos agroindustriales y los dos colorantes; diseño completamente al azar, para definir si existía diferencia significativa entre los promedios de la diferencia de color de los residuos agroindustriales por cada uno de los colorantes estudiados; y diseño de bloques completamente al azar, para comprobar si existía diferencia significativa entre los promedios de la diferencia de color de los residuos agroindustriales al interactuar con ambos colorantes.

Con esta investigación, se comprobó estadísticamente que, para los tres residuos agroindustriales, el tamaño de partícula y pH interactuaron entre sí ejerciendo influencia en las medias de la diferencia de color de las muestras para el colorante

FD&C Azul No. 1, pero no hubo interacción de estos factores para el colorante FD&C Rojo No. 40. Al contrastar los tres residuos agroindustriales y los dos colorantes en estudio, se observaron diferencias significativas entre las medias de la diferencia de color estándar-filtrado, por lo que se determinó que el mejor residuo agroindustrial como adsorbente fue las escamas de pescado (ΔE^{*ab} , promedio = 43.283); en segundo lugar, las brácteas de maíz (ΔE^{*ab} , promedio = 23.508) y, por último, el olote (ΔE^{*ab} , promedio = 22.958), demostrándose que la capacidad bioadsorbente es similar para los residuos derivados del maíz.

Palabras clave

Bioadsorción; Remoción de colorantes; Residuos agroindustriales; Color

ABSTRACT

The present research work consisted of analyzing the bio-adsorbent capacity of fish scales, cob and corn bracts in the removal of the FD&C Blue No. 1 and FD&C Red No. 40 dyes from synthetic solutions. These materials, considered agro-industrial wastes, may constitute an alternative treatment for the removal of dyes, as adsorbent biomass, thus reducing environmental pollution, since being retained on the surface of a solid matrix avoids their dispersion in waterways.

Due to the type of study, the research had a quantitative approach with an experimental design within a laboratory context. The raw materials were treated and characterized in terms of their humidity, and the solutions prepared at 50 ppm of dyes, were subjected to fixed bed adsorption tests, with the modified variables being: particle size of the wastes (low value: $T < 1$ mm, high value: $1 \text{ mm} < T < 3$ mm) and pH of the dye solutions (low value: 3, high value: 8); for this, an adsorption module was built to allow standardize conditions of the experiment. For the measurement, in triplicate, of the CIELAB color space coordinates for standard dye solutions and filtered samples, a light booth was built to guarantee a controlled environment as well as a smartphone application "Colorimeter" was used to provide objectivity of numerical data, all of which allowed to calculate the color difference ΔE^*ab .

The data was submitted to an Analysis of Variance (ANOVA), using the IBM SPSS Statistics 22.0 software, applied to three types of experimental designs: 2^k factorial design, which evaluates the interaction of the levels (low and high) of the factors (size of particle and pH) for the three agro-industrial wastes and the two dyes, a completely randomized design used to define if there was a significant difference between the averages of the difference in color of agro-industrial wastes for each of the dyes studied; and a randomized complete block design used to check if there was a significant difference between the averages of the difference in color of the agro-industrial wastes when interacting with both dyes.

With this research work, it was statistically verified that, for the three agro-industrial wastes, the particle size and pH interacted with each other, influencing the average values of the color difference of the samples for the FD&C Blue No. 1 dye, but there was no interaction of these factors for the FD&C Red No. 40 dye. When comparing the three agro-industrial wastes and the two dyes under study, significant differences were

observed between the average values of the color difference of standard-filtered solutions, for which it was determined that the best agro-industrial waste as adsorbent was fish scales ($\Delta E^* ab$, average = 43.283); secondly, the corn bracts ($\Delta E^* ab$, average = 23.508) and, finally, the cob ($\Delta E^* ab$, average = 22.958), showing that the bio-adsorbent capacity is similar for residues derived from corn.

Keywords

Bioadsorption; Dyes removal; Agro-industrial wastes; Color

RESUMO

O presente trabalho de investigação consistiu em analisar a capacidade bioadsorvente de escamas de peixe, espiga e brácteas de milho na remoção dos corantes FD&C Azul nº 1 e FD&C Vermelho nº 40 de soluções sintéticas. Esses materiais, considerados resíduos agroindustriais, podem constituir uma alternativa de tratamento para a remoção de corantes, como biomassa adsorvente, reduzindo assim a poluição ambiental, pois por ficarem retidos na superfície de uma matriz sólida, evita-se a sua dispersão em cursos de água.

Devido ao tipo de estudo, a pesquisa teve uma abordagem quantitativa com delineamento experimental em contexto de laboratório. As matérias-primas foram tratadas e caracterizadas quanto à sua humidade, e as soluções preparadas a 50 ppm de corantes foram submetidas a ensaios de adsorção em leito fixo, modificando as variáveis: granulometria dos resíduos (valor baixo: $T < 1$ mm, valor alto: $1 \text{ mm} < T < 3$ mm) e pH das soluções de corantes (valor baixo: 3, valor alto: 8); Para isso, foi construído um módulo de adsorção que permitiu padronizar as condições da experiência. Para a medição, em triplicado, das coordenadas do espaço de cor CIELAB de soluções de corantes padrão e amostras de filtrados, foi construída uma cabine de luz para garantir um ambiente controlado e foi utilizado o aplicativo para telemóvel "Colorimeter", proporcionando objetividade nos dados numéricos, tudo isso permitiu calcular a diferença de cor ΔE^*_{ab} .

Os dados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA), utilizando o software IBM SPSS Statistics 22.0, aplicada a três tipos de delineamentos experimentais: delineamento fatorial 2^k , para avaliar a interação dos níveis (baixo e alto) dos fatores (tamanho de partícula e pH) para os três resíduos agroindustriais e os dois corantes; delineamento inteiramente casualizado, para definir se houve diferença significativa entre as médias da diferença de cor dos resíduos agroindustriais para cada um dos corantes estudados; e delineamento em blocos casualizados, para verificar se houve diferença significativa entre as médias da diferença de cor dos resíduos agroindustriais na interação com os dois corantes.

Com esta pesquisa, verificou-se estatisticamente que, para os três resíduos agroindustriais, o tamanho de partícula e o pH interagiram entre si, influenciando nas médias da diferença de cor das amostras para o corante FD&C Azul nº 1, mas não houve

nenhuma interação desses fatores para o corante FD&C Vermelho No. 40. Ao comparar os três resíduos agroindustriais e os dois corantes em estudo, foram observadas diferenças significativas entre as médias da diferença de cor padrão-filtrado; portanto, foi determinado que o melhor resíduo agroindustrial como adsorvente foi as escamas de peixe (ΔE^{*ab} , média = 43.283); em segundo lugar, as brácteas de milho (ΔE^{*ab} , média = 23.508) e, por fim, a espiga de milho (ΔE^{*ab} , média = 22.958), mostrando que a capacidade bioadsorvente é semelhante para os resíduos derivados do milho.

Palavras chave

Bioadsorção; Remoção de corantes; Resíduos agroindustriais; Cor

INTRODUCCIÓN

Día a día, al abrir los ojos y ver a nuestro alrededor, somos cautivados por un fenómeno que motiva, emociona y ejerce influencia en nuestro estilo de vida e incluso en el estado de ánimo, es decir, el color. Hay muchas definiciones de color, pero podemos decir que es “radiación electromagnética (luz) reflejada o transmitida por una materia (objeto) y percibida e interpretada por el hombre (observador)” (Datacolor, s.f., p. 01).

Desde la antigüedad, ha sido objeto de interés promoviéndose su estudio y comprensión, poco a poco se ha visto la necesidad de estandarizar o unificar el color de los objetos, por ejemplo, en el campo del control de calidad en la producción industrial y artes visuales, con el intento de asignar números para representar las coordenadas en un espacio de color (métrica del color) con innumerables aplicaciones.

El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) de El Salvador, realiza el monitoreo permanente de la calidad y cantidad de agua en 122 sitios de muestreo en 55 ríos distribuidos en el territorio nacional, con el propósito de evaluar su condición para permitir el desarrollo de la vida acuática y aptitud para diferentes usos, según el Informe de la Calidad del Agua de los Ríos El Salvador / 2012-2013. Uno de los parámetros de calidad fuera de norma en los sitios evaluados fue el color aparente, con valores de hasta 3350 unidades de Platino Cobalto, siendo lo máximo permitido de 20 a 150 unidades de Platino Cobalto, de acuerdo al Decreto No. 51 de la Normativa de Agua Cruda para potabilizar por métodos convencionales de tratamiento (MARN, 2013, p. 3, 4, 84). En cierta medida puede inferirse que, como producto de las actividades humanas en zonas industriales, se generan efluentes con presencia de sustancias colorantes que, sin un adecuado tratamiento, se descargan a los ríos y lagos ocasionando su deterioro.

Los colorantes sintéticos alimenticios y cosméticos tales como el FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40, pueden provocar un impacto ambiental como contaminantes del agua afectando la biota acuática (procesos fotosintéticos) y un claro efecto estético negativo, según puede inferirse del artículo de Figueroa et al. (2015). Además, se ha comprobado que el FD&C Rojo No. 40 cuando está presente en altas concentraciones, uno de sus productos de degradación causa cáncer de vejiga en los animales (Sanders, 2012, citado por Letona, 2014).

En el caso de la presente investigación, se busca evaluar el poder adsorbente de las escamas de pescado, olote y brácteas de maíz en cuanto a colorantes como una forma

de dar valor agregado al desecho agroindustrial que de otra forma puede ser descartado sin ningún aprovechamiento y que, en grandes cantidades, por ser materia orgánica puede descomponerse, generando malos olores, proliferación de plagas (moscas y roedores) con el consiguiente peligro sanitario asociado; además, estos residuos son quemados, sobre todo en las áreas rurales, aunando más a la contaminación atmosférica.

Se espera contribuir a la reducción de la contaminación del medioambiente y como una alternativa al tratamiento convencional del color presente en las aguas residuales tales como filtración, intercambio iónico, oxidación, etc. ya que, al ser retenidos en materiales sólidos, se evita su contacto y dispersión en cauces de agua.

Se han realizado estudios de adsorbentes no convencionales (bioadsorbentes) en la búsqueda de materiales naturales renovables, asequibles y abundantes localmente tales como cáscaras de mango y naranja, tusa o dermis de la cebolla, constituyendo alternativas al carbón activado de uso común para este propósito pero que es de alto costo y de difícil regeneración (McDougall, 1991, citado por Valladares-Cisneros et al., 2017).

Se pretende que, con la investigación, se determinen las condiciones (pH y tamaño de partícula) adecuadas conducentes a una mejor adsorción de los colorantes estudiados, para ello se determinarán las coordenadas de color CIELAB utilizando una aplicación para teléfono móvil mediante la captura de fotografías en un ambiente controlado (cabina de luz) para obtener resultados reproducibles con el menor error experimental asociado, que permitan el cálculo de la diferencia de color entre una solución estándar y cada una de las muestras luego de ser sometidas a adsorción en lecho fijo.

También se pretende determinar cuál de los residuos es más efectivo en esta propiedad, valorizando a estos materiales que son considerados como desechos. Podría ser útil para futuras investigaciones prometedoras y más avanzadas que permitan su utilización como sorbente de colorantes de aguas residuales industriales.

Por lo anterior, se plantea la siguiente pregunta: ¿Existe diferencia significativa entre los promedios de la diferencia de color de los residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes?

La presente investigación tiene como objetivo general:

Analizar la capacidad bioadsorbente de escamas de pescado, olote y brácteas de maíz en la remoción de colorantes de soluciones sintéticas.

En concordancia con el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar la influencia de las variables, tamaño de partícula y pH, en la reducción del color por parte de los materiales bioadsorbentes.
- Evaluar la efectividad en la remoción de colorantes mediante la determinación de coordenadas del espacio de color.
- Evidenciar, mediante análisis estadístico, si existe diferencia significativa en la capacidad adsorbente de los residuos agroindustriales considerados.

Este trabajo está estructurado de la siguiente manera:

En el capítulo 1: “El color”, se aborda el color desde varios puntos de vista, su evolución a lo largo de los años, la clasificación y atributos de los colores, así como el mecanismo de sensación y percepción en el ser humano; además, se presentan algunas escalas y técnicas de medición del color.

En el capítulo 2: “Los colorantes”, se brinda información sobre colorantes y pigmentos, con énfasis en las características fisicoquímicas de los colorantes FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40 utilizados en la presente investigación. Se aborda brevemente la contaminación de efluentes por colorantes, agentes causales y efectos, así como la descripción de algunas técnicas modernas para su depuración.

En el capítulo 3: “La adsorción”, se pretende conocer el fenómeno específico de sorción, sus características y cómo los materiales convencionales (carbón activado, gel de sílice) y no convencionales (residuos vegetales y animales) presentan la capacidad de adsorber los colorantes; asimismo, se describen los residuos agroindustriales: escamas de pescado, olote y brácteas de maíz utilizados como bioadsorbentes en el presente estudio.

En el capítulo 4: “Diseño metodológico”, se describen detalladamente cada uno de los pasos realizados durante la investigación, tanto en la preparación de los materiales bioadsorbentes y soluciones sintéticas de los adsorbatos, obtención de los filtrados durante los ensayos de adsorción en lecho fijo como en la cuantificación de las

coordenadas del espacio de color utilizando una aplicación de teléfono móvil. Se presenta el análisis estadístico implementado con sus respectivas hipótesis de trabajo.

En el capítulo 5: “Resultados”, se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de adsorción en lecho fijo de los residuos agroindustriales y la diferencia de color entre las muestras de filtrado y las soluciones utilizadas como estándar. Se incluye el detalle de las respuestas de los análisis estadísticos considerados.

En el capítulo 6: “Discusión”, se realiza la interpretación de los resultados descritos en el capítulo precedente, para evaluar el grado de cumplimiento con los objetivos e hipótesis de investigación planteados, así como el contraste con otras investigaciones similares.

En el capítulo 7: “Conclusiones generales”, se enuncian las conclusiones relevantes de la investigación, destacando su importancia, fortalezas y limitaciones que sirvan como base o para profundizar en investigaciones relacionadas a este campo.

En el capítulo 8: “Recomendaciones”, se enumeran las recomendaciones que pueden tomarse en cuenta para futuros proyectos que permitan considerar otras variables en estudio o mejores métodos, en la búsqueda de soluciones alternativas que reduzcan el problema de la contaminación de las aguas por parte de los colorantes.

Además, se declara la Bibliografía consultada en formato de redacción APA 7.^a edición y los Anexos que comprenden un conjunto de fotografías como evidencia de la realización de cada una de las etapas concernientes a la investigación.

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 1: EL COLOR

El presente capítulo inicia considerando algunas definiciones del término color, las teorías más reconocidas del color de los objetos que han surgido a través de la historia, así como la sensación y la percepción del color por parte de los seres humanos. Se describen los atributos que identifican un color en específico, los juegos conocidos del color, las escalas de medición del color con énfasis en el sistema CIELAB, y para finalizar, se describen algunas técnicas tradicionales y modernas para la medición de esta propiedad.

1.1. Definición

Bujdud (1999) establece que la palabra color tiene múltiples definiciones, dependiendo del área de estudio que la aborde. En la química y en el arte está relacionada con los tintes, pigmentos y materiales afines. La física lo aborda desde el campo de la óptica, según las propiedades ópticas de los materiales. La fisiología y la psicología están interesadas en la naturaleza del proceso visual y la sensación que se ejerce en la conciencia de un observador.

Entre algunas definiciones de color, se encuentran:

- “Un aspecto de la apariencia: un estímulo basado en la respuesta a la luz consistente en las tres dimensiones de matiz, saturación y claridad”. (X-Rite, 2002, p. 21)
- “Una impresión sensorial que recibimos a través de los ojos, no sujeto a la materia colorante de la misma; por lo tanto, es una experiencia visual”. (Mariñas, 2018, p. 25)
- “Radiación electromagnética (luz) reflejada o transmitida por una materia (objeto) y percibida e interpretada por el hombre (observador)”. (Datacolor, s.f., p. 01)
- Gareca (2015, p. 15) afirma lo siguiente:

Una impresión visual que tiene el sujeto del objeto, donde la longitud de onda de luz, que es reflejada por la materia es captada por el sentido de la vista y que transmite esa impresión directamente al cerebro, donde se producen procesos neurofisiológicos muy complejos.

Para efectos de esta tesis, se considera óptima la definición de color de X-Rite (2002, p. 21) porque el color se define a partir de sus tres atributos, con lo cual puede establecerse un carácter objetivo a su medición siendo reproducible y contrastable.

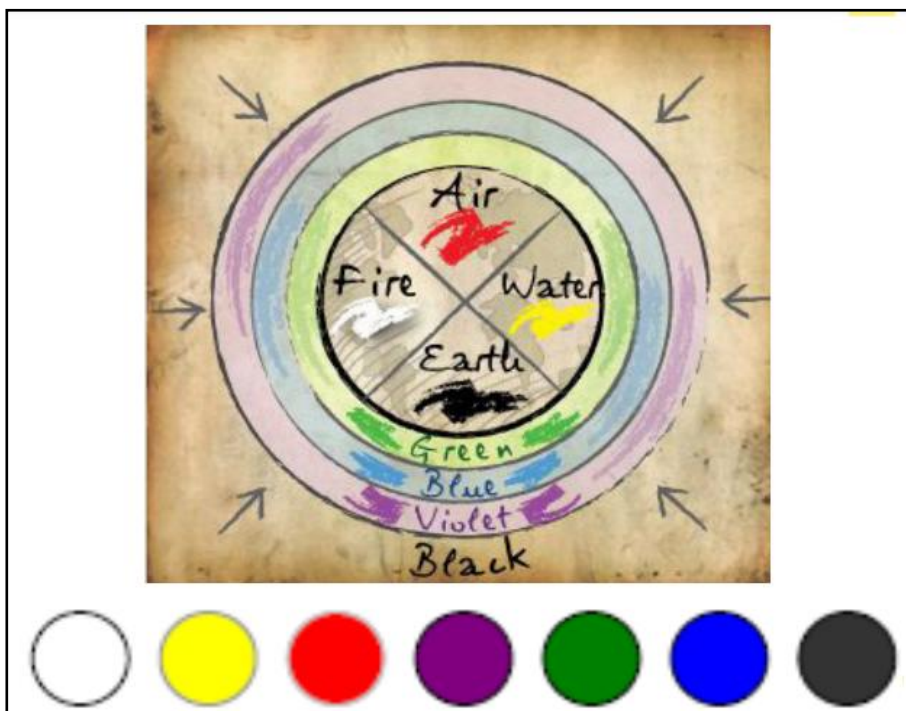
1.2. Teorías sobre el color

A continuación, algunas de las teorías del color más relevantes que han surgido a lo largo de la historia de la humanidad:

Aristóteles (384 a.C.), reta algunas de las teorías de su maestro Platón sobre la visión y el color, mediante la asociación de los sentidos con los elementos naturales: el fuego (rojo), la tierra (amarillo), el agua (verde) y el aire o cielo (azul). Propone una teoría de los siete colores (blanco, amarillo, rojo, violeta, verde, azul profundo y negro) en analogía con las siete notas musicales y en los cambios de colores que ocurren durante el día (Gareca, 2015). Véase la Figura 1.1.

Figura 1.1.

Teoría de los siete colores de Aristóteles

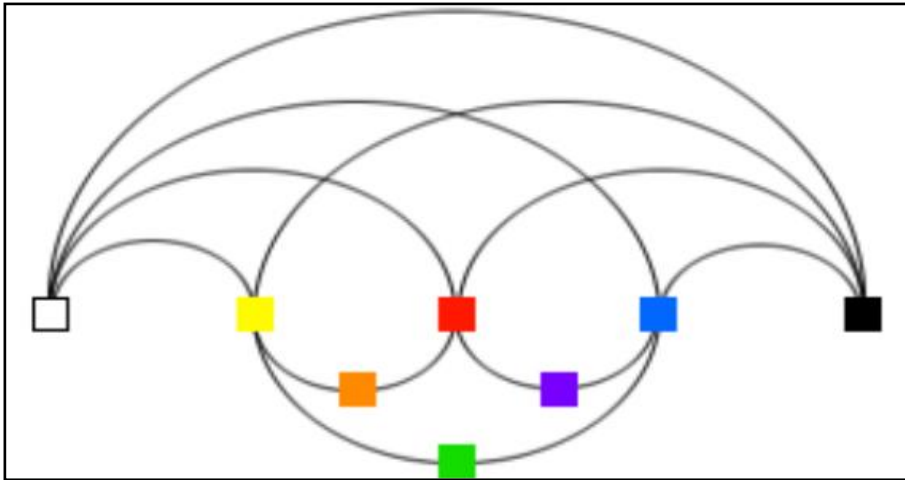


Nota: Gareca (2015).

Leonardo Da Vinci (1452-1519), consideró al color como propiedad de la materia, el blanco como principal ya que permite recibir a todos los demás colores; después sigue el amarillo (tierra), verde (agua), azul (cielo), rojo (fuego) y negro (oscuridad), este último color priva de todos los otros, véase la Figura 1.2. Observó que con la mezcla de estos colores obtenía todos los demás (Gareca, 2015).

Figura 1.2.

El color según Leonardo Da Vinci



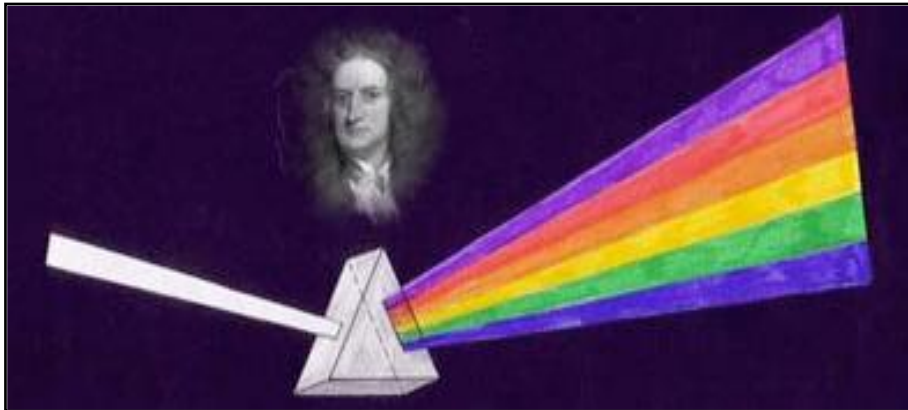
Nota: Gareca (2015).

Isaac Newton (1643-1727), indicó que la “luz es color” estableciendo así una teoría basada en el conocimiento científico sobre la descomposición de la luz. Para ello oscureció una habitación y, a través de un pequeño agujero, permitió el paso de un rayo de luz sobre un prisma, descomponiendo la luz en varios colores, según se aprecia en la Figura 1.3. Newton propone dos tipos de colores, “originales y simples” tales como el rojo, amarillo y azul, y los “colores creados de la mezcla de los anteriores”, por ejemplo, el verde que se obtiene al mezclar la luz azul con la amarilla (Gareca, 2015).

Quedó demostrado que los colores del espectro son el azul violáceo, el azul celeste, el verde, el amarillo, el rojo anaranjado y el rojo púrpura. Este fenómeno se puede apreciar cuando llueve y hace sol, donde las gotas de agua actúan como un prisma de Newton, produciendo los colores del arco iris al descomponer la luz (Navarrete, s.f.).

Figura 1.3.

Teoría de Isaac Newton sobre la descomposición de la luz

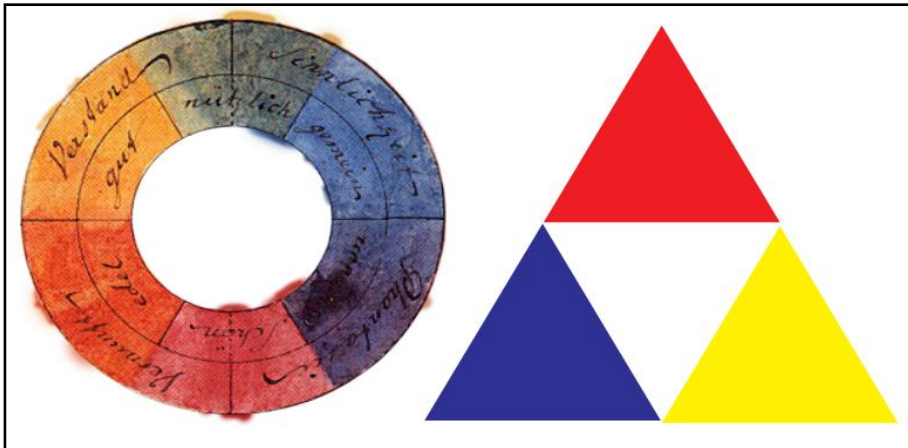


Nota: Navarrete (s.f.).

Johann Goethe (1749-1832), estudió las reacciones fisiológicas y psicológicas del ser humano expuesto a diferentes colores. Este trabajo derivó en su pirámide de los colores básicos rojo, amarillo y azul, refiérase a la Figura 1.4. (Gareca, 2015). Asimismo, en su círculo colocó de forma opuesta el azul, rojo y amarillo, la combinación de estos forman otros colores, los llamados secundarios y terciarios, véase la Figura 1.4. (Alonso, 2019).

Figura 1.4.

Círculo y triángulo de Goethe



Nota: Gareca (2015).

Asoció el triángulo como un diagrama de la mente humana, relacionando así ciertas emociones a cada color, por lo que fue la piedra angular de la actual psicología del color (Gareca, 2015).

Realizó otros diagramas triangulares tomando en cuenta el contenido emocional de cada color, algunos ejemplos se aprecian en la Figura 1.5. (Alonso, 2019).

Figura 1.5.

Contenido emocional de los colores



Nota: Alonso (2019).

Para Göethe, lo que se observa de un objeto no solo depende de la materia ni de la luz tal como lo dijo Newton, sino que es importante la percepción que se tiene del objeto; por ende, se involucra la subjetividad asociada a la percepción de cada individuo (Mariñas, 2018).

1.3. La percepción del color

Bujdud (1999) manifiesta que debido a que el color es una percepción, se debe confiar en observadores para describirlo, pero no puede especificarse en un sentido absoluto y cuantitativo (no existe manera de “colocar un número” al color). Por tanto, el color puede describirse solamente en un sentido comparativo, es decir, comparando los atributos de un color con los de otro. Es importante resaltar que el color no es una característica de los objetos, pero sí de la luz que ellos reflejan y que entra en nuestros ojos; ya que se pueden observar diferentes colores cuando el mismo objeto es iluminado con varias fuentes luminosas.

A manera de conclusión, se establece que “el color atribuido a cualquier objeto tangible es aquél en el cual la luz, de acuerdo al juicio del observador, sería reflejada por el objeto bajo la iluminación en que ese objeto es visto de costumbre”. (Bujdud, 1999, p. 6)

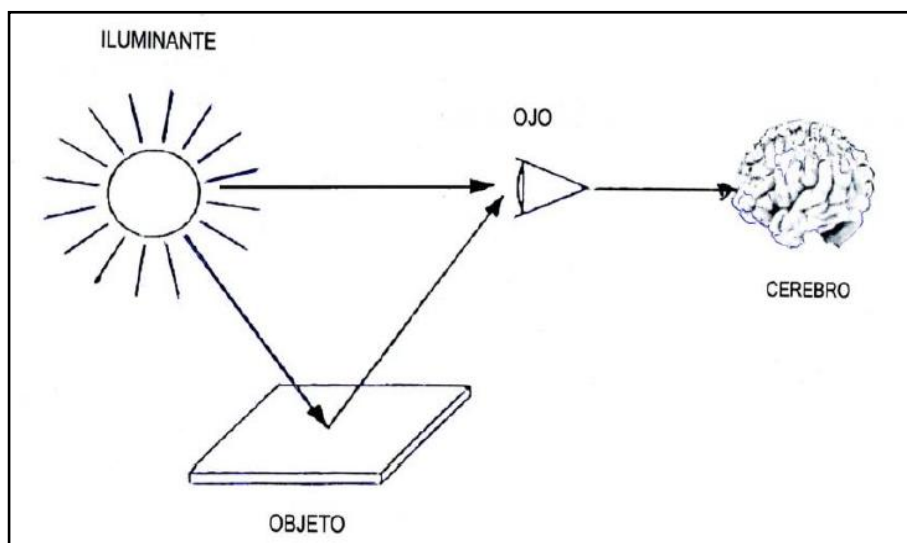
Pesok (2017, p. 4) considera que el color es una percepción resultante de procesos neurológicos que ocurren en el cerebro y que se manifiesta en la conciencia, participando:

- Un iluminante, que emite energía radiante visible (de los 380 nanómetros a los 780 nanómetros, aproximadamente).
- Un objeto, que refleja una parte de la luz que recibe del iluminante (otras fracciones pueden ser absorbidas y/o transmitidas).
- El ojo, que recibe la luz reflejada por el objeto y, a través del nervio óptico, envía señales químicas y eléctricas al cerebro correspondientes a esos estímulos.
- El cerebro, que percibe primeramente las señales como una sensación y luego las interpreta generando una percepción.

La Figura 1.6. muestra los componentes involucrados en la percepción del color.

Figura 1.6.

La percepción del color



Nota: Pesok (2017).

Pesok (2017) aclara que la sensación es un fenómeno fisiológico que resulta de la recepción de estímulos del mundo exterior mediante células especializadas de los órganos, y transformados en impulsos nerviosos que se transmiten al cerebro. En cambio, la percepción es un fenómeno psicológico, en la cual ocurre la valorización, organización e interpretación de esas sensaciones por el cerebro. Por ejemplo, sentimos variaciones en la presión del aire, pero percibimos sonidos; sentimos cambios en la composición química del aire aspirado, pero percibimos fragancias, sentimos variaciones en la radiación electromagnética visible, pero percibimos luz y color.

Se estudiará con más detalle cada uno de los elementos del triplete:

1.3.1. El iluminante (fuente de luz)

Científicamente, la luz se define como “la radiación que emiten algunos cuerpos, por incandescencia o luminiscencia que, iluminando a los objetos, los hace visibles”. Puede definirse también como “el conjunto de radiaciones capaces de estimular el órgano visual”. (Ortiz, 2002, p. 8)

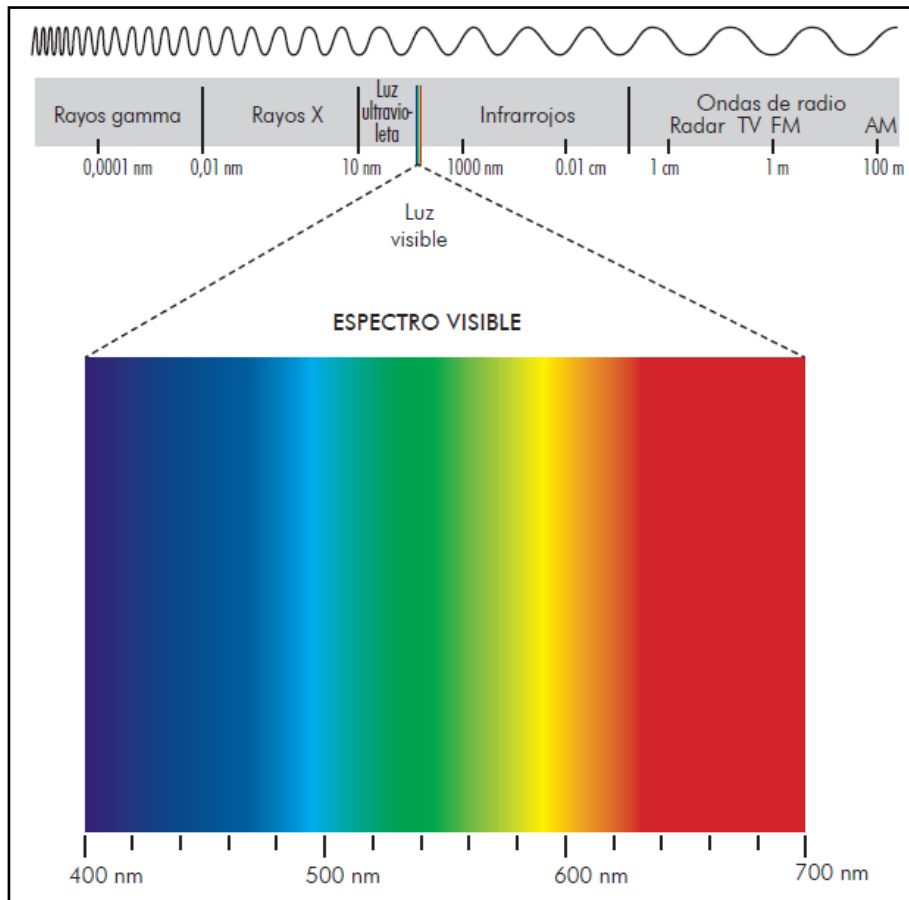
Newton, en 1672, descubrió que la luz podía separarse en colores mediante un prisma, estos colores se organizan en una serie precisa o llamada espectro, que comienza con el rojo pasando por el anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo y termina con el violeta. El espectro no es más que el resultado de separar la luz según la longitud de sus ondas constitutivas (Contreras, 2007).

Aproximadamente cien años después de los descubrimientos de Newton, James Clerk Maxwell demostró que la luz estaba compuesta por un mosaico de radiación electromagnética conteniendo las ondas radiofónicas, la luz visible y los rayos X. La luz visible constituye el rango de longitudes de onda dentro del espectro electromagnético al que el ojo humano responde a través del color, es así como el violeta posee la longitud de onda más corta y el rojo la más larga, véase la Figura 1.7. (Contreras, 2007).

El espectro visible contiene numerosos colores que se diferencian por su longitud de onda, el ser humano puede llegar a distinguir hasta aproximadamente 10000 colores (Ortiz, 2002).

Figura 1.7.

Espectro de luz visible para el ojo humano



Nota: Datacolor (s.f.).

Si se considera un trozo de metal (hierro) y se calienta a 300 °C, emite prácticamente toda la energía radiante en la región infrarroja (calor). A 800 °C ese cuerpo ya emitiría energía visible y se le vería rojo, pero gran parte de la energía emitida pertenecería a la región infrarroja. A 3000 °C, que es la temperatura aproximada del filamento de tungsteno en una lámpara incandescente, la energía emitida estaría compuesta de ondas de todas las longitudes de onda del espectro visible (Pesok, 2017).

Por lo que, para cada temperatura, el cuerpo tendrá una curva espectral de emisión característica, esta luz emitida tendrá un color al que se le puede asignar un número conocido como "temperatura de color", que es equivalente al valor numérico de la temperatura absoluta (expresada en Kelvin) de un cuerpo negro que, a esa temperatura, emita luz de un color igual al de la luz emitida por el iluminante (Pesok, 2017).

En la Figura 1.8. puede apreciarse la luz emitida según la temperatura de color.

La luz diurna se compone de luz solar directa y luz irradiada por la atmósfera, el rango espectral de la luz solar va desde los 200 K hasta los 4000 K, pero la calidad y energía de esta fuente de luz no es constante y varía de acuerdo a la ubicación, la estación, las condiciones meteorológicas, la contaminación del aire y la hora del día. Por causa de esto, la temperatura de color de la iluminación diurna varía entre los 4000 K y los 6500 K; en este sentido, para realizar cálculos colorimétricos, la fuente de luz denominada luz diurna debería normalizarse de forma que pudiera ser reproducible y constante (Datacolor, s.f.).

Un iluminante es una fuente de luz normalizada e imaginaria, como una especie de tabla estandarizada de valores que representan a los típicos emisores de luz. Los iluminantes representan a blancos que parecen más anaranjados o azulados según sea la temperatura del color (Ortiz, 2002).

Figura 1.8.

Temperaturas de color



Nota: Lumega (2017).

La Comisión Internacional de la Iluminación (CIE) ha evaluado y caracterizado diversas fuentes de luz para crear estándares industriales fiables, los iluminantes más importantes normalizados por la CIE son la D65 (daylight, luz diurna a 6504 K), la A (luz de bombilla) y la F11 (tubos fluorescentes) (Datacolor, s.f.).

1.3.2. El objeto (la materia)

Datacolor (s.f., p. 06) establece que:

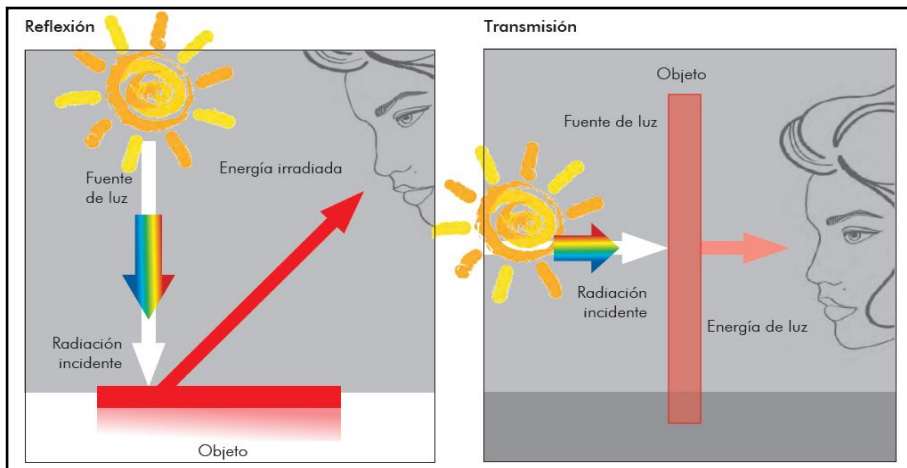
Todo objeto o superficie tiene la propiedad de reflejar o absorber la luz irradiada con mayor o menor potencia, distinguiendo:

- Objetos opacos, la luz es parcialmente absorbida y parcialmente reflejada.
- Objetos transparentes, la luz es parcialmente absorbida, parcialmente reflejada y pasa parcialmente a través del objeto sin dispersarse.
- Objetos translúcidos, la luz es parcialmente reflejada, parcialmente absorbida y pasa parcialmente a través del objeto dispersándose.

Cuando la luz incide sobre la superficie de un objeto, una parte de esta luz es absorbida y la otra parte es reflejada o transmitida (véase la Figura 1.9.), el ojo humano puede percibir la parte reflejada o transmitida de la radiación, la cual se procesa en el cerebro para formar una impresión del color. Por lo que, si se absorbe toda la luz, percibimos el color negro; si se refleja toda la luz, veremos el color blanco (Datacolor, s.f.).

Figura 1.9.

Fenómenos de reflexión y transmisión de la luz



Nota: Datacolor (s.f.).

El color de un objeto será aquél correspondiente a la longitud de onda que no es absorbida por el mismo. Un objeto azul iluminado por luz blanca absorbe la mayoría de las longitudes de onda excepto las correspondientes al color azul que son reflejadas por el objeto y son percibidas por el ojo. Se dice que este color es complementario al color

que se percibiría si la luz absorbida se pudiera detectar, debido a que la luz emitida y la absorbida forman la luz blanca original (Contreras, 2007).

La Tabla 1.1. muestra los colores del espectro visible (absorbido y complementario) según la longitud de onda.

Tabla 1.1.

Colores del espectro visible: absorbido y complementario

λ absorbida (nm)	Color absorbido	Color observado (complementario)
380-420	Violeta	Verde-amarillo
420-440	Azul-violeta	Amarillo
440-470	Azul	Naranja
470-500	Verde-azulado	Rojo
500-520	Verde	Púrpura
520-550	Verde-amarillo	Violeta
550-580	Amarillo	Azul-violeta
580-620	Naranja	Azul
620-680	Rojo	Verde-azulado
680-780	Púrpura	Verde

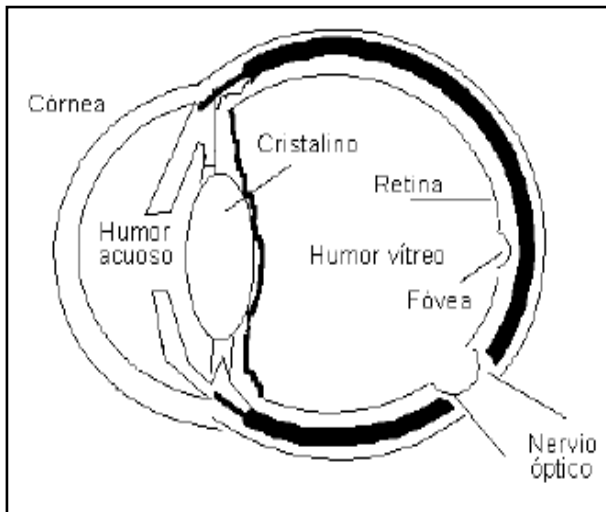
Nota: Contreras (2007).

1.3.3. El observador (ojo y corteza cerebral)

La retina, ubicada en la pared posterior del ojo, es una capa sensible a la luz que está compuesta de dos tipos de células especializadas: los bastones y los conos, cuya distribución no es uniforme, en la retina existe una pequeña zona, la fovea, donde no se presentan bastones, pero sí predominan los conos, véase la Figura 1.10. Cada uno de estos fotorreceptores se conectan al cerebro mediante el nervio óptico (Pesok, 2017).

Figura 1.10.

Anatomía del ojo humano

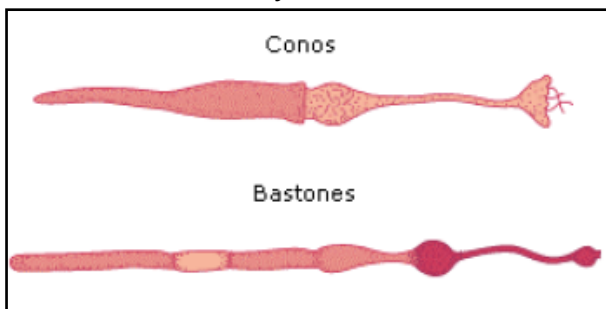


Nota: Ortiz (2002).

La Figura 1.11. muestra, con detalle, la anatomía de los conos y bastones.

Figura 1.11.

Anatomía de conos y bastones de la retina



Nota: Rodieck (1973, citado por Ortiz, 2002).

Hay unos 110 a 130 millones de bastones que contienen un pigmento llamado rodopsina y son responsables por las sensaciones acromáticas de luz y de muy poca luz (predominantes en la visión escotópica o nocturna). En contraste, hay solo unos 6 a 7 millones de conos que funcionan a mayores niveles de iluminación (predominantes en la visión fotópica o diurna) y estos son los responsables de la percepción del color (Pesok, 2017).

Pesok (2017) enfatiza que en el ojo humano existen tres tipos de conos:

- a. Sensitivos a longitudes de onda bajas (430 nm, S, *Short*, Cortas) o a la luz azul, que contienen un pigmento llamado cianolabe.
- b. Sensitivos a longitudes de onda medianas (530 nm, M, *Middle*, Medias) o a la luz verde, que contienen un pigmento llamado clorolabe.
- c. Sensitivos a longitudes de onda más altas (560 nm, L, *Long*, Largas) o a la luz roja, que contienen un pigmento llamado eritrolabe.

Cabe destacar que estos pigmentos constituyen una variante de la proteína opsina, que está estrechamente ligada a la vitamina A (Pesok, 2017).

Pesok (2017, p. 20) afirma que:

Tanto la teoría de la visión tricromática propuesta por Thomas Young y Hermann von Helmholtz como la teoría de la comparación de pares oponentes de Ewald Hering, sostienen entonces que todos los colores se pueden obtener y percibir como una mezcla o adición de tres primarios: rojo, verde y azul. Una vez que el estímulo lumínico alcanza a los foto-receptores (conos y bastones), se genera un impulso, de naturaleza electroquímica, que viaja a través del nervio óptico hasta el cerebro, donde de alguna forma se comparan las señales azul, verde y roja recibidas de los tres tipos de conos, con las señales de intensidad lumínica de los bastones para, finalmente, elaborar la sensación o percepción de color.

Pesok (2017, p. 19-20) reconoce que, la teoría hasta ahora aceptada plantea que el cerebro hace tres comparaciones simultáneas de las señales que recibe de los tres tipos de conos:

- a. Compara la intensidad de la señal de los conos “rojos” con la de los conos “verdes” para producir una señal “rojo/verde”.
- b. Compara la intensidad total de las señales de los conos “rojos” y “verdes” con la de los conos “azules” creando una señal “amarillo/azul”.
- c. Compara las señales provenientes de todos los conos y bastones contra un valor nulo para producir una señal de “luminosidad/oscuridad”.

1.4. Atributos o propiedades del color

Montesinos (2003) indica que a partir de las respuestas iniciales que proporcionan estos tres sensores LMS de la retina, el cerebro las recoge y las interpreta para proporcionar un código de color al objeto visto, que consta de tres atributos básicos:

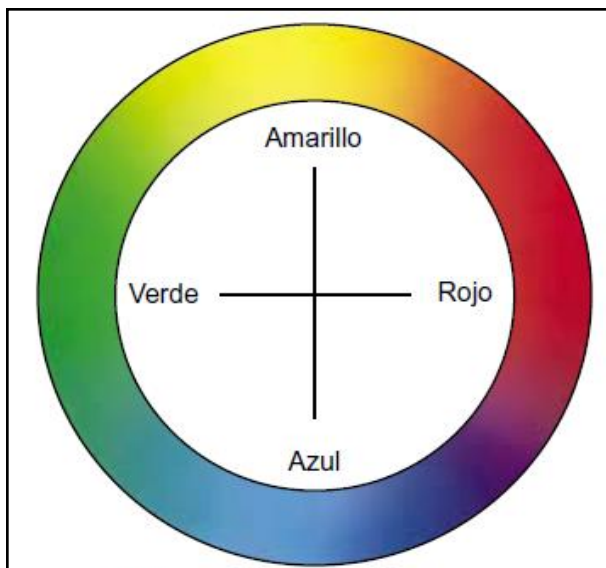
1.4.1. *Matiz, tinte, tono o hue*

Para Fundación Colorearte (s.f., p. 3) es “la cualidad que nos permite diferenciar un color de otro y la que le da nombre al color”. Pesok (2017, p. 20) establece que “está relacionado con la longitud de onda predominante de la radiación visible que recibe el ojo”.

Puede decirse que es el estado puro del color, sin agregar blanco o negro. Hace referencia a la pureza del color y al recorrido que hace un tono hacia un lado u otro de la rueda cromática (véase la Figura 1.12.), así el verde amarillento y el verde azulado pueden considerarse matices diferentes del verde (García, 2016).

Figura 1.12.

Matiz



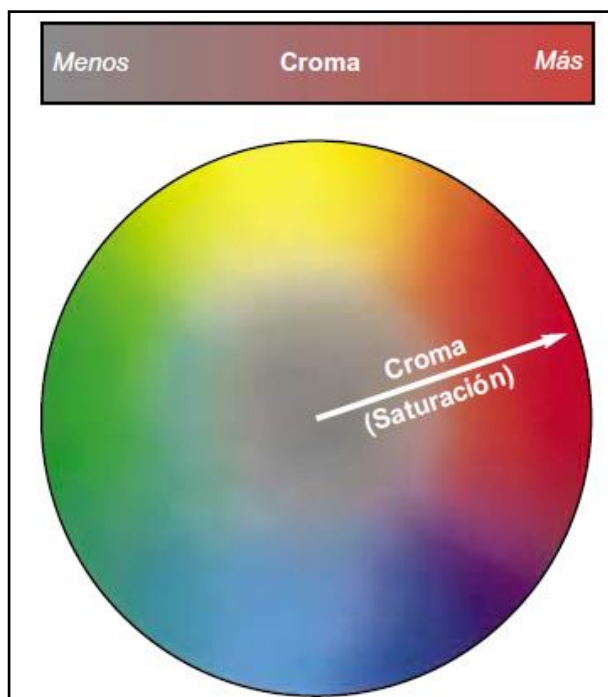
Nota: X-Rite (2002).

1.4.2. Saturación, intensidad, croma o saturation

Según Navarro (2005), indica la pureza cromática, es decir, la falta de dilución con el blanco y que está relacionado con lo llamativo o apagado de un color. Cuanto más saturado está un color, más puro se considera y posee menos mezcla de gris, según se indica en la Figura 1.13. Pesok (2017) sostiene que se relaciona con la longitud de onda predominante con respecto al resto de las longitudes de onda que inciden en el ojo. Al conjunto de matiz y saturación se denomina cromaticidad del color.

Figura 1.13.

Croma



Nota: X-Rite (2002).

1.4.3. Luminosidad, valor, brillo o lightness

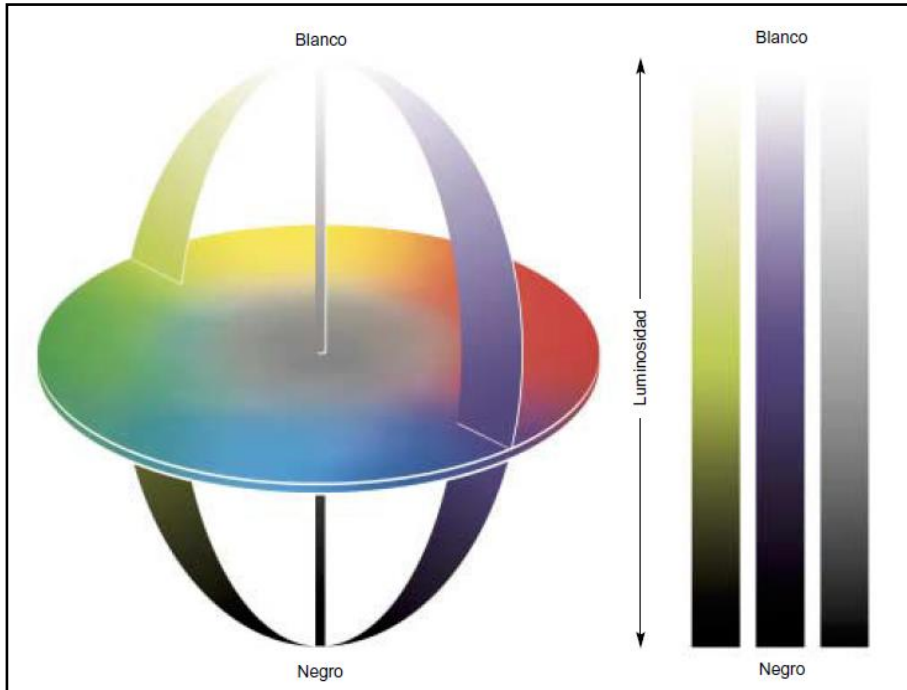
Está relacionado con la cantidad total de energía luminosa que llega al ojo (luminancia, si observamos objetos que emiten luz, o reflectancia, si observamos objetos que reflejan luz) (Pesok, 2017).

Tiene que ver con lo claro u oscuro que parece un color, los colores cambian al aplicar blanco consiguiendo valores de luminosidad altos; en cambio, con la aplicación del negro al color patrón disminuirá su valor (García, 2016).

La Figura 1.14. muestra el grado de luminosidad de un color.

Figura 1.14.

Sistema de color tridimensional que muestra la luminosidad

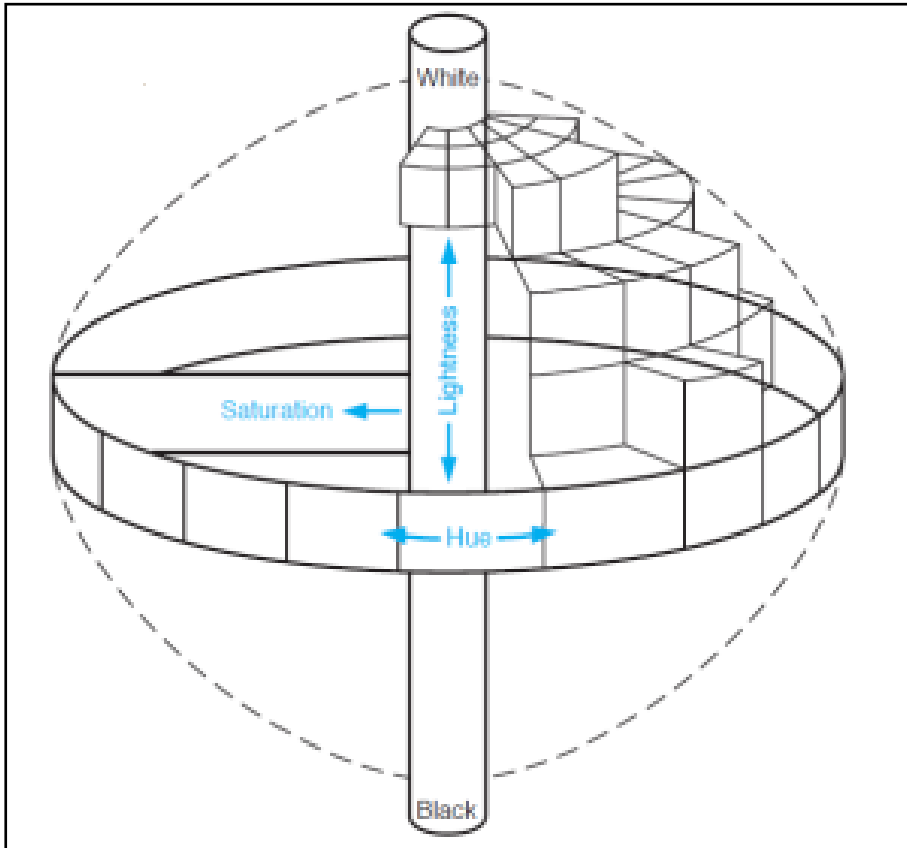


Nota: X-Rite (2002).

Estos elementos son los tres atributos del color y pueden combinarse para crear un sólido tridimensional donde los tonos conforman el borde exterior, con la luminosidad como el eje central y la saturación como los radios horizontales, según se aprecia en la Figura 1.15. (Konica Minolta Sensing, Inc., 2007).

Figura 1.15.

Sólido tridimensional

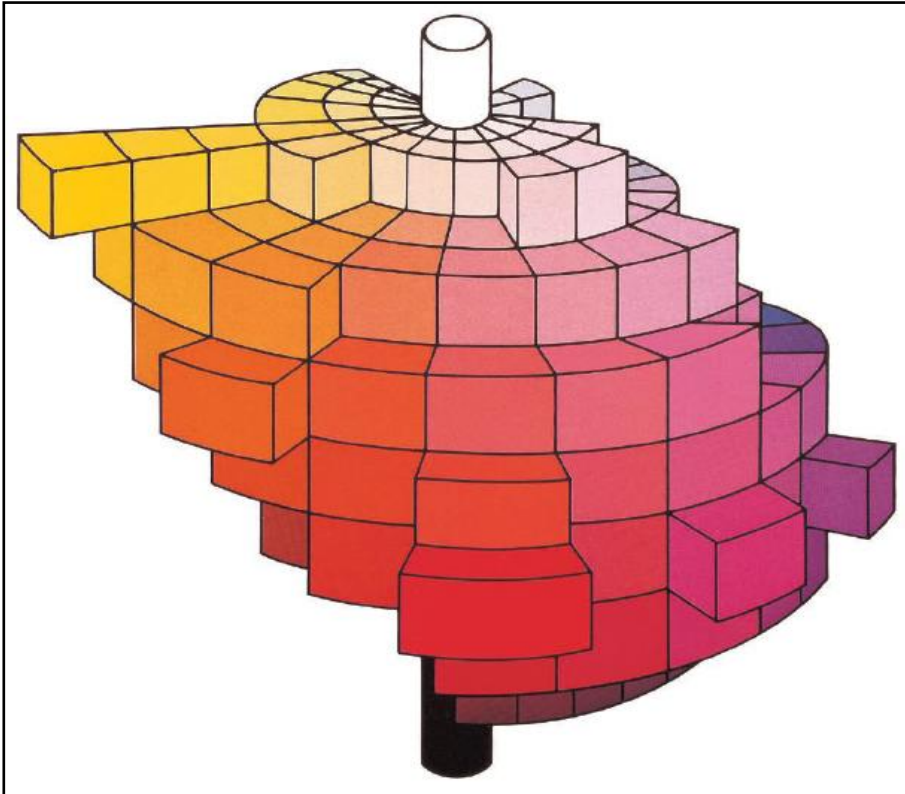


Nota: Konica Minolta Sensing, Inc. (2007).

Si los colores reales existentes en el mundo se distribuyeran en torno al sólido de la figura anterior, se crearía el sólido de colores que se presenta a continuación (véase la Figura 1.16.) y que nos ayudará a comprender mejor la relación entre tono, saturación y luminosidad (Konica Minolta Sensing, Inc., 2007).

Figura 1.16.

Sólido de colores



Nota: Konica Minolta Sensing, Inc. (2007).

1.5. Los juegos de color

1.5.1. Colores primarios

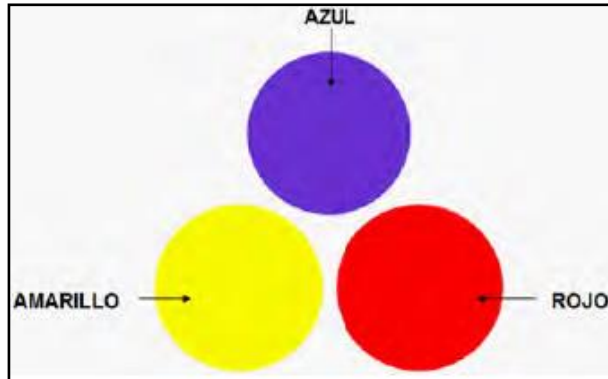
Según Gareca (2011) los colores primarios no pueden crearse mediante la mezcla de otros colores, pero al mezclar los primarios en diversas combinaciones se crea un número infinito de colores. Los tres juegos de colores primarios son:

- a. El primer juego de primarios o colores saturados son el rojo, el amarillo y el azul. Mezclando estos colores se obtienen todos los demás tonos, usados por los pintores (Gareca, 2011).

La Figura 1.17. muestra los tres colores saturados.

Figura 1.17.

Colores saturados

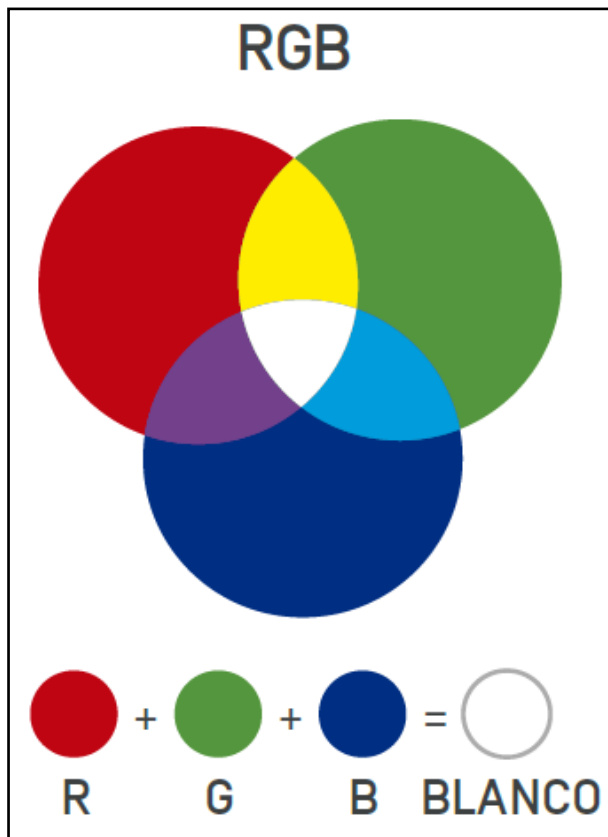


Nota: Gareca (2011).

- b. El segundo juego de primarios, primarios aditivos o colores luz son el rojo (*red*), verde (*green*) y el azul (*blue*). Al mezclarse forman otros colores y si lo hacen en iguales proporciones producen la luz blanca (véase Figura 1.18.), usados en el campo científico o en la generación de imágenes en los monitores a color. Esta síntesis aditiva imita tecnológicamente lo que hace el ojo, constituyendo así la base técnica de la televisión en color (Gareca, 2011).

Figura 1.18.

Colores luz



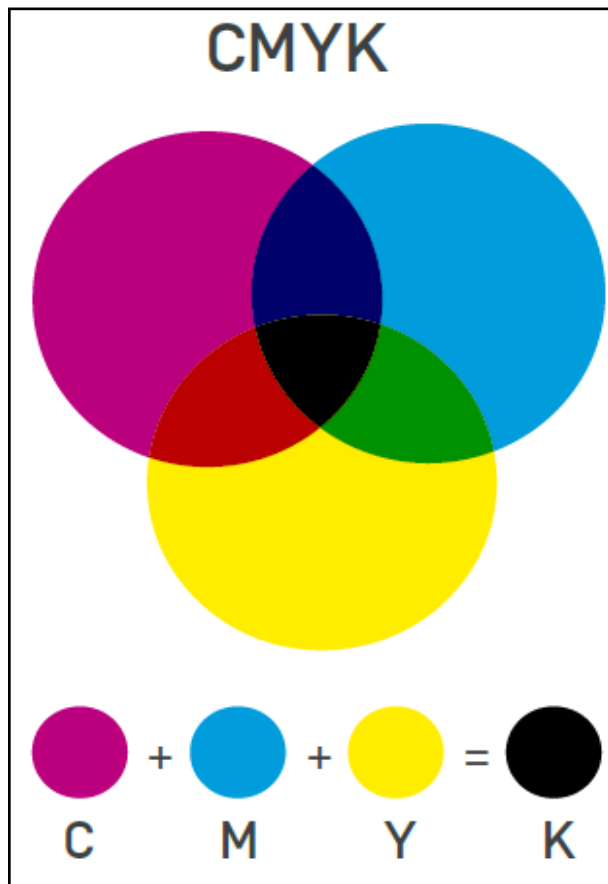
Nota: Fundación Colorearte (s.f.).

- c. El tercer juego de primarios, síntesis sustractiva o colores pigmento, se compone de magenta (que absorbe el verde), amarillo (que absorbe el azul) y el cian (que absorbe el rojo), usados por las imprentas donde la separación de colores se realiza mediante filtros para restar luz de los primarios aditivos (Gareca, 2011).

La Figura 1.19. representa a los colores pigmento.

Figura 1.19.

Colores pigmento



Nota: Fundación Colorearte (s.f.).

1.5.2. Colores secundarios

Se obtienen cuando se mezclan partes iguales de dos colores primarios (Gareca, 2011).

1.5.3. Colores terciarios

Estos colores “se consiguen al mezclar partes iguales de un color primario y de un secundario adyacente”. (Gareca, 2011, p. 16)

1.6. Escalas de medición de color

1.6.1. Sistema Munsell

En 1905, el artista Albert H. Munsell dio origen a un sistema de orden de color (escala de color) en el cual se asignan valores numéricos a cada propiedad del color: matiz, valor y croma (X-Rite, 2002).

Consta de una serie de cartas de colores que se utilizan para la comparación visual con la muestra. Los colores se definen en términos de Munsell *Hue* (H; indica matiz), Munsell *Value* (V; indica luminosidad) y Munsell *Chroma* (C; indica saturación), se escribe como H V / C (Konica Minolta Sensing, Inc., 2007).

La escala de Munsell Tono (*Hue*) es circular y está dividida en cinco tonos principales: R (Rojo), Y (Amarillo), G (Verde), B (Azul), P (Violeta), existiendo un total de 40 cartas de tono constante. Para los tonos intermedios, se emplean las iniciales de los dos primarios más próximos, por ejemplo, los naranjas se denotan como YR (ya que implica mezcla de amarillo y rojo), según puede apreciarse en la Figura 1.20. (Serra et al., s.f.).

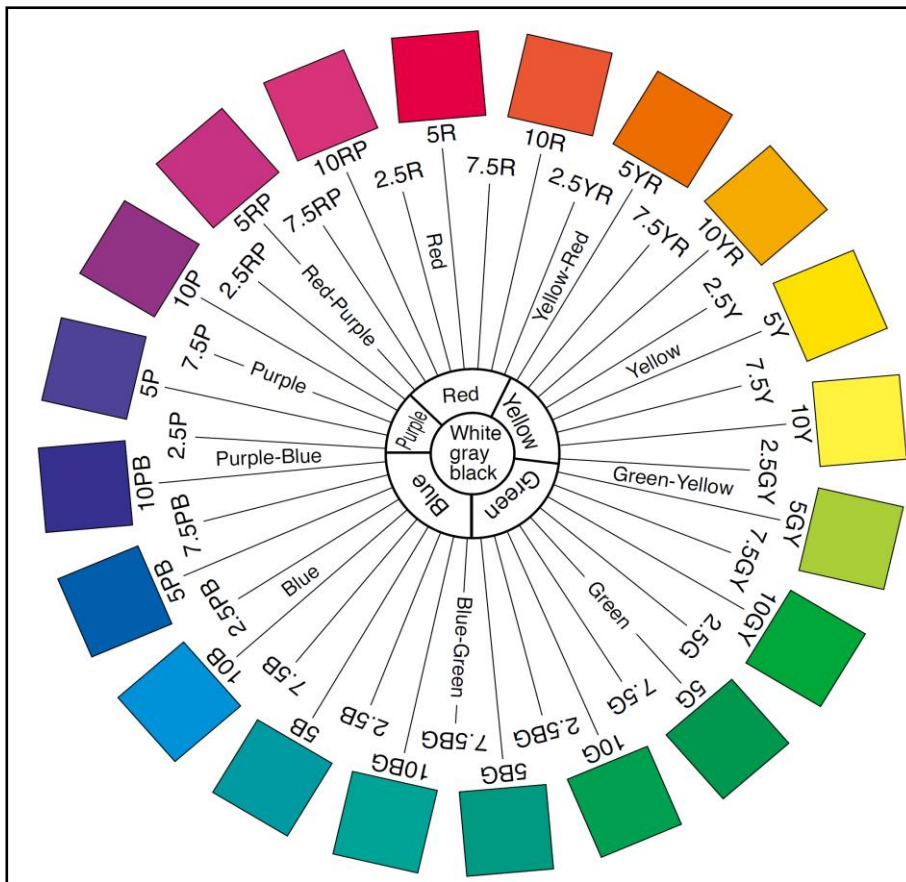
La escala de Munsell Valor (*Value*) está relacionada con la claridad relativa de las muestras, entre dos valores extremos: 1 (indicando mínima blancura) a 9 (indicando máxima blancura) (Serra et al., s.f.).

La escala de Munsell Croma (*Chroma*) está relacionada con la saturación de las muestras, de modo que las muestras más cromáticas se ubican en el borde exterior. Los valores van desde el 0 (grises) hasta el 26 (máxima saturación) (Serra et al., s.f.).

A manera de ejemplo, considerando el color con H = 5.0R, V = 4.0 y C = 14.0, su notación Munsell sería: 5.0R 4.0 / 14.0 (Konica Minolta Sensing, Inc., 2007).

Figura 1.20.

Círculo cromático Munsell

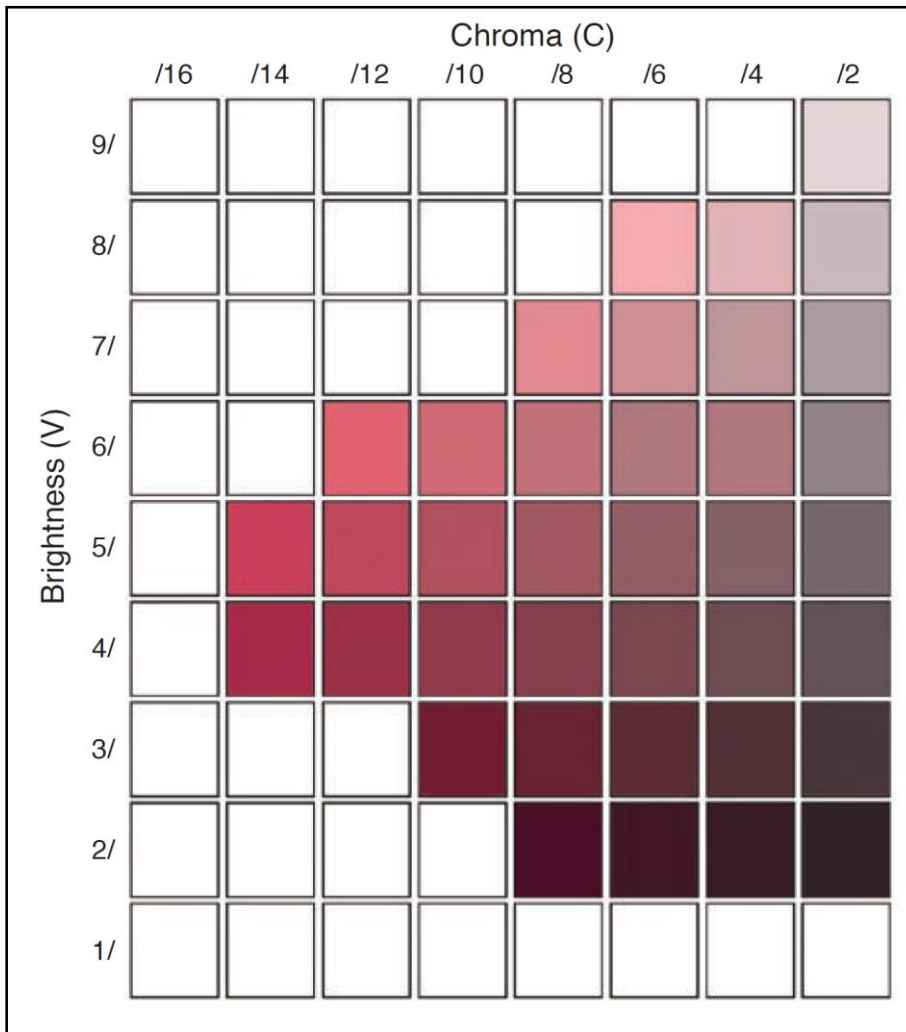


Nota: Konica Minolta Sensing, Inc. (2007).

La Figura 1.21. indica la escala de Munsell de valor y croma para el tono 2.5R.

Figura 1.21.

Ficha de color Munsell (el brillo y el croma de 2.5R)

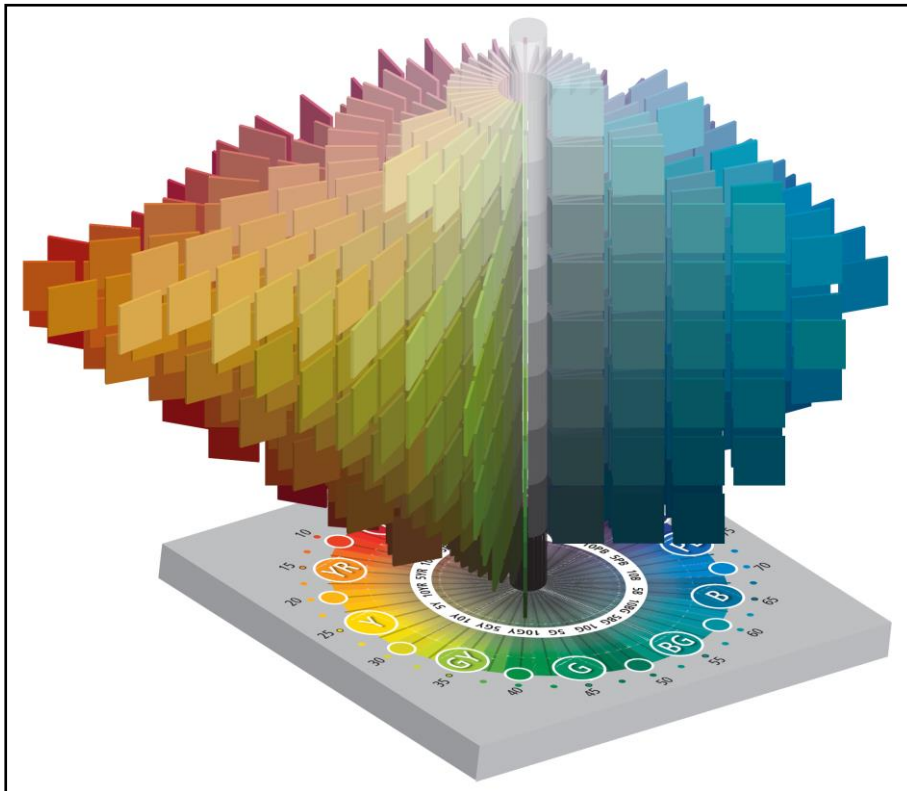


Nota: Konica Minolta Sensing, Inc. (2007).

La Figura 1.22. muestra el árbol de color de Munsell, como una vista tridimensional de las tres escalas (tono, valor y croma).

Figura 1.22.

Árbol de color de Munsell



Nota: X-Rite (2016).

1.6.2. Sistemas de color CIE

La Comisión Internacional de Iluminación (en francés *Commission Internationale de l'Eclairage*, CIE) es una organización independiente sin fines de lucro, dedicada a la cooperación mundial y al intercambio de información en asuntos relacionados con la luz y la iluminación, el color y visión, fotobiología y tecnología de la imagen. Se ha convertido en una organización profesional aceptada como representante de la mejor autoridad en la materia de luz e iluminación y está reconocida por la Comisión Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), la Organización Internacional de Normalización (ISO) y la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) como organismo internacional de normalización (CIE, 2021).

Un espacio de color se define como un “método para expresar el color de un objeto o de una fuente de luz empleando algún tipo de anotación, como pueden ser números” (Konica Minolta Sensing, Inc., 2007, p. 16). Ofrece un criterio objetivo para clasificar los colores, así como para representar y determinar las diferencias de color existentes (Datacolor, s.f.).

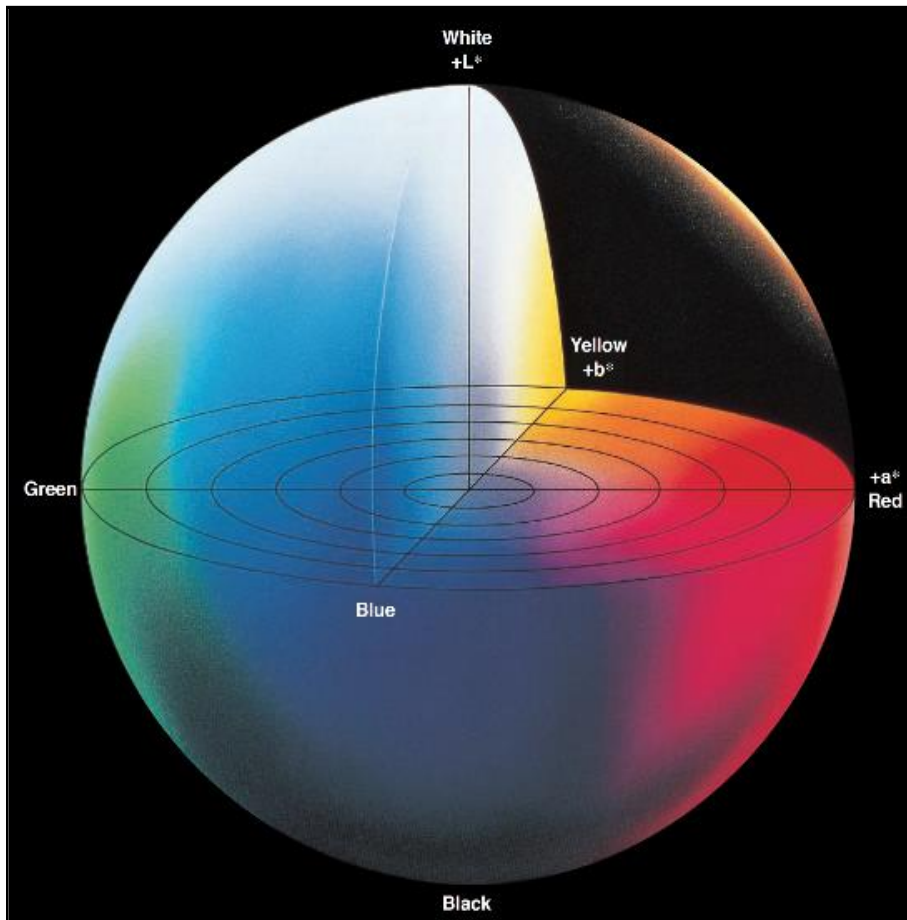
Los sistemas CIE usan tres coordenadas para ubicar un color dentro de un espacio de color, algunos ejemplos de estos espacios incluyen CIE $L^*a^*b^*$ y CIE $L^*C^*h^0$. Son escalas de color basadas en la teoría de los colores opuestos, la cual establece que un color no puede ser verde y rojo a la vez (X-Rite, 2002).

*1.6.2.1. CIELAB ($L^*a^*b^*$)*

El espacio de color $L^*a^*b^*$ (también llamado CIELAB), es uno de los espacios de color uniformes definidos por la CIE en 1976, y actualmente, con mucha popularidad para medir el color de los objetos. En este espacio, L^* indica luminosidad, a^* y b^* son las coordenadas de cromaticidad, véase la Figura 1.23. (Konica Minolta Sensing, Inc., 2007). Para diferenciarlos de otros sistemas (especialmente del sistema Hunter) se adjudicó un asterisco (*) a todos los parámetros utilizados (Datacolor, s.f.).

Figura 1.23.

*Representación del sólido de colores para el espacio $L^*a^*b^*$*



Nota: Konica Minolta Sensing, Inc. (2007).

Según Konica Minolta Sensing, Inc. (2007, p. 18) “en este diagrama, a^* y b^* indican direcciones de colores:

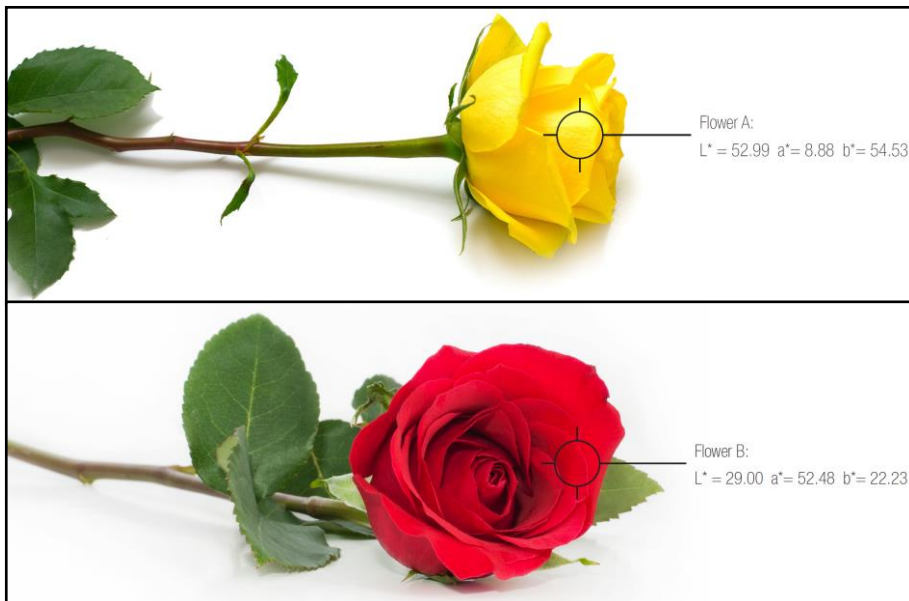
- + a^* es la dirección del rojo,
- a^* es la dirección del verde,
- + b^* es la dirección del amarillo y
- b^* es la dirección del azul”.

El eje L^* también puede denominarse “eje gris neutro” porque posee el negro ($L = 0$) y el blanco ($L = 100$) en los extremos y los tonos grises corresponden a los valores intermedios (Datacolor, s.f.).

Para mostrar cómo la fórmula $L^*a^*b^*$ representa los colores de las flores A y B, se han graficado sus valores en el diagrama de color CIELAB de la Figura 1.24. (X-Rite, 2002).

Figura 1.24.

Valores $L^*a^*b^*$ para las flores A (amarilla) y B (roja)

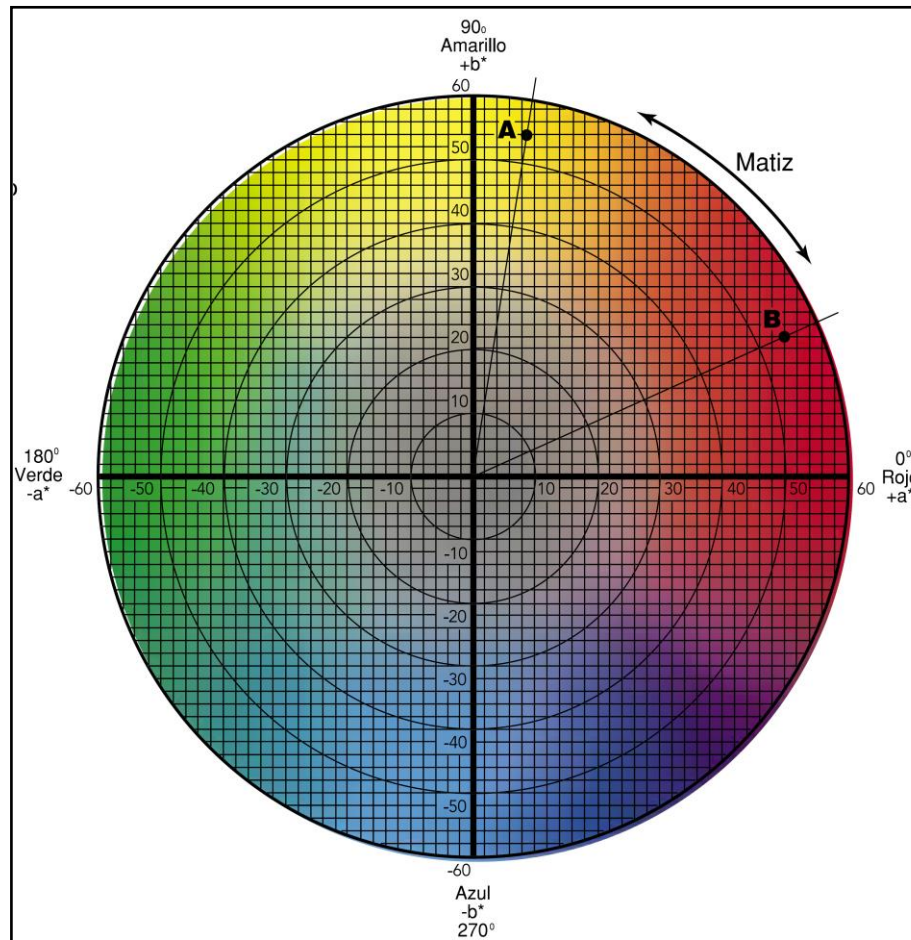


Nota: X-Rite (2016).

La Figura 1.25. muestra la representación bidimensional sobre la gráfica de color CIELAB correspondiente a las flores A y B.

Figura 1.25.

Gráfica de color CIELAB

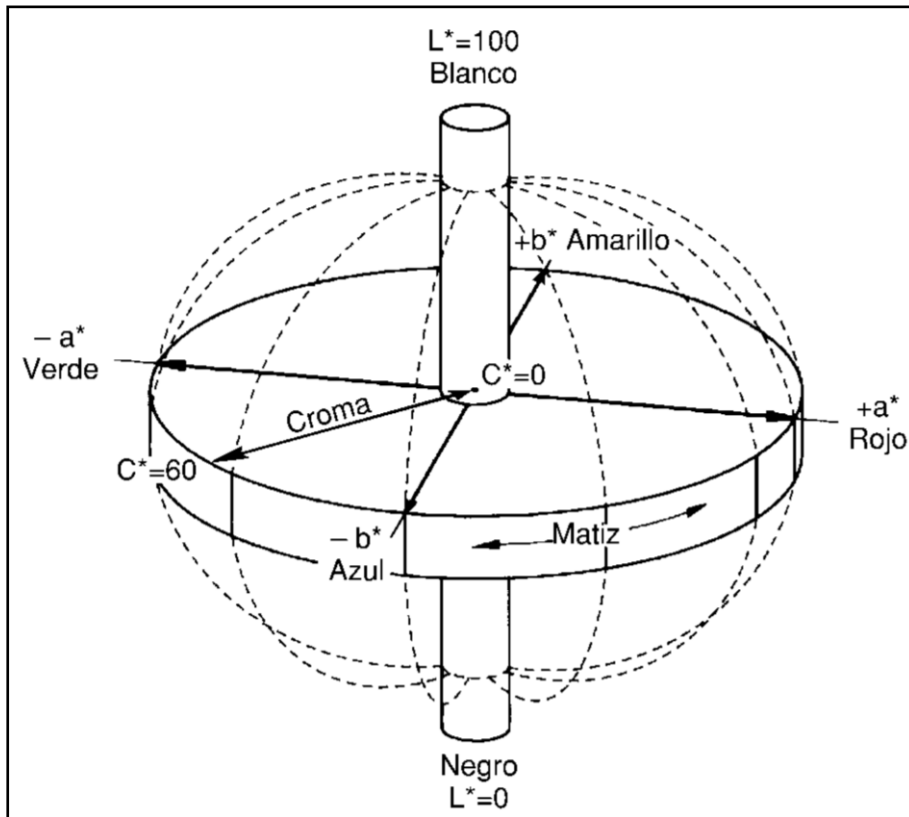


Nota: X-Rite (2002).

Los valores a^* y b^* de las flores A y B intersectan los espacios de color identificados de manera correspondiente como A y B en el gráfico anterior. Estos puntos definen el matiz (color) y croma (apagado/viveza), el color final de cada flor se genera cuando se agregan sus valores L^* (grado de claridad), según puede apreciarse en la Figura 1.26. (X-Rite, 2002).

Figura 1.26.

El valor de L^* se representa en el eje central. Los ejes a^* y b^* aparecen sobre el plano horizontal

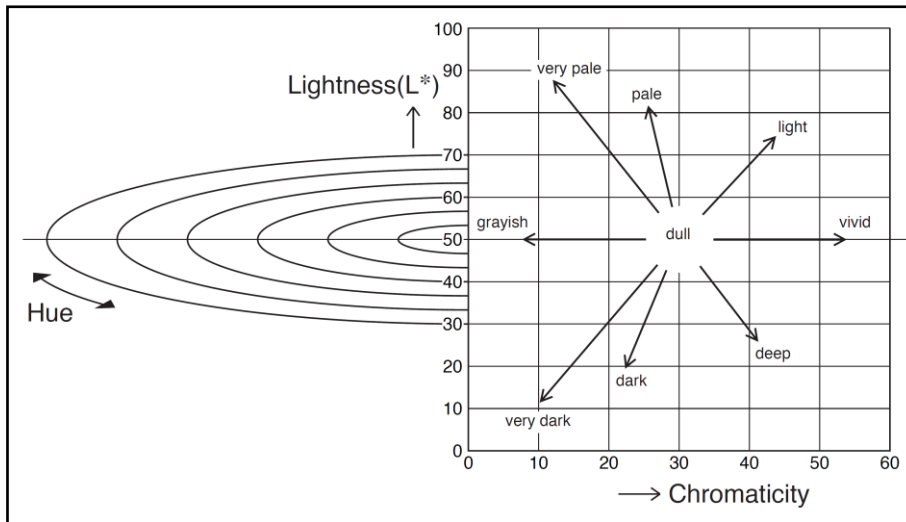


Nota: X-Rite (2002).

Si se corta el sólido de colores de la Figura 1.25. verticalmente a través del punto (A) y el centro, surge una vista de la cromaticidad frente a la luminosidad, parte de la cual se muestra en la Figura 1.27.

Figura 1.27.

Gráfico que muestra la Luminosidad frente la Cromaticidad



Nota: Konica Minolta Sensing, Inc. (2007).

1.6.2.2. CIELCH ($L^*C^*h^\circ$)

Como visto anteriormente, CIELAB utiliza coordenadas cartesianas (rectangulares) para calcular el color; en cambio, CIELCH emplea coordenadas polares (cilíndricas) (X-Rite, 2002).

De acuerdo a Konica Minolta Sensing, Inc. (2007, p. 20) para este espacio de color:

- L^* indica la luminosidad, y es lo mismo que la L^* del espacio de color $L^*a^*b^*$.
- C^* es el croma, es 0 en el centro y aumenta de acuerdo con la distancia respecto al centro.
- h° es el ángulo del tono, se define comenzando en el eje $+a^*$: 0° sería $+a^*$ (rojo), 90° sería $+b^*$ (amarillo), 180° sería $-a^*$ (verde) y 270° sería $-b^*$ (azul).

La Figura 1.28. muestra las fórmulas que permiten calcular el croma y el ángulo de tono, en términos de los valores a^* y b^* .

Figura 1.28.

Fórmulas para calcular el croma y el ángulo del tono

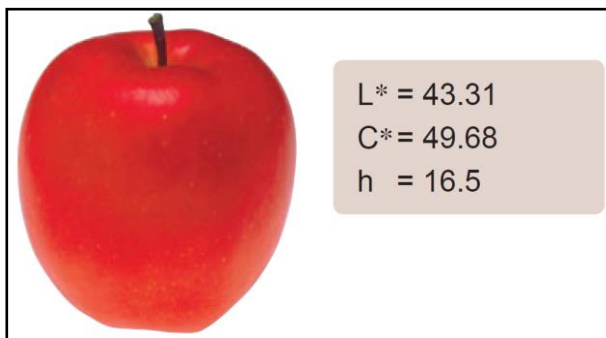
$$\text{Chroma } C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$
$$\text{Hue angle } h_{ab} = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right)$$

Nota: Konica Minolta Sensing, Inc. (2007).

Si se mide el color de la manzana utilizando el espacio de color $L^*C^*h^\circ$, obtendremos los resultados que se presentan en la Figura 1.29.:

Figura 1.29.

*Valores $L^*C^*h^\circ$ para la manzana*

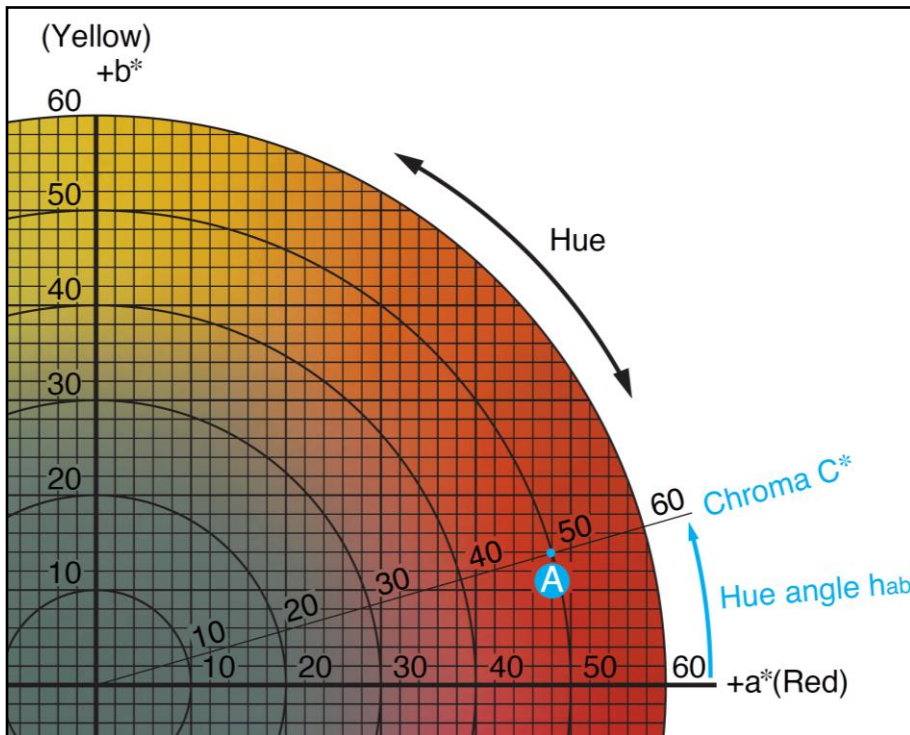


Nota: Konica Minolta Sensing, Inc. (2007).

Si se representan gráficamente estos valores, se obtendrá el punto (A) en la Figura 1.30.

Figura 1.30.

Ubicación del punto A en la gráfica de color CIELAB

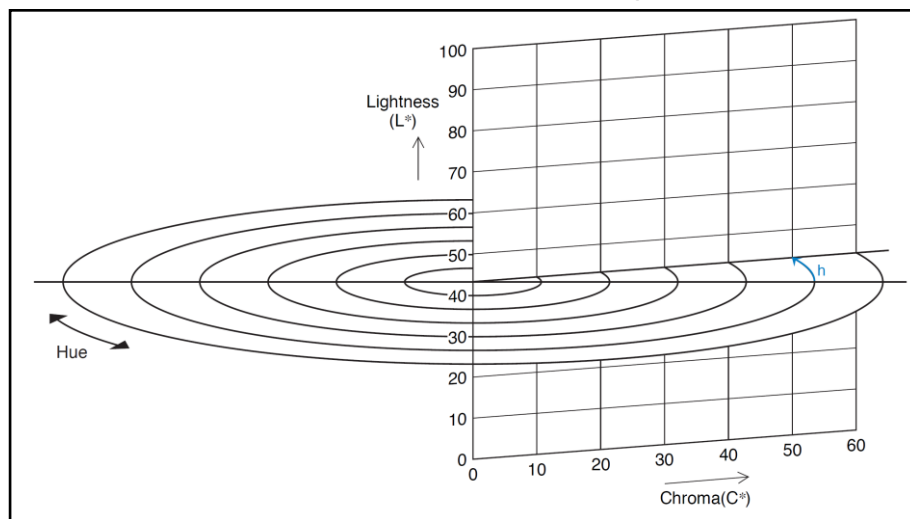


Nota: Konica Minolta Sensing, Inc. (2007).

La Figura 1.31. muestra el gráfico de croma frente a la luminosidad correspondiente al espacio CIELCH.

Figura 1.31.

Vista de Croma frente a la Luminosidad en el espacio CIELCH



Nota: Konica Minolta Sensing, Inc. (2007).

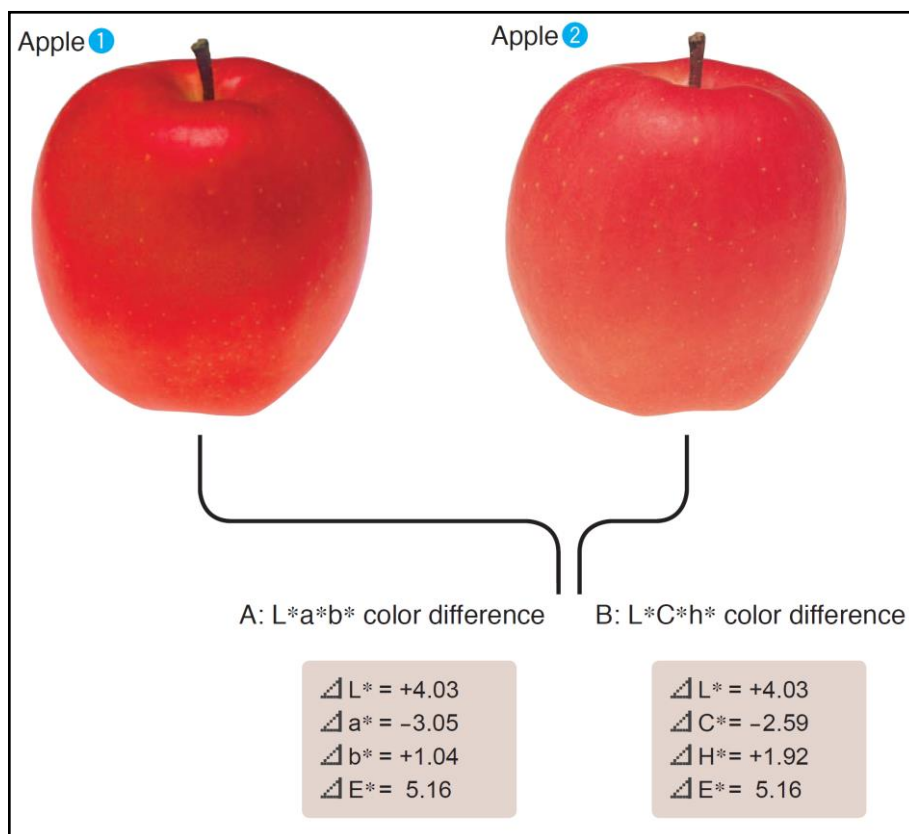
1.6.2.3. Diferencias de color: Delta CIELAB y Delta CIELCH

Normalmente el análisis de color conlleva la igualdad o diferencia de un color al compararlo con una norma establecida. CIELAB y CIELCH son espacios de color empleados para comparar los colores de dos objetos (X-Rite, 2002).

Usando los espacios de color $L^*a^*b^*$ y $L^*C^*h^*$, se analizará la diferencia de color entre dos manzanas. Tomando el color de la manzana 1 ($L^* = 43.31$, $a^* = +47.63$, $b^* = +14.12$) como estándar o patrón, y se mide la diferencia de color de la manzana 2 ($L^* = 47.34$, $a^* = +44.58$, $b^* = +15.16$) con respecto al de la manzana 1, se obtienen los resultados que se muestran en la Figura 1.32. (Konica Minolta Sensing, Inc., 2007).

Figura 1.32.

Diferencia de color entre dos manzanas



Nota: Konica Minolta Sensing, Inc. (2007).

Konica Minolta Sensing, Inc. (2007) enfatiza que en el espacio de color $L^*a^*b^*$, la diferencia de color puede ser expresado como ΔE^*_{ab} , lo cual indica el tamaño de la diferencia de color, pero no así de qué manera son diferentes los colores. ΔE^*_{ab} se define por la siguiente ecuación:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Si se introducen los valores $\Delta L^* = +4.03$, $\Delta a^* = -3.05$ y $\Delta b^* = +1.04$ del escenario A anterior en esta ecuación, se obtiene $\Delta E^*_{ab} = 5.16$. Al medir la diferencia de color entre las dos manzanas usando el espacio de color $L^*C^*h^\circ$, se obtienen los resultados que se muestran en el escenario B arriba (véase la Figura 1.32.). Se nota que el valor de ΔL^* es el mismo que en el espacio de color $L^*a^*b^*$. $\Delta C^* = -2.59$, indica que el color de la manzana 2 está menos saturado. La diferencia de tono entre las dos manzanas, ΔH^* , está definido por la ecuación:

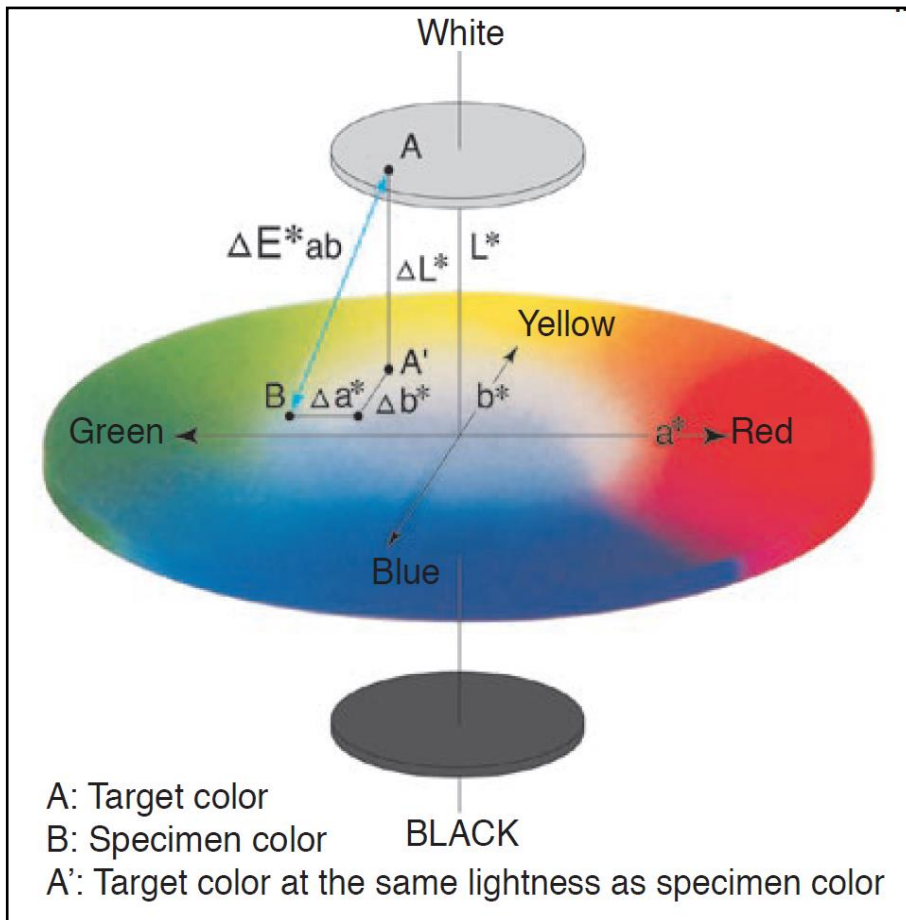
$$\Delta H^*_{ab} = \sqrt{(\Delta E^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*)^2}$$

dando un valor de +1.92, lo que significa que el color de la manzana 2 está más cerca del eje $+b^*$, por lo que es más amarillo (Konica Minolta Sensing, Inc. 2007).

A continuación, en la Figura 1.33., se muestra gráficamente la diferencia de color en el espacio $L^*a^*b^*$ entre una muestra y una referencia.

Figura 1.33.

Diferencia de color entre la muestra y la referencia



Nota: Konica Minolta Sensing, Inc. (2007).

X-Rite (2002, p. 15) brinda la notación del espacio de color CIELAB utilizada:

ΔL^* = diferencia en el valor de claridad/obscuridad

+ = más claro - = más oscuro

Δa^* = diferencia en el eje rojo/verde

+ = más rojo - = más verde

Δb^* = diferencia en el eje amarillo/azul

+ = más amarillo - = más azul

ΔC^* = diferencia en el croma

+ = más brillante - = más opaco

ΔH^0 = diferencia en el matiz

ΔE^* = valor de la diferencia total de color

1.7. Técnicas de medición de color

1.7.1. Colorímetros

Según X-Rite (2002, p. 3) los colorímetros “son dispositivos triestimulares (tres filtros) que usan filtros rojo, verde y azul para emular la respuesta del ojo humano al color y la luz”. Con ellos se comprueba si los valores medidos se encuentran dentro de las tolerancias permitidas, por lo que se utilizan principalmente para el control de calidad (Datacolor, 2019).

Las ventajas de los colorímetros de filtros son el reducido tiempo de medición, facilidad de uso y pocos costes. En contraste con los espectrofotómetros, presentan desventajas en cuanto al reconocimiento del metamerismo o en el cálculo de la composición del color (Datacolor, 2019).

El metamerismo surge cuando el color de dos muestras, con funciones colorimétricas diferentes, es idéntico bajo unas condiciones de observación e iluminación determinadas, pero diferentes cuando se modifica la iluminación, es decir, dos muestras metámeras arrojan un valor triestímulo idéntico bajo un iluminante, pero valores triestímulo distintos bajo otro iluminante (Datacolor, s.f.).

En la Figura 1.34. puede apreciarse un colorímetro comercial en funcionamiento.

Figura 1.34.

Colorímetro



Nota: PCE Instruments (s.f.).

1.7.2. Espectrofotómetros

Los espectrofotómetros analizan la radiación reflejada o transmitida de una muestra para cada longitud de onda en el rango visible del espectro. Entre la muestra y el receptor se encuentra el monocromador, elemento responsable de que los valores de reflexión o transmisión puedan captarse cada 10 nm o 20 nm en el espectro visible. Los espectrofotómetros se manejan con sencillez y rapidez siendo cada vez más ligeros, portátiles y más cerca de los precios de los económicos colorímetros de filtros (Datacolor, 2019).

Un espectrofotómetro puede apreciarse en la Figura 1.35.

Figura 1.35.

Espectrofotómetro



Nota: Datacolor (2021).

1.7.2.1. Geometría de medición

El color de un objeto depende de las condiciones de iluminación y observación, es así como según el ángulo desde el que se observa un objeto se genera una impresión diferente de color. Tanto el ángulo de observación como la dirección de la iluminación deben mantenerse constantes para unas definiciones exactas de color. En un aparato colorimétrico, la geometría de medición se establece según el ángulo (o campo angular) con el que se ilumina la muestra y el ángulo con el que se observa dicha muestra (Datacolor, 2019).

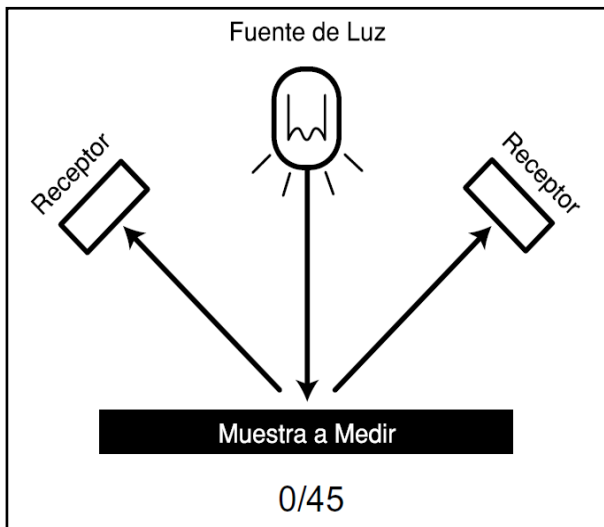
Con los espectrofotómetros se diferencian tres geometrías de medición:

- a. Geometría angular (0/45 o 45/0): iluminan la muestra con un ángulo de 45° y miden la luz reflejada por la muestra en una dirección con 0° (o al revés 0°/45°), véase la Figura 1.36. Esta geometría se utiliza sobre todo para el control del color de productos finales (Datacolor, 2019).

Un instrumento 0/45 elimina el brillo más efectivamente que cualquier otro y medirá la apariencia de la muestra exactamente como lo vería el ojo humano, debido a que un observador hace lo posible para excluir el "componente especular" (brillo) al evaluar un color (X-Rite, 2002).

Figura 1.36.

Geometría angular 0/45



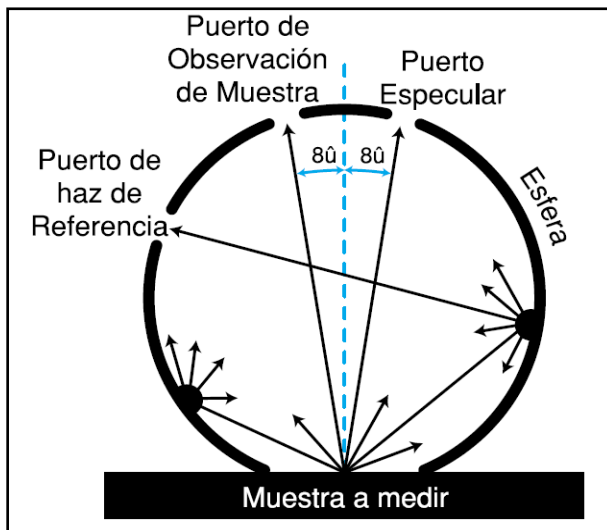
Nota: X-Rite (2002).

- b. Geometría de esfera ($d/8^\circ$): iluminan la muestra de forma difusa y miden la luz que la muestra refleja con un ángulo de 8° con respecto a la perpendicular de la muestra, véase la Figura 1.37. El componente de la luz reflejada especularmente (brillo) se incluye en la medición. En la actualidad, para hacer formulaciones de color prácticamente sólo se utiliza esta geometría (Datacolor, 2019).

Además, constituyen el instrumento de elección cuando la muestra es rugosa, texturizada o posee un brillo parecido a un espejo en la superficie. Fabricantes textiles o de materiales para aislamiento acústico probablemente seleccionarán esta geometría (X-Rite, 2002).

Figura 1.37.

Geometría de esfera

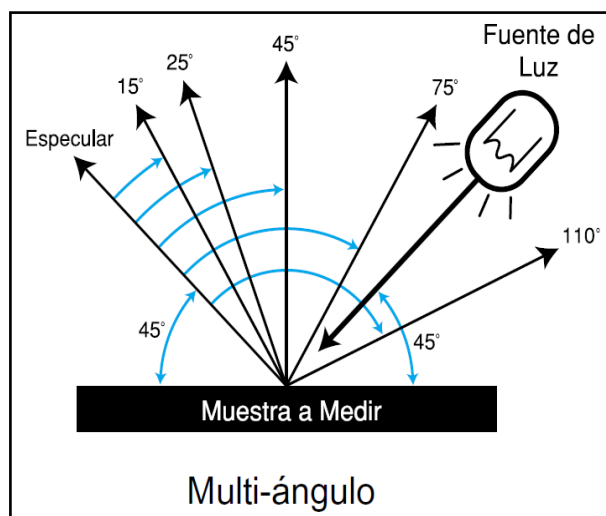


Nota: X-Rite (2002).

c. Geometría multi-ángulo: la iluminación y observación están dirigidas con ángulos variables, véase Figura 1.38. (Datacolor, 2019). En los últimos 10 años, los fabricantes de automóviles han experimentado con colores de efecto especial usando mica, conchas molidas, pigmentos de color microscópicamente recubiertos y pigmentos de interferencia como aditivos especiales, produciendo así diferentes colores cambiando el ángulo de observación (X-Rite, 2002).

Figura 1.38.

Geometría multi-ángulo



Nota: X-Rite (2002).

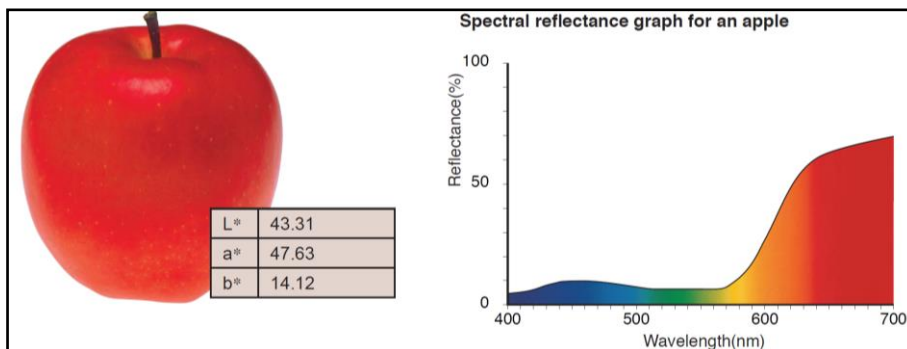
1.7.2.2. Curva de reflectancia espectral

Cada objeto absorbe y refleja la luz en cantidad y en partes del espectro diferentes, generando así los diferentes colores de los objetos (Konica Minolta Sensing, Inc., 2007).

A continuación, en la Figura 1.39., se aprecia el gráfico espectral de una manzana:

Figura 1.39.

Gráfico espectral de una manzana



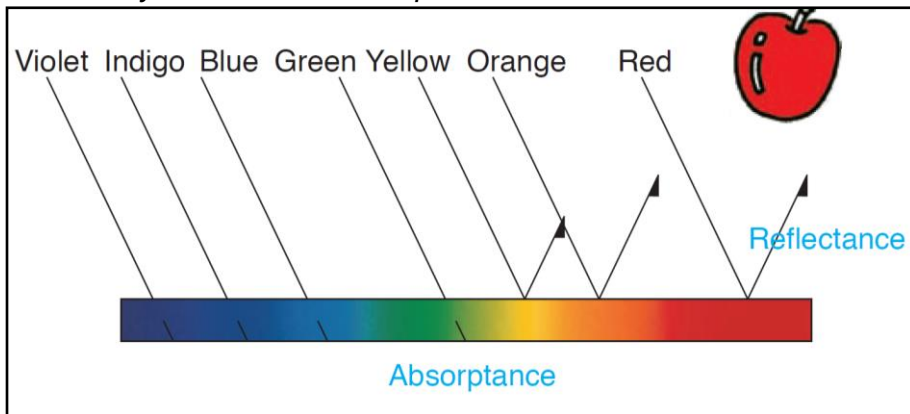
Nota: Konica Minolta Sensing, Inc. (2007).

Para este gráfico, en la región de longitud de onda del rojo, la reflectancia (cantidad de luz reflejada) es alta, pero en las otras regiones de longitud de onda, la reflectancia es baja (Konica Minolta Sensing, Inc., 2007).

En la Figura 1.40., se muestra que la manzana refleja luz en las regiones de longitud de onda del naranja y del rojo y absorbe luz en las regiones de longitud de onda del verde, azul, añil y violeta. Al realizar una medición con el espectrofotómetro y la visualización de los resultados en un gráfico espectral, se puede ver la naturaleza del color de la manzana (Konica Minolta Sensing, Inc., 2007).

Figura 1.40.

Reflexión y absorción de la luz para la manzana

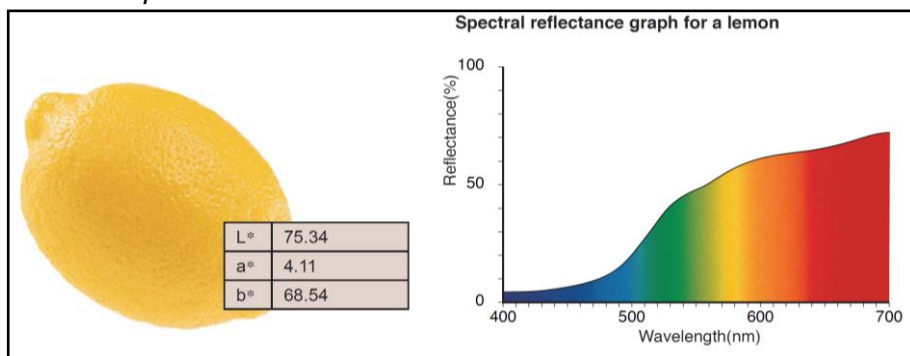


Nota: Konica Minolta Sensing, Inc. (2007).

Al medir un limón, se obtiene el siguiente gráfico espectral de la Figura 1.41.:

Figura 1.41.

Gráfico espectral de un limón



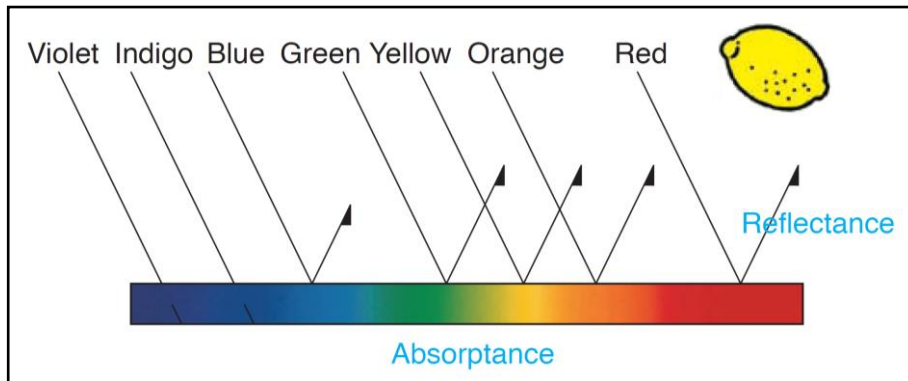
Nota: Konica Minolta Sensing, Inc. (2007).

Se observa que, en las regiones de longitud de onda del rojo y del amarillo, la reflectancia es alta pero que, en las regiones de longitud de onda del añil y el violeta, la reflectancia es baja (Konica Minolta Sensing, Inc., 2007).

En la Figura 1.42., se aprecia que el limón refleja luz en las regiones de longitud de onda del verde, amarillo y rojo y absorbe luz en las regiones de longitud de onda del añil y violeta. Esta extraordinaria precisión no es posible con el ojo humano ni con los colorímetros, únicamente con un espectrofotómetro (Konica Minolta Sensing, Inc., 2007).

Figura 1.42.

Reflexión y absorción de la luz para el limón



Nota: Konica Minolta Sensing, Inc. (2007).

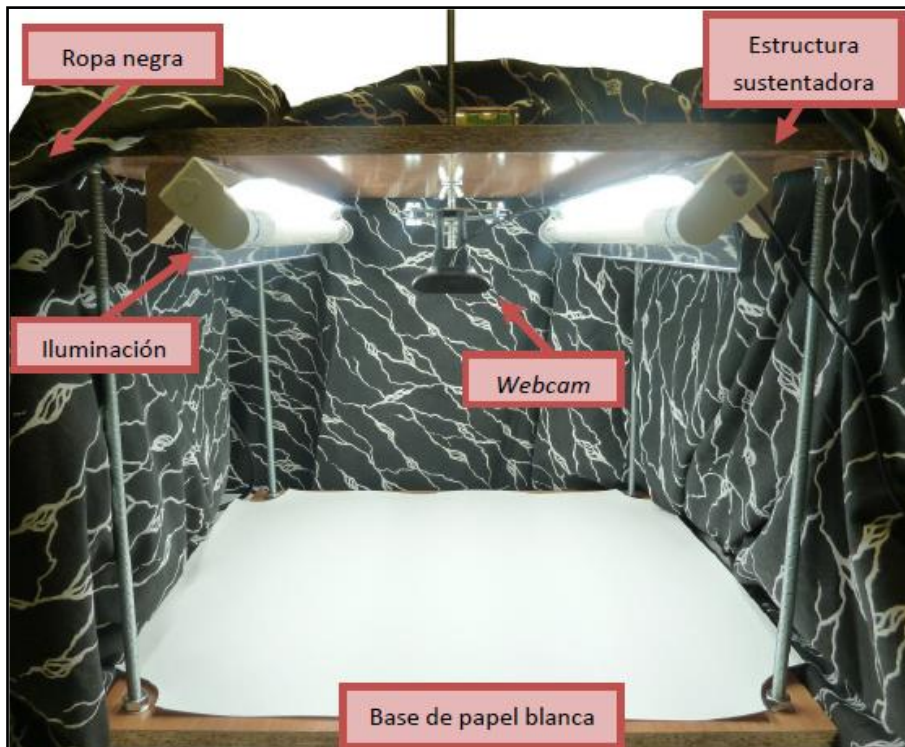
1.7.3. Sistemas de visión computarizada (SVC)

La visión digital es una nueva tecnología en la cual, por medio de cámaras digitales o escáneres, se generan imágenes que son procesadas y analizadas en computadoras, usando un software especial, de modo análogo a lo que hace el ojo y el cerebro humano. La visión digital ha tenido una gran aplicación en la industria alimentaria en los sistemas de aseguramiento de calidad, por su carácter no invasivo y la posibilidad de automatización de los procesos en línea, para el análisis de la calidad de la carne, pescado, pizza, queso y pan, así como su potencial para la inspección y clasificación de frutas y verduras (Aguilera, 2011; Figura y Teixeira, 2007; Brosnan y Sun, 2004, citado por Mathias-Rettig y Ah-Hen, 2014).

En la Figura 1.43. se muestra uno de los componentes para la captura de las imágenes en el sistema de visión computarizada.

Figura 1.43.

Propuesta de una estructura para un sistema de captación de imágenes



Nota: López (2017).

CAPÍTULO 2: LOS COLORANTES

Este capítulo pretende informar sobre colorantes y pigmentos, diferencias, clasificación y ejemplos. Se profundiza en el abordaje del colorante FD&C Rojo No. 40 como representante de los azocompuestos, y el FD&C Azul No. 1 como parte del grupo trifenilmetano ya que fueron utilizados en la investigación. Se muestra el origen y efecto de la contaminación de los cuerpos de agua por colorantes y para finalizar se analizan las tecnologías existentes para la remoción o destrucción de este tipo de compuestos presentes en las aguas residuales.

2.1. Introducción

Se producen unas 700 toneladas/año de pigmentos tanto naturales como sintéticos. El mercado mundial de pigmentos sintéticos reporta ventas de 400 millones de dólares/año, de los cuales el 50 % se dirige a la industria textil y 25 % a la industria alimentaria (Badui, 2013, citado por Yslas, 2018).

Tradicionalmente, los colorantes eran aquellos cuyos cromógenos eran compuestos orgánicos y pigmentos se designaban a las sustancias coloreadas inorgánicas (Marcano, 2018).

Actualmente, se identifican a los pigmentos como orgánicos e inorgánicos. Los pigmentos y los colorantes difieren en sus características de solubilidad y métodos de aplicación; en este sentido, un pigmento es insoluble en la mayoría de los solventes y se utilizan como dispersión en un vehículo sin combinarse con él (por ejemplo las tintas y los barnices) o en algunos casos el sustrato a teñir puede servir de vehículo (coloración de la masa de polímeros o de alimentos), mientras que un colorante es soluble en agua y en solventes hidroxílicos (alcohol, propilenglicol, glicerina) o en solventes lipofílicos (menos frecuente) y se emplean como una disolución (Marcano, 2018).

De acuerdo a Téllez (2010, p. 5) los colorantes “son sustancias que añadidas a otras les proporcionan, refuerzan o varían el color”. Un colorante “posee una estructura en anillo aromático acoplada con una cadena lateral, estas estructuras de resonancia son las responsables del color”. (Diccionario enciclopédico Quillet, 1973, citado por Salcedo, 2009, p. 39)

Según el Diccionario enciclopédico Quillet (1973, citado por Salcedo, 2009) la síntesis de colorantes orgánicos requiere:

- Un cromógeno incoloro, que es la estructura aromática compuesta de anillos de benceno, antraceno o naftaleno.
- Un grupo cromóforo, que es un átomo o radical portador del color que permite la clasificación química de colorantes cuando se acoplan con el cromógeno, representado por los siguientes radicales: azo (-N=N-), carbonilo (=C=O), carbón (=C=C=), carbón-nitrógeno (>C=NH o -CH=N-), nitroso (-NO o =N-OH), nitro (-NO₂ o =NO-OH) y sulfuro (>C=S y otros grupos carbón-azufre).
- Un auxocromo, que es un grupo de afinidad que imparte solubilidad y adherencia del colorante a la fibra ayudando así a la estructura cromógeno-cromóforo, importante para la clasificación de los colorantes por su uso. Puede ser básico como el amino (-NH₂), los amino sustituidos (-NHR, -NR₂) y el fenólico (-OH), o ácidos como el carboxilo (-COOH) y los radicales sulfónicos (-SO₃H) o sus derivados.

Según Marcano (2018, p. 28-29) las materias colorantes pueden agruparse según sus usos para:

- a. Cerámicas y vidrios.
- b. Alimentos, drogas y cosméticos.
- c. Plásticos.
- d. Pinturas y barnices.
- e. Textiles y otras fibras.
- f. Fotografía y sensibilizadores fotográficos.
- g. Tintas tipográficas.
- h. Abrillantadores y fluorescentes, etc.

Téllez (2010, p. 5-6) clasifica los colorantes, según su origen, en:

- a. Colorantes inorgánicos: aquellos constituidos por compuestos inorgánicos encontrados en la naturaleza. Los mismos se pueden modificar por métodos físicos como la pulverización o la desecación, (arcillas coloreadas por óxidos metálicos), mientras que otros son productos de fabricación industrial. Se clasifican en:
 - Naturales: son óxidos metálicos de amplio uso en cerámica y pintura.
 - Sintéticos: son sales de metales como hierro, cobre, cromo y mercurio, utilizados en la coloración de tejidos, cerámica, esmaltes, papeles y otros.

b. Colorantes orgánicos, que a su vez se pueden clasificar en:

- Naturales: de origen animal, como la púrpura proveniente de caracoles marinos y el rojo grana (ácido carmínico) proveniente de la cochinilla (*Coccus cacti* L.). De origen vegetal, como los colorantes presentes en casi todas las plantas del mundo.
- Sintéticos: obtenidos generalmente por la destilación del alquitrán de hulla, se clasifican de acuerdo al grupo funcional que contiene su molécula. Los más ampliamente usados son los azo-colorantes.

Según Cubero et al. (2002, citado por Hernández, 2012) algunas características de los colorantes naturales son:

- Tienen un menor poder de tinción en comparación a los colorantes sintéticos, necesitándose mayores dosis de aplicación con el aumento de costo asociado.
- Son más inestables a diferentes condiciones de pH, temperatura y humedad.
- No ofrecen tanta uniformidad en el color como los sintéticos.
- Se degradan más fácilmente en contacto con el producto y con el medio ambiente.

Para Téllez (2010) los colorantes sintéticos son muy utilizados, debido a que presentan propiedades como:

- Color persistente.
- Colores variados y uniformes.
- Colores preparados según la intensidad deseada.
- Alta pureza y bajo costo.
- Se pueden obtener en grandes cantidades.

Las presentaciones de los colorantes artificiales hidrosolubles pueden ser:

- Polvo: es la presentación más común en el mercado. Se utilizan en la mayor parte de las aplicaciones pero sobre todo cuando se hacen preparaciones secas de colorantes con otros ingredientes para lograr una coloración uniforme en el producto. Entre los inconvenientes se encuentran la higroscopicidad y la facilidad de contaminación, debido a que cualquier corriente de aire puede arrastrar el colorante y este se adhiere a las superficies (Aditives & Colors, 2018).
- Líquido: tienen la característica de estar diluidos en agua y poseer conservantes para su preservación. Estos presentan la ventaja de evitar que se propicie contaminación en las

superficies donde se manipulan los colorantes al momento de utilizarlos y de ahorrarse el proceso de pesado y dilución. Es de destacar que los colorantes en polvo siguen siendo la mejor opción por su mayor costo-beneficio que los colorantes líquidos ya que no necesitan conservante ni la preparación en un solvente. Además, el almacenamiento de los colorantes en líquido es más complicado por el espacio que se necesita para los recipientes que los contienen, en cambio para los colorantes en polvo bastan unas cajas o sacos (Aditives & Colors, 2018).

- Granular: estos colorantes tienen un tamaño de partícula muy superior en relación a los colorantes en polvo y esto ayuda a evitar el espolvoreado al manipular los colorantes en polvo, sin embargo su costo es más elevado y su tiempo de dilución en el agua es más lento, causando problemas en la homogeneidad en la aplicación final del color, para los colorantes en polvo es mucho más fácil de conseguir y su tiempo de dilución es más corto (Aditives & Colors, 2018).

El Índice de Color (*Color Index*, C.I.), publicado por la *Society of Dyers and Colourists* del Reino Unido y la *American Association of Textile Chemists and Colorists* (AATC) de los Estados Unidos de América, nombra a cada colorante de acuerdo a un número que identifica el grupo químico al que pertenece, seguido por su tipo y color, según se aprecia en la Tabla 2.1. (Salcedo, 2009).

Tabla 2.1.

Clases de colorantes sintéticos según el Índice de color (C.I.)

Código	Clase Química	Código	Clase Química
10,000	Nitroso	49,000	Tiazol
10,300	Nitro	49,400	Indamina/Indofenol
11,000	Monoazo	50,000	Azina
20,000	Disazo	51,000	Oxazina
30,000	Trisazo	52,000	Tiazina
35,000	Poliazo	53,000	Sulfuro
37,000	Azoico	55,000	Lactona
40,000	Stilbeno	56,000	Aminocetona
40,800	Carotenoide	57,000	Hidroxicetona
41,000	Difemilmetano	58,000	Antraquinona
42,000	Triarilmetano	73,000	Indigoide
45,000	Xanteno	74,000	Ftalocianina
46,000	Acridina	75,000	Natural
47,000	Quinolina	76, 000	Base de Oxidación
48,000	Metina	77,000	Inorgánico

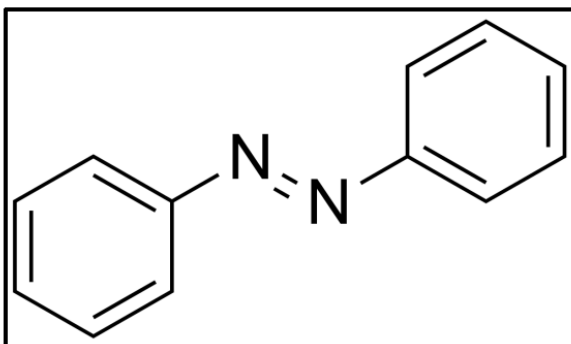
Nota: Salcedo (2009)

2.2. Colorantes azoicos

Los colorantes del grupo azo denominados también azoderivados, compuestos azoicos o azocompuestos, tienen como cromóforo principal el grupo azo ($-N=N-$), consiste en un doble enlace de nitrógeno conjugado con anillos aromáticos a los extremos, véase la Figura 2.1. (Océano, 2002, citado por González y Ladino, 2018).

Figura 2.1.

Estructura del grupo azo



Nota: Sánchez (2013, citado por González. y Ladino, 2018)

Presentan una gama de colores que van desde el rojo, anaranjado y amarillo. Además del grupo $N=N$, pueden contener grupo básico ($-NH_2$), grupo ácido (ácido sulfónico) o ambos como grupos auxocromos (Macy, 1992, citado por Zambrano, 2018).

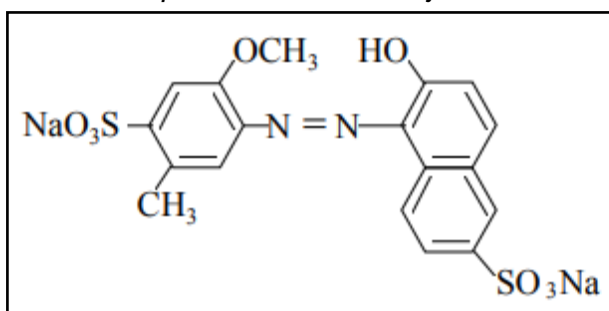
Debido a la facilidad en su síntesis y versatilidad son los más importantes, por lo que casi la mitad de los colorantes sintéticos pertenecen a este grupo (Marcano, 2018).

2.2.1. FD&C Rojo No. 40

El colorante rojo 40 o rojo allura es un colorante sintético, azoderivado, en forma de polvo rojizo oscuro muy soluble en agua, consiste de 6-hidroxi-5-(2-metoxi-5-metil-4-sulfonato-fenilazo)-2-naftalenosulfonatodisódico (Sánchez, 2013, citado por González y Ladino, 2018). En la Figura 2.2., puede apreciarse la estructura química del colorante.

Figura 2.2.

Estructura química de FD&C Rojo No. 40



Nota: Sensient (2002, citado por González y Ladino, 2018)

A continuación, en la Tabla 2.2. se reflejan datos importantes con respecto al colorante:

Tabla 2.2.

Características del colorante FD&C Rojo No. 40

Código FDA	74.2340
Número E	E129
Nombre común	FD&C Rojo No. 40
Color Index	16035
Nombre comercial	Allura (R) Allura Rojo AC C.I. Food Red 17 FD&C Rojo No. 40
Número CAS	25956-17-6
Fórmula empírica	C ₂₂ H ₁₄ N ₂ O ₈ S ₂ Na ₂
Peso molecular	496
Clasificación química	Monoazo
Proceso de manufactura	Copulación y diazotización del ácido 5-amino-4-metoxi-2-toluensulfónico, con el ácido 6-hidroxi-2-naftalensulfónico.
Color	Rojo
Tono	Rojo amarillento
Espectro de color	
Longitud de máxima absorción	504 nm
Descripción física	Polvo rojo fuerte inodoro
Presentación	Polvo / líquido y granular
Solubilidad en agua	Soluble
Solubilidad en etanol	Soluble
Solubilidad en aceite mineral	Insoluble
pH mínimo	3
pH máximo	8
Estabilidad a la luz	Sí
Estabilidad a agentes reductores	Estable
Estabilidad a agentes oxidantes	Inestable
Concentración	85 % mín.

Año de aprobación	1975
-------------------	------

Nota: Adaptado de SINCO (s.f.) y de Aditives & Colors (2018).

Este colorante es empleado como aditivo en alimentos como yogures, gelatinas, postres, helados, dulces, algodón de azúcar, mermeladas, bebidas, salsas y productos cárnicos; también es empleado en productos de perfumería, belleza y como tinta para tatuajes (Sensient, 2002, citado por González y Ladino, 2018).

Entre los efectos colaterales por su ingesta, puede intensificar los síntomas del asma al ser un liberador de histamina. Está asociado con el desarrollo de hiperactividad en niños cuando es utilizado en combinación con los benzoatos. Cuando está presente en altas concentraciones, uno de sus productos de degradación causa cáncer de vejiga en los animales (Sanders, 2012, citado por Letona, 2014).

2.3. Colorantes diaril y triaril metano

Estos colorantes derivan del metano, en los cuales los átomos de hidrógeno se sustituyen por anillos arilo, llamados también fenilo, por lo que se conocen como colorantes fenilmetano, cabe destacar que los colorantes triarilmetano son de uso común (Stainsfile, 2005, citado por Salcedo, 2009).

Son sustancias complejas, con mayor resistencia a la oxidación química y son decolorados al exponerse a radiaciones ultravioleta. Se dividen en: colorantes básicos (-NH₂) y colorantes ácidos (grupos de ácido sulfónico) (Zambrano, 2018).

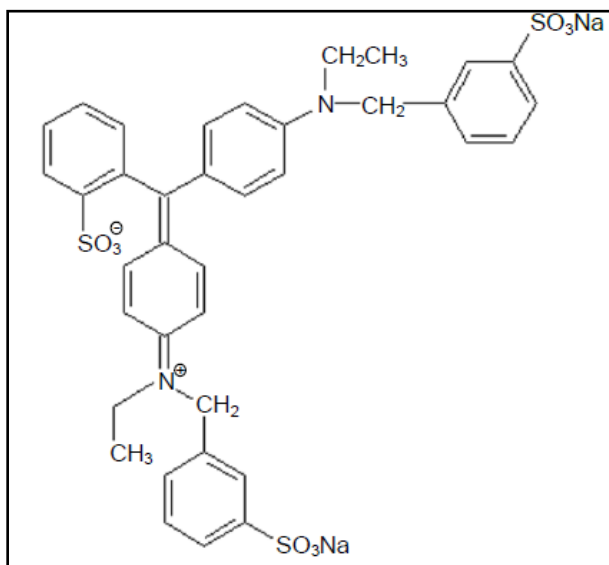
2.3.1. FD&C Azul No. 1

El colorante azul 1 o azul brillante FCF, químicamente es el α -(4-(N-etil-3-sulfonatobencilamino)-fenil)- α -(4-N-etil-3-sulfonatobencilamino)-ciclohexa-2,5-dienilideno)-tolueno-2-sulfonatodisódico (Flury y Flühler, 1994; Sigma Aldrich, 2012, citado por Hernández, 2012).

La Figura 2.3. muestra la estructura química del colorante.

Figura 2.3.

Estructura química del FD&C Azul No. 1



Nota: Hernández (2012).

A continuación, la Tabla 2.3. describe algunos datos relevantes del colorante:

Tabla 2.3.

Características del colorante FD&C Azul No. 1

Código FDA	74.1101
Número E	E133
Nombre común	FD&C Azul No. 1
Color Index	42090
Nombre comercial	Azul Brillante Ariavit Azul Azul Patente AC C.I. Food Blue 2 FD&C Azul No. 1
Número CAS	2650-18-2
Fórmula empírica	C ₃₇ H ₃₄ N ₂ O ₉ S ₂ Na ₃
Peso molecular	792
Clasificación química	Trifenilmetano
Proceso de manufactura	Condensación del ácido benzaldehído-o-sulfónico con el ácido alfa-(n-etilanilino)meta toluensulfónico (benciletilanilina sulfónica).
Color	Azul
Tono	Azul verdoso
Espectro de color	
Longitud de máxima absorción	630 nm
Descripción física	Polvo azul verdoso inodoro
Presentación	Polvo / líquido y granular
Solubilidad en agua	Soluble

Solubilidad en etanol	Soluble
Solubilidad en aceite mineral	Insoluble
pH mínimo	3
pH máximo	7
Estabilidad a la luz	Sí
Estabilidad a agentes reductores	Inestable
Estabilidad a agentes oxidantes	Inestable
Concentración	85 % mín.
Año de aprobación	1969

Nota: Adaptado de SINCO (s.f.) y de Aditives & Colors (2018).

En líneas generales, (Flury y Flühler, 1994; SINCO, 2012, citado por Hernández, 2012) destacan que el azul 1 es producido para dos fines:

- Grado industrial: para tinción de productos cosméticos y de higiene personal (jabones, shampoo), para tinción de papel, telas, cuero, entre otros.
- Grado alimenticio: como aditivo en la industria de productos lácteos, repostería y de confitería, bebidas gaseosas y medicamentos, también es utilizado para producir el color verde en combinación con el amarillo 4.

Raramente ocurren efectos colaterales en las concentraciones utilizadas en los alimentos, se han reportado algunos casos de reacciones alérgicas. También se ha descrito coloración azulada de la piel, inicialmente atribuida a cianosis, en niños expuestos a grandes cantidades de este colorante en la alimentación enteral (Sanders, 2012; Sweetman, 2008, citado por Letona, 2014).

2.4. Contaminación del agua por colorantes.

A nivel industrial, los colorantes sintéticos resultan atractivos debido a sus propiedades únicas como generación de tonos brillantes, bajo costo de producción, buena solubilidad; resistencia a la luz solar, al contacto con el agua y al ataque de una variedad de compuestos químicos (Saratale et al., 2011; Soon y Hameed, 2011, citado por Barrios-Ziolo et al., 2015).

Comercialmente existen más de 100000 variedades de estos colorantes y se ha estimado una producción de 7×10^5 a 1×10^6 toneladas anualmente. Asimismo, se ha reportado que, en su proceso de producción y en las aplicaciones industriales, el 10-15 % es vertido al ambiente sin tratamiento (Aksu et al., 2008, citado por Figueroa et al., 2015).

Según declara Saratale et al. (2011, citado por Barrios-Ziolo et al., 2015, p. 119) “el grupo de colorantes sintéticos más utilizados en el mundo, el tipo azo, representa el 70 % de los colorantes encontrados en las aguas residuales municipales”.

En la Tabla 2.4. se compara el porcentaje de contaminación que aporta cada uno de estos sectores productivos, destacando que la industria de la alimentación, textil y de pulpa y papel son las que más contribuyen a la contaminación del agua. Estas cifras corresponden a países de rentas bajas y medias ubicados en Asia, América Latina, Medio Oriente, Norte de África y el Caribe (ONUUDI, 2003, citado por Aucancela, 2018).

Tabla 2.4.

Contribución de los principales sectores industriales a la contaminación del agua a nivel mundial

Industria	Porcentaje de contaminación (%)
Alimentación	54,0
Textiles	14,6
Pulpa y papel	10,1
Productos químicos	7,2
Metales	6,7
Madera	5,0

Nota: ONUUDI (2003, citado por Aucancela, 2018).

Es preocupante la contaminación del agua por descargas de colorantes y tintes, debido a las actividades industriales de índole textil, papel, cosméticos y alimentaria. Se puede destacar que para la fabricación de los colorantes se emplean como materias primas algunas sustancias carcinogénicas o mutagénicas, por ejemplo, la bencidina, sustancia altamente tóxica y con la cual se sintetizan muchos de los colorantes de tipo aromático (Mittal et al., 2007; Kannan y Sundaram, 2001; De Campos y Marin, 2013, citado por Valladares-Cisneros et al., 2017).

Lata et al. (2007, citado por Rosas, 2012, p. 2) indican que:

El grado de toxicidad de una sustancia puede ser evaluada en términos de la dosis letal 50 (DL50), es decir, la dosis a la cual fallece el 50 % de una población determinada. En un estudio realizado por la ETAD (*Ecological and Toxicological Association of the Dyestuff*) se encontró que más del 90 % de aproximadamente 4000 colorantes presentaban una DL50 superior a 200 mgkg⁻¹ y las mayores tasas de toxicidad fueron encontradas entre los colorantes básicos y diazo.

“Las bajas concentraciones de colorantes y pigmentos en el agua, disminuyen gradualmente la penetración de la luz con efectos significativos sobre la flora acuática, generando así una reducción de la actividad fotosintética y del oxígeno disuelto”. (Hosseini et al., 2013; Pandey et al., 2007, citado por Barrios-Ziolo et al., 2015, p. 119)

2.5. Tratamientos para la remoción o destrucción de colorantes en aguas residuales.

Actualmente, los tratamientos químicos y físicos son muy estudiados por su mayor porcentaje de remoción de color y contenido orgánico (99 % y más del 60 %, respectivamente), pero son más costosos que los procesos biológicos, siendo estos últimos más amigables con el medio ambiente (Yslas, 2018).

El impacto ambiental producido por estas sustancias tóxicas ha promovido el desarrollo de métodos para el tratamiento de los efluentes industriales, tales como la precipitación, óxido-reducción, intercambio iónico, filtración, tecnologías de membrana, etc. Sin embargo, son métodos costosos, además de la generación, disposición y almacenamiento de lodos y desechos derivados de estos procesos, convirtiéndolo así en un problema mayor a resolver (Sala et al., 2010, citado por Aucancela, 2018).

2.5.1. Físicos

Son procesos donde únicamente hay cambio físico, resultando los mismos productos, sin cambio en la composición química de ninguna sustancia (Ecured, s.f., citado por Yslas, 2018).

2.5.1.1. Adsorción

Consiste en el proceso, mediante el cual, ciertos sólidos porosos ligan a sus superficies una gran cantidad de moléculas provenientes de un fluido. Se usa para remover impurezas a baja concentración, componentes orgánicos de las aguas potables y residuales, impurezas coloreadas de soluciones de azúcar y de aceites vegetales, así como agua presente en líquidos orgánicos (Smith et al., s.f., citado por Yslas, 2018).

Residuos agroindustriales de bajo costo como palma de aceite, aserrín, bambú, hojas de pino, hasta minerales como lignito, carbón activado, etc. han sido reportados en la

literatura como materiales adsorbentes con los mejores porcentajes de remoción de color (Cai et al., 2009; Momenzadeh et al., 2011, citado por Barrios-Ziolo et al., 2015).

Según Forgacs et al. (2004, citado por Yslas, 2018, p. 33), se presentan:

Ventajas:

- Generan efluentes de alta calidad.
- Aplicable a diferentes colorantes (ácidos, básicos, reactivos).
- Posibilidad de reutilización del agua dentro del proceso.
- Capacidad de tratamiento del orden de cientos de m³/d.

Desventajas:

- Son procesos lentos; no selectivos, de manera que hay una competición entre las moléculas del colorante y otros compuestos presentes en el efluente.
- La desorción es un proceso muy difícil y costoso. Los adsorbentes suelen ser caros y en ocasiones requieren un proceso de activación previo.
- Tránsferencia del colorante de una fase fluida a una fase estacionaria.

2.5.1.2. Intercambio iónico

El intercambio iónico no se ha utilizado ampliamente para el tratamiento de los efluentes que contienen colorantes, principalmente debido a la opinión de que los intercambiadores iónicos no pueden acomodarse a una amplia gama de tintes. Las aguas residuales a tratar se pasan sobre la resina de intercambio iónico hasta que los sitios de intercambio disponibles están saturados, tintes catiónicos y aniónicos se pueden eliminar de esta manera. Las ventajas de este método incluyen la no pérdida de adsorbente en la regeneración, recuperación del disolvente después del uso y la eliminación de colorantes solubles; su mayor desventaja es el costo (Slokar y Le Marechal, 1997; Mishra y Tripathy, 1993, citado por Robinson et al., 2001).

2.5.1.3. Irradiación

Este tratamiento requiere grandes cantidades de oxígeno disuelto para que las sustancias orgánicas sean degradadas por la radiación, el oxígeno disuelto se consume rápidamente, siendo costosa su aplicación. Pueden utilizarse rayos gamma, haz de

electrones o catalizador (TiO_2) y son capaces de eliminar una amplia gama de contaminantes (Anjaneyulu, 2005, citado por Zambrano, 2018).

2.5.1.4. Filtración de membrana

Este tratamiento permite aclarar, concentrar y separar de forma continua los colorantes del efluente. El problema radica en la eliminación del residuo concentrado que puede implicar alto costo de mantenimiento o cambio de membrana por su obstrucción (Zambrano, 2018).

2.5.2. Químicos

Los procesos químicos son operaciones que derivan en la modificación de una sustancia, es decir, implican el desarrollo de reacciones químicas (Definición.de, s.f., citado por Yslas, 2018).

A continuación, se presentan dos métodos químicos relevantes de aplicación industrial para tratar efluentes contaminados por colorantes.

2.5.2.1 Oxidación química

Raghavacharya (1997, citado por Zambrano, 2018, p. 17) enfatiza que “es el método más utilizado en los procesos de decoloración química, debido a su simple aplicación”.

Metcalf y Eddy (2003, citado por Yslas, 2018, p. 29) declara que:

Este método utiliza principalmente agentes oxidantes tales como el ozono (O_3), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), permanganato (MnO_4), Cloro (Cl), entre otros.

Ventajas:

- Tiempos de reacción bajos.
- Posibilidad de combinación con procesos de oxidación avanzada.
- Aprovechamiento de las sales presentes en el influente.

Desventajas:

- Generación de efluentes más tóxicos.
- Costos elevados de materias primas.

2.5.2.2. *Coagulación y precipitación*

Las sales metálicas hidrolizadas de hierro y aluminio son comúnmente utilizadas como coagulantes formadores de agregados en aguas residuales, capaces de eliminar colorantes y otros compuestos suspendidos. Entre algunas de las limitaciones del proceso están el costo elevado de los productos químicos utilizados en la precipitación, ajuste de pH, la eliminación de lodos y la alta concentración de cationes en el sobrenadante, a pesar de que el tiempo de retención es relativamente corto (Zambrano, 2018).

2.5.3. **Biológicos.**

Son procesos que ocurren naturalmente en los seres vivos y que infieren de alguna manera en el entorno y en ellos mismos (Yslas, 2018).

2.5.3.1. *Aerobios*

De carácter general, los tratamientos aerobios con bacterias en sistemas convencionales, no son capaces de degradar colorantes procedentes de efluentes textiles. Sin embargo, se ha conseguido aislar cepas de bacterias capaces de degradar algunos de ellos (McMullan et al., 2001, citado por Yslas, 2018).

McMullan et al. (2001, citado por Yslas, 2018, p. 34) indican que presentan:

Ventajas:

- Económicos y con una infraestructura disponible en algunos casos.
- Capacidad de tratamiento del orden de m³/d.
- Impacto ambiental bajo.

Desventajas:

- El mecanismo primario de remoción es la adsorción sobre la pared celular.
- La reducción de la DQO no está correlacionada con la decoloración del efluente.
- Altos tiempos de retención hidráulica.
- Inhibición por compuestos recalcitrantes.

2.5.3.2. Anaerobios

Este proceso ha sido empleado en gran medida para el tratamiento de colorantes ya que ha demostrado una gran eficiencia de decoloración. Debe tomarse en cuenta que el tipo de reactor, el tiempo de retención hidráulica, el origen y la estrategia de aclimatación del inóculo, la presencia de mediadores redox y el tipo y la concentración del cosustrato juegan un papel importante en la decoloración (Delee et al., 1998, citado por Yslas, 2018).

Delee et al. (1998, citado por Yslas, 2018, p. 34-35), describen:

Ventajas:

- Posibilidad de aplicación de mediadores redox para mejorar tanto el porcentaje como la velocidad de decoloración.
- Factibilidad de bio-aumentación de los cultivos.

Desventajas:

- Generación de subproductos tóxicos.
- Bajas remociones de materia orgánica expresada como DQO.
- Requerimiento de cepas específicas.
- Largos periodos de aclimatación.
- Los colorantes y otros compuestos refractarios no se mineralizan.
- Los micronutrientes presentes en las aguas residuales como N y P no se remueven mediante este sistema.
- Los sulfatos dan lugar a sulfuros.

2.5.4. Acoplados

Los tratamientos acoplados, resultantes de la combinación de procesos fisicoquímicos y biológicos o sólo biológicos (anaerobio-aerobio), son una buena alternativa para el tratamiento de los efluentes (Van der Zee y Villaverde, 2005, citado por Yslas, 2018).

Van der Zee y Villaverde (2005, citado por Yslas, 2018, p. 35) declaran algunas ventajas:

- Mineralización completa que a menudo se logra gracias a la acción sinérgica de diferentes organismos.

- Reducción del enlace azo se puede lograr en las condiciones de reducción en biorreactores anaeróbicos y las resultantes aminas aromáticas incoloras pueden ser mineralizadas en condiciones aeróbicas.

De acuerdo a Yslas (2018), algunas desventajas de estos tratamientos son:

- Tiempo de residencia elevado en la fase anaerobia.
- Requerimiento de ciertas cepas para degradar colorantes específicos.
- Persistencia de aminas aromáticas.

CAPÍTULO 3: LA ADSORCIÓN

Este capítulo brinda los conceptos básicos de la sorción y tipos, con especial interés en la adsorción, en cuanto al fenómeno y factores que lo potencian, esto ayudará a comprender cómo ocurre la remoción de sustancias (colorantes) en aguas sintéticas por parte de residuos agroindustriales. Se hace una distinción entre los procesos de adsorción comúnmente utilizados y se describen los adsorbentes convencionales y no convencionales, entre estos últimos están las escamas de pescado, olote y brácteas de maíz que fueron utilizados en la investigación.

3.1. Generalidades

La sorción constituye un término no específico que se puede referir ya sea al proceso de adsorción de un químico en una superficie sólida como al proceso de absorción (partición) de un químico en el volumen de un sólido, o a ambos (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

La adsorción constituye un proceso en donde las moléculas son transferidas desde una corriente de fluido y, mediante fuerzas físicas, son concentradas en una superficie sólida. A la molécula disuelta en la corriente del fluido (gaseosa o acuosa) que es atraída y adsorbida en la superficie sólida se llama adsorbato (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

Desde el punto de vista de la termodinámica, las moléculas procuran un estado de menor energía, por lo que cuando una molécula es adsorbida a una superficie tiene un estado de energía menor que en una fase acuosa. Durante el proceso de equilibrio, la molécula se siente atraída a la superficie por fuerzas químicas y/o físicas. Las fuerzas electrostáticas como las interacciones dipolo-dipolo, interacciones de dispersión o fuerzas de London-van der Waals y enlace de hidrógeno, son las que gobiernan las interacciones entre la mayoría de adsorbatos y adsorbentes (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

La instalación y funcionamiento de la mayoría de los procesos de tratamiento requieren de una elevada inversión económica, y resulta complicado, adquirir nueva tecnología que permita el tratamiento de aguas residuales. De las tecnologías disponibles para reducir la presencia de colorantes y metales pesados en agua y que ha mostrado aceptación es la adsorción, ya que es un proceso económicamente factible, principalmente para las

pequeñas y medianas industrias dando como resultado un efluente de mejor calidad (Valladares-Cisneros et al., 2017).

Inglezakis y Pouloupoulos (2006), establece una clasificación de la sorción según el tipo de unión involucrada:

- a. Sorción física o fisisorción, no se observa intercambio de electrones, tienen lugar atracciones intermoleculares entre sitios de energía favorables y se caracteriza por energías de interacción comparables a los calores de vaporización. El adsorbato es retenido en la superficie mediante fuerzas de van der Waals relativamente débiles y múltiples capas pueden formarse con aproximadamente el mismo calor de adsorción. Este tipo de adsorción es estable solo a temperaturas inferiores a 150 °C.
- b. Sorción química o quimisorción, implica un intercambio de electrones entre sitios específicos de la superficie y moléculas de soluto, dando como resultado un enlace químico. Generalmente, solo se puede adsorber una única capa molecular. Se caracteriza por energías de interacción entre la superficie y el adsorbato comparables a la fuerza de los enlaces químicos y, en consecuencia, es mucho más fuerte y más estable a altas temperaturas que la fisisorción.

Inglezakis y Pouloupoulos (2006, p. 48) establecen algunas ventajas y desventajas de la adsorción, a saber:

Ventajas:

- Alta eficiencia de remoción.
- Permite la eliminación de compuestos orgánicos refractarios y/o tóxicos.
- Posibilidad de recuperación de compuestos (preferiblemente con zeolitas).
- Instalación y mantenimiento sencillos.
- Capacidad de los sistemas para un funcionamiento completamente automático.
- Una gran variedad de adsorbentes disponibles.

Desventajas:

- La capacidad de los adsorbentes se deteriora gradualmente.
- El alto contenido de compuestos macromoleculares disminuye la eficiencia y puede causar daños irreversibles.
- Bloqueo de sitios activos.

- El adsorbente gastado debe regenerarse (alto consumo de energía) o eliminarse (provocando desperdicio).
- Costo de capital relativamente alto.

Tien (2019, p. 6) menciona algunas aplicaciones de la adsorción en fase líquida:

- Decoloración, secado o desgomado de productos derivados del petróleo.
- Eliminación de especies orgánicas disueltas de los suministros de agua.
- Eliminación del olor, sabor y color de los suministros de agua.
- Tratamiento avanzado de aguas residuales (domésticas e industriales).
- Decoloración de jarabe de azúcar crudo y de aceites vegetales.
- Recuperación y concentración de proteínas, productos farmacéuticos y biocompuestos de suspensiones diluidas.
- Separación a granel de parafina e isoparafinas.

3.2. Funcionamiento de los procesos de adsorción

La separación por adsorción se efectúa contactando las soluciones que se van a tratar con los adsorbentes. Tien (2019) describe algunas formas de lograr el contacto fluido/sólido:

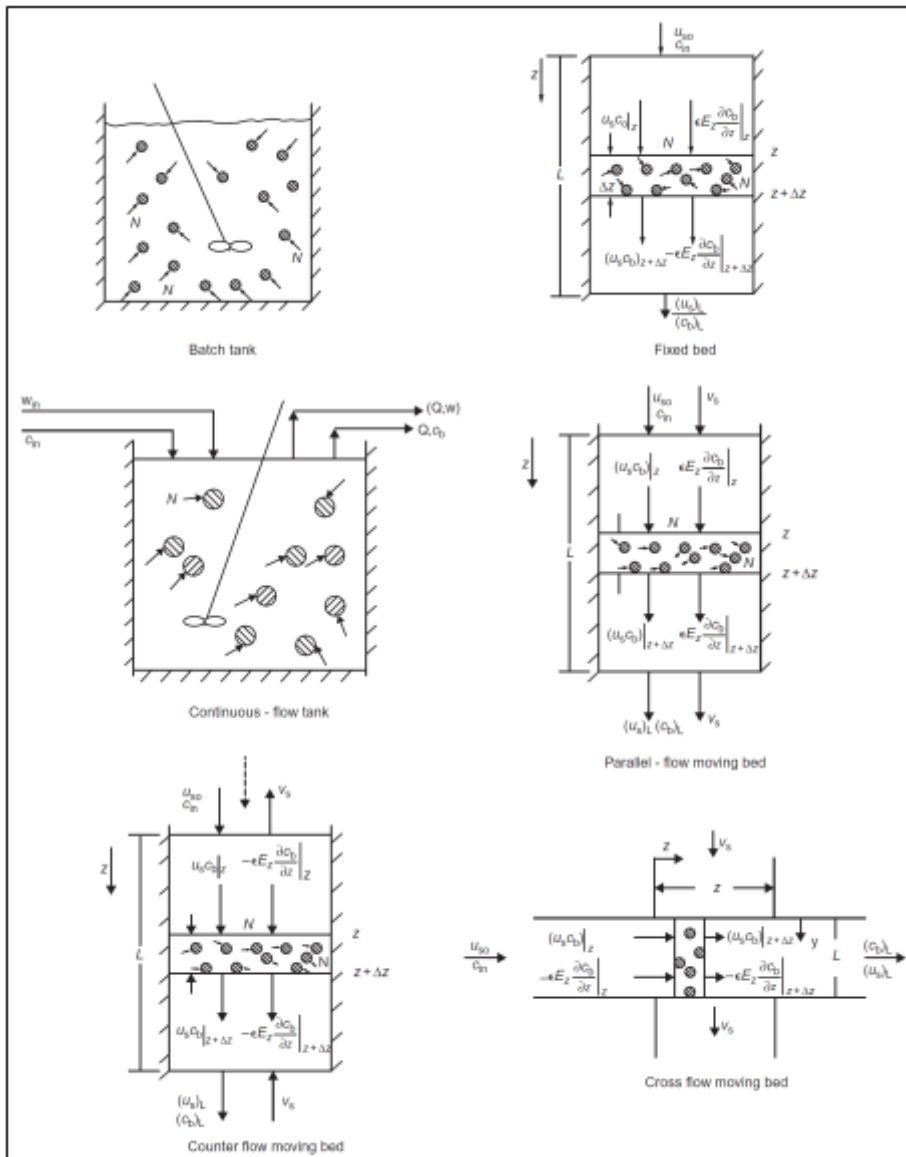
- a. Adsorción en vasos agitados: una cantidad fija de adsorbente se agrega a un volumen de solución con una concentración de soluto conocida en un recipiente cerrado, la agitación se proporciona mediante agitadores giratorios asegurando así que las partículas de adsorbente estén completamente suspendidas y la concentración del adsorbato sea uniforme en la solución. La adsorción por lotes representa quizás la forma más sencilla de lograr el contacto fluido/adsorbente, si bien la operación no es adecuada para tratar grandes volúmenes (como suministros de agua), en general, los datos se utilizan a menudo en la caracterización de nuevos adsorbentes para aplicaciones.
- b. Adsorción en tanques de flujo continuo: los adsorbentes en forma de polvo, como el carbón activado, se agregan directamente a una etapa particular de un proceso de tratamiento (biológico o fisicoquímico) con el propósito de eliminar una especie particular de contaminante, este tipo de operación se utiliza a menudo en el tratamiento de aguas residuales.

- c. Adsorción en lecho fijo: consiste en hacer pasar una solución a través de una columna empacada con adsorbente, se aplica comúnmente para eliminar trazas de contaminantes de una solución líquida, así como vapores tóxicos y volátiles de corrientes gaseosas.
- d. Adsorción en lecho móvil: se lleva a cabo con fases sólida (adsorbente) y fluida en movimiento, que puede ser en paralelo, contracorriente o perpendicular (flujo cruzado), aunque el patrón de contracorriente es utilizado en la práctica.

En la Figura 3.1. se muestran las diferentes configuraciones fluido/sólido en los procesos de adsorción.

Figura 3.1.

Diferentes configuraciones para el proceso de adsorción



Nota: Tien (2019).

3.3. Tipos de adsorbentes

3.3.1. Convencionales

Son aquellos materiales naturales o sintéticos que, para ser utilizados, deben recibir un tratamiento de activación, como el carbono, las arcillas, etc., después de usarse tienen la capacidad de poder ser regenerados (Valladares-Cisneros et al., 2017).

Inglezakis y Pouloupoulos (2006, p. 243) establecen que “el carbón activado, el gel de sílice y la alúmina son los materiales adsorbentes más populares en industria, ya que proporcionan grandes superficies por unidad de peso”.

3.3.1.1. Carbón activado

El carbón activado puede fabricarse a partir de material carbonoso como lignito, turba y madera o cáscaras de nueces como el coco. El proceso de fabricación consiste en la carbonización y la activación. El proceso de carbonización incluye el secado y calentamiento a 400–600 °C en una atmósfera deficiente en oxígeno, con el objetivo de eliminar varios subproductos indeseables como alquitrán y otros hidrocarburos. El carbón activado tiene una superficie muy grande por unidad de peso, lo que lo convierte en un material adsorbente (Inglezakis y Pouloupoulos, 2006).

El carbono activado es el adsorbente más ampliamente utilizado y puede encontrarse en la presentación granular (GAC) y en polvo (PAC), véanse las Figuras 3.2. y 3.3. (Mihelcic y Zimmerman, 2012).

Figura 3.2.

Carbón activado en polvo



Nota: MercadoLibre S.R.L. (2021).

Figura 3.3.

Carbón activado granular



Nota: ACQUATECNOLOGIA® S.A.C. (2021).

En la Tabla 3.1. se compara el uso de GAC y de PAC, así como algunas de sus propiedades físicas.

Tabla 3.1.

Comparación de adsorbentes activados utilizados en el tratamiento de aguas

	Uso principal	Área de superficie específica total (m ² /g)	Tamaño de las partículas (mm)	Consideraciones de diseño
Carbono granular activado (GAC)	Eliminación de constituyentes orgánicos, constituyentes inorgánicos como el mercurio, el fluoruro, el perclorato y el arsénico.	500–2500	0.3–2.4	Llevada a cabo en un modo de operación de cama arreglada ya sea como alimentación por gravedad o bajo presión. Los tres modos comunes de operación de cama arreglada son: 1) operación de adsorbente sencilla, 2) adsorbentes operados en paralelo y, 3) adsorbentes operados en series.
Carbono activado en polvo (PAC)	Principalmente para la eliminación de sabor y olor estacional; también usado para los problemas periódicos con contaminantes de agricultura como los pesticidas y los herbicidas (por ejemplo, durante el cambio de primavera)	800–2000	0.044–0.074	Inyectado en el motor de la planta de tratamiento de aguas convencional y removido durante los procesos de sedimentación y filtración. El parámetro de diseño clave es la dosis requerida, obtenida mediante el uso de ensayos de jarras.

Nota: Mihelcic y Zimmerman (2012).

3.3.1.2. Alúmina activada

La alúmina activada (véase la Figura 3.4.) que puede ser alúmina amorfa o cristalina, ha sido parcial o totalmente deshidratada y tiene una gran superficie por unidad de masa. Las formas cristalinas estables generalmente no se consideran adsorbentes porque tienen áreas de superficie baja. Sin embargo, las formas de transición, como gamma y beta alúmina tienen áreas superficiales altas, típicamente entre 200 y 400 m²/g. Son materiales extremadamente hidrófilos, por lo que se usan en la remoción del agua de corrientes ácidas, gas o de solventes orgánicos (Inglezakis y Pouloupoulos, 2006).

Figura 3.4.

Alúmina activada



Nota: Grupo Filtrantes (2018).

3.3.1.3. Gel de sílice

Inglezakis y Pouloupoulos (2006, p. 247-248) indican que:

El gel de sílice es sílice amorfa sintética que consta de una red compacta de partículas esféricas coloidales de sílice. Su superficie suele estar comprendida entre 300 y 850 m²/g. El gel de sílice se produce a través del siguiente procedimiento: una solución de silicato de sodio reacciona con un ácido mineral, como ácido sulfúrico, produciendo una dispersión concentrada de partículas finamente divididas de SiO₂ hidratado, que a su vez polimeriza para formar el gel de sílice. El tratamiento del gel de sílice implica también lavado, secado y activación.

La sílice activada se utiliza sobre todo para la deshidratación del aire, así como para eliminar especies tóxicas del aire con fines de protección personal (máscara de gas) (Tien, 2019).

La Figura 3.5. muestra el gel de sílice.

Figura 3.5.

Gel de sílice



Nota: Encyclopædia Britannica, Inc. (2021).

3.3.2. Adsorbentes no convencionales (bioadsorbentes)

El carbono activado, debido a su alto costo de producción, limita su uso en el tratamiento de aguas residuales; asimismo, la fuerte retención producida dificulta su regeneración; constituyen aspectos que impiden su aplicación a gran escala. Ante esto, existe una

creciente búsqueda de materiales adsorbentes de bajo costo, renovables, preferentemente naturales y disponibles localmente para la remoción de los colorantes (McDougall, 1991, citado por Valladares-Cisneros et al., 2017).

Sharma (2015, p. 297-298) brinda dos definiciones comúnmente aceptadas para el término biosorción:

- a. Es la eliminación de materiales (compuestos, iones metálicos, tintes orgánicos, etc.) mediante biomasa inactiva y muerta (materiales de origen biológico), debido a las altas fuerzas atractivas presentes entre los dos.
- b. Es la aceptación pasiva de contaminantes de soluciones acuosas mediante el uso de masa microbiana sin crecimiento o muerta, permitiendo así la recuperación y/o la eliminación ambientalmente aceptable de los contaminantes.

Por lo tanto, puede decirse que los adsorbentes no convencionales constituyen materiales alternativos (biopolímeros o partes de plantas) que no necesariamente deben recibir un tratamiento de activación previo; sin embargo, dicha activación mejora su capacidad de adsorción (Valladares-Cisneros et al., 2017).

Los adsorbentes no convencionales (verdes o bioadsorbentes) resultan del aprovechamiento de los materiales de desecho (fruta, residuos vegetales y plantas) de la industria alimentaria y agrícola. Es así como la utilización de estos residuos, para la eliminación de los contaminantes en efluentes acuosos, constituye una alternativa de gran potencial que ofrece ventajas como materiales de bajo costo, disponibilidad, adecuada capacidad de adsorción, factibilidad de mejora a través de modificación química, susceptibilidad a la regeneración y degradabilidad. Las cavidades y poros presentes en la estructura química de los tejidos vegetales (tallos, hojas, cáscaras, semillas, raíces, etc.) permiten el atrapamiento de especies químicas pequeñas, como los metales, hasta moléculas complejas como los colorantes (Nethaji et al., 2013, citado por Valladares-Cisneros et al., 2017).

Los principales biosorbentes se pueden clasificar así:

- Residuos agrícolas: son materiales lignocelulósicos que constan de lignina, celulosa y hemicelulosas como componentes estructurales. Estos compuestos orgánicos son útiles para unir colorantes orgánicos sintéticos a través de diferentes mecanismos, se suelen

utilizar sin o con un mínimo procesamiento (lavado, secado, triturado) reduciendo así los costos de producción (Sharma, 2015).

Desde el punto de vista estructural, la celulosa es un polímero lineal que suele formar microfibrillas en los materiales lignocelulósicos y cuya unidad básica es la D-glucosa, esta última se une mediante un enlace glucosídico en la configuración β 1-4. La hemicelulosa es un polisacárido químicamente heterogéneo, constituido por diferentes unidades de monosacáridos que incluyen xilosa, arabinosa, glucosa, manosa, galactosa, etc., unidas entre sí por enlaces glicosídicos, formando estructuras ramificadas y generalmente amorfas. Actúan como matriz de soporte para las microfibrillas de celulosa en la pared celular, y son de menor masa molecular, más accesibles y más fácilmente degradables que la celulosa. Finalmente, la lignina es un polímero aromático formado por la condensación oxidativa de precursores fenólicos como el sinapílico (4-hidroxi-3,5-dimetoxicinámico), el p-cumarílico (4-hidroxicinámico) y el coniferílico (4-hidroxi-3-metoxicinámico). La lignina es muy ramificada y amorfa, protege a la celulosa contra el ataque bacteriano y proporciona resistencia e impermeabilidad (Marques, 2010, citado por Rosas, 2012).

- Biomasa de algas: las algas pertenecen a un conjunto grande y diverso de organismos que contienen clorofila y realizan fotosíntesis, se componen principalmente de proteínas, carbohidratos y lípidos, con grupos funcionales como carboxilo, hidroxilo, sulfato, fosfato, aminas, aldehídos, cetonas y otros. Estos grupos funcionales son los responsables de la alta afinidad de unión para los colorantes orgánicos sintéticos. El uso de esta biomasa como adsorbente ofrece ventajas como el crecimiento rápido y fácil en medio simple, bajo costo, disponibilidad en grandes cantidades, alta afinidad de unión y la renovabilidad (Sharma, 2015).
- Biomasa bacteriana: las bacterias Gram-positivas se componen de una capa gruesa de peptidoglicano conectada por puentes de aminoácido; en cambio, la pared celular de las bacterias Gram-negativas son más delgadas y están compuestas sólo de 10 a 20 % de peptidoglicano, presentan una membrana externa adicional compuesta por fosfolípidos y lipopolisacáridos. Estos grupos químicos funcionales en las paredes celulares son sitios potenciales para la biosorción al interactuar con los colorantes orgánicos sintéticos. Esta biomasa es obtenida generalmente como residuo de procesos de fermentación a gran escala (Sharma, 2015).

- Quitosano: es un análogo des-N-acetilado de la quitina; generalmente, obtenido a partir de residuos de mariscos (camarón, cangrejo). Se ha establecido que el OH y el NH₂ en su estructura son los principales grupos funcionales responsables de la unión de colorantes. Al encontrarse tasas de biosorción altas, la cantidad utilizada se reduce en comparación con los adsorbentes convencionales y además el proceso transcurre rápidamente (Sharma, 2015).
- Biomasa fúngica: los hongos son un grupo de organismos eucariotas que incluyen microorganismos tales como levaduras y mohos. La pared celular de los hongos está compuesta de glucanos y quitina y, en su estructura celular interna, hay proteínas, lípidos, disacáridos, polisacáridos, alcoholes y otros compuestos. Estos compuestos contienen una serie de grupos funcionales como amino, ácido carboxílico y fosfato que son los responsables de la unión del tinte. Estos microorganismos son fáciles de cultivar, producen altos rendimientos en biomasa y se pueden manipular genéticamente y morfológicamente. La biomasa resulta ser barata y fácilmente adquirida en grandes cantidades por considerarse un subproducto en los procesos de fermentación industrial (Sharma, 2015).

3.4. Adsorbentes utilizados en la investigación

3.4.1 Derivados del pescado

3.4.1.1. Escamas

Las escamas son láminas duras, más o menos flexibles, que trazan un gran número de líneas concéntricas y de estrías radicadas superpuestas formando el exoesqueleto de los peces, se consideran huesos tegumentarios laminares de origen dérmico que están incluidos en una bolsa epidérmica de tejido conjuntivo fibrilar (Miranda, 2002, citado por Ramos, 2018).

En la Figura 3.6. pueden apreciarse escamas secas de tilapia.

Figura 3.6.

Escamas secas de tilapia



Nota: PACIFIC AGRICULTURAL EXPORT CO., LTD. (2019).

Estructuralmente están compuestas por fosfato cálcico y colágeno tipo I. El colágeno se encuentra en la capa interna de las escamas, y es la proteína de mayor abundancia del reino animal, presente en la piel, tendones, vasos sanguíneos, huesos, cartílago, córnea, dientes y en las membranas basales. Las fibras de colágeno forman la matriz de los huesos donde precipitan los constituyentes minerales (Quispe, 2017).

El colágeno está formado por 33 % de glicina, 12 % de prolina, 20 % de hidroxiprolina y 10 % de hidroxilisina, consta de tres cadenas de aminoácidos enlazadas o triple hélice, lo que le confiere una alta resistencia mecánica y capacidad de retención de la humedad (Stryer, 2008; Gelse et al., 2003, citado por Ramos, 2018).

Quintero y Zapata (2017, p. 113) reportan que:

La composición química proximal, en base seca, de las escamas provenientes de tilapia roja reporta un 6.54 % \pm 0.73 % de colágeno, 15.18 % \pm 0.27 % de humedad, 32.08 % \pm 0.23 % de cenizas y 67.96 % \pm 0.19 % de proteína.

Couts (2016, citado por Castro et al., 2017) afirma que la parte aprovechada de la pesca para consumo humano es de aproximadamente el 60 % de su peso y el 40 % restante se descarta: cabezas, esqueleto, vísceras, escamas y aletas; pero que pueden utilizarse para obtener productos derivados de la pesca como la harina de pescado o como sustrato que ayuda al desarrollo radicular de las plantas.

3.4.2. Derivados del maíz

El maíz (*Zea mays* L.), que pertenece a la familia de las gramíneas, es un cereal de origen indio, con 7000 años de antigüedad, que se cultivaba en México y América Central (González y Ladino, 2018).

Maroto (1998, citado por Guacho, 2014, p. 7) declara que:

El maíz es una planta monoica pues presenta inflorescencia masculina y femenina separada dentro de la misma planta:

- La inflorescencia masculina, es una panícula (vulgarmente denominado espigón o penacho) de coloración amarilla que posee aproximadamente entre 20 a 25 millones de granos de polen, la panícula contiene tres estambres donde se desarrolla el polen.
- La inflorescencia femenina, cuando ha sido fecundada por los granos de polen se denomina mazorca, aquí se encuentran las semillas (granos de maíz) agrupadas a lo largo de un eje. Esta mazorca se halla cubierta por hojitas de color verde, terminando en una especie de penacho de color amarillo oscuro, formado por estilos.

El maíz constituye el rubro más importante dentro de la canasta alimenticia básica salvadoreña. Según FAO, el consumo *per cápita* por año es alrededor de 80.51 kilogramos en el área urbana y 127 kilogramos en el área rural, siendo el mayor consumo del área centroamericana, donde el 95 % de la producción es destinada al consumo humano (CENTA, 2018).

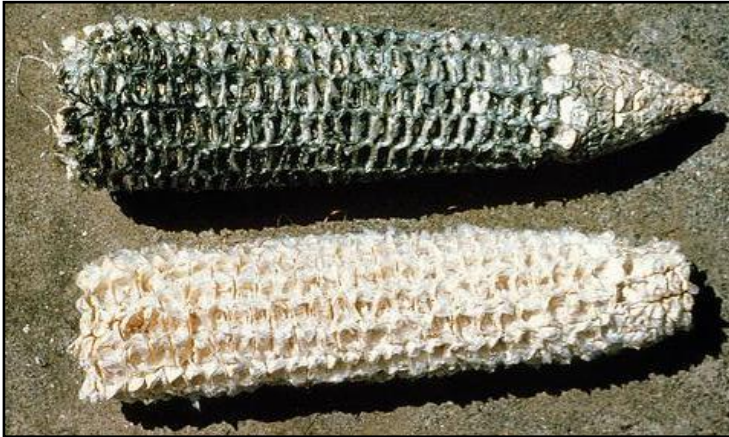
3.4.2.1. Olote

Q.I. (2006, citado por Torres y Gaibor, 2015, p. 15) sostiene que “el olote (en náhuatl: otlol, “corazón”) chócolo, marlo, tusa, zuro o la coronta es el huesete (raquis) de la mazorca del maíz”.

La Figura 3.7. muestra una fotografía de olotes secos.

Figura 3.7.

Olotos secos



Nota: Lado B (2012).

Es un desecho industrial producido durante el desgranado del maíz cuando es procesado. Suele utilizarse como alimento para algunos animales y como abono o combustible para encender el fuego para cocinar en el campo (Salazar, 2011, citado por Torres y Gaibor, 2015).

Además, es considerado como uno de los mejores materiales bioadsorbentes de colorantes presentes en el agua, se ha demostrado que contiene 7.39 % de lignina, 48.74 % de celulosa y 29.21 % de hemicelulosa (Moreno, 2012, citado por González y Ladino, 2018).

3.4.2.2. *Brácteas*

La flor femenina, la futura mazorca, que se sitúa a media altura de la planta, en realidad está compuesta por numerosas flores dispuestas en una ramificación lateral, cilíndrica y envuelta por falsas hojas, llamadas brácteas o espata (Ortigoza et al., 2019). Las mazorcas con excelentes coberturas favorecen la protección de la misma contra el ataque de pájaros y evita así las pudriciones de los granos (Orozco, 2010, citado por Vásquez et al., 2016).

Es importante aclarar que, en Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras y Nicaragua, la tuza o tusa constituye la hoja que envuelve la mazorca del maíz (REAL ACADEMIA ESPAÑOLA, 2021).

La Figura 3.8., muestra las brácteas de maíz envolviendo a la mazorca.

Figura 3.8.

Brácteas de maíz



Nota: Escarola (2015).

El totomoxtle, conocido comúnmente como la cáscara u hoja que cubre la mazorca, se usa normalmente por los campesinos como alimento para animales y en la elaboración de los tradicionales tamales, pero se han descubierto muchas aplicaciones en el arte de las manualidades (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2017).

Prado-Martínez et al. (2012, p. 42) enfatizan que “la hoja de mazorca, según resultados obtenidos de la caracterización química expresados en base seca, posee 78.86 % de holocelulosa, 43.14 % de α -celulosa y 23.00 % de lignina”.

3.5. Factores que influyen en el proceso de adsorción

3.5.1. pH

Es el factor más importante en la adsorción tanto de cationes como de aniones en fase acuosa. La adsorción de cationes suele estar favorecida para valores de pH superiores a 4.5, para la adsorción de aniones se prefiere un valor entre 1.5 y 4.0 (Vijayaraghavan y Balasubramanian, 2015, citado por Quispe, 2017).

3.5.2. Temperatura

Un elevado aumento de la temperatura puede causar un cambio en la textura del sorbente y un deterioro del material, produciendo una pérdida de la capacidad de sorción (Tejada et al., 2015, citado por Aucancela, 2018).

3.5.3. *Tamaño de partícula*

Para un tamaño menor de partícula existe un mayor número de centros activos disponibles para que ocurra la adsorción, promoviéndose una mayor afinidad para que el adsorbato acceda a ellos (Malkoc y Nuhoglu, 2006, citado por Quevedo, 2017).

METODOLOGÍA

CAPÍTULO 4: DISEÑO METODOLÓGICO

El presente capítulo pretende mostrar la metodología aplicada en la investigación, las variables de estudio, muestreo, instrumentos y técnicas utilizadas. Se describe, detalladamente, cada una de las etapas desarrolladas tales como la preparación de los materiales adsorbentes y de las aguas sintéticas, construcción del módulo de adsorción en lecho fijo y de la cabina de luz, determinación de las coordenadas del espacio de color y diferencia de color de las muestras de filtrado y, por último, la declaración del análisis estadístico de los datos obtenidos con sus respectivas hipótesis.

4.1. Introducción

Por el tipo de estudio, la investigación tuvo un enfoque cuantitativo, según plantea Hernández et al. (2014) implica una lógica deductiva, es decir, se parte de lo general (leyes, teorías, fenómenos) a lo particular (datos numéricos) a través de un proceso predecible, estandarizado y estructurado, que permita comprobar hipótesis previamente planteadas, mediante análisis estadísticos de las muestras, para posteriormente generalizar los resultados a una población. Es así como se establecieron una serie de hipótesis de trabajo en relación a la interacción de las variables en estudio, para comprobar la capacidad bioadsorbente de tres residuos agroindustriales (escamas de pescado, olote y brácteas de maíz) en contacto con soluciones sintéticas de dos colorantes (FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40), con el propósito de valorizar o aprovechar estos residuos, constituyendo una alternativa económica para el tratamiento de efluentes contaminados con sustancias colorantes, por su potencial efecto adverso sobre el medioambiente. A partir de las soluciones estándar de colorantes y muestras de filtrados, se obtuvieron las coordenadas del espacio de color CIELAB, por triplicado, mediante una aplicación de teléfono móvil con lo cual se garantizó la objetividad en los datos numéricos, para el cálculo posterior de la diferencia de color ΔE^*_{ab} . Estos datos se sometieron a Análisis de Varianza (ANOVA) utilizando un software especializado, permitiendo así la evaluación y conclusión en base a los resultados.

Por el tipo de investigación, se desarrolló un diseño experimental en contexto de laboratorio, ya que, según plantea Hernández et al. (2014), implica el establecimiento de una situación controlada en la cual se manipulan intencionalmente una o más variables independientes (causas) para analizar sus consecuencias sobre una o más variables dependientes (efectos) garantizando la pertinencia, validez y confiabilidad, en un contexto

artificial o construido donde todas o la mayoría de las variables independientes no concernientes a la investigación se mantengan lo más reducidas posible. En base a esto, se establecieron una serie de variables independientes sujetas a manipulación (tipo de adsorbato, tamaño y tipo de adsorbente y pH de soluciones colorantes) y sus respectivas variables dependientes (capacidad adsorbente de los residuos agroindustriales y luminosidad del color) cuantificadas mediante el cálculo de la diferencia de color entre soluciones estándar de colorantes y muestras de filtrados. Para este fin, se crearon procedimientos unificados y específicos para la preparación (tratamiento) y caracterización de los adsorbentes, preparación de los reactivos para ajuste de pH, preparación de las soluciones sintéticas de los adsorbatos y los ensayos de bioadsorción. Hubo la necesidad de construir un módulo para adsorción en lecho fijo que permitiera controlar las condiciones del experimento en la obtención de los filtrados así también la construcción de una cabina de luz, para la determinación de las coordenadas del espacio de color en condiciones reproducibles con la mínima influencia de agentes externos (ambientales).

El proceso metodológico involucró, primeramente, la adquisición de la materia prima considerada como desecho agroindustrial (escamas de pescado, olote y brácteas de maíz), acondicionamiento y caracterización para proceder a la investigación, se sometió a pruebas variando el tamaño de partícula del residuo, tipo de colorante y pH de la solución colorante. Se construyó un módulo para la obtención de los filtrados en los ensayos de adsorción en lecho fijo, y una cabina de luz que permitiera un ambiente estable y estandarizado para la determinación de las coordenadas del espacio de color CIELAB necesarias para comparar la capacidad adsorbente de los residuos. Para ello se utilizó una aplicación descargable que aprovecha la cámara del teléfono móvil.

Para la construcción del módulo de adsorción en lecho fijo, se tomó en cuenta lo expresado en el artículo "Propiedades adsorptivas de un carbón activado y determinación de la ecuación de Langmuir empleando materiales de bajo costo" bajo la autoría de José Carriazo, Martha Saavedra y Manuel Molina, basado en un enfoque cuantitativo con diseño experimental en contexto de laboratorio. Se propusieron materiales de bajo costo para la adsorción de moléculas colorantes presentes en refrescos comerciales sobre carbón activado obtenido a partir de cáscara de coco, como una alternativa a las limitaciones de material de laboratorio, reactivos químicos y equipos adecuados encontradas en muchas escuelas primarias y secundarias de algunos países de América Latina (Carriazo et al., 2010).

Para la construcción de la cabina de luz, se tomó en cuenta lo expresado en el Trabajo fin de Máster “Diseño de un sistema de visión por ordenador para la caracterización del color del tomate (*Solanum lycopersicum* L.)” bajo la autoría de Laura López, basado en un enfoque cuantitativo con diseño experimental en contexto de laboratorio. Se construyó un Sistema de Visión por Computador (SVC) de bajo costo con el cual se midió el color externo del tomate, implicó el diseño de un sistema de captación, procesado, análisis y almacenamiento de imágenes. Se analizó el color de diversas cartas de colores y estas medidas fueron comparadas con un sistema comercial, el colorímetro Konica Minolta CR-400, obteniéndose un error medio normalizado del SVC del 2.50 %, denotando así la exactitud del sistema construido (López, 2017).

En los últimos años, se han desarrollado investigaciones y trabajos relacionados al tema, algunos de ellos permitieron orientar el proceso metodológico propuesto (véase la Tabla 4.1.).

Tabla 4.1.

Características de estudios previos sobre bioadsorción

Autor(es)	Tipo de estudio	Metodología	Resultados
Roca (2019)	Estudio comparativo del poder biosorbente de la cáscara de naranja y hojas de Neem para la remoción de colorantes en soluciones acuosas.	Enfoque cuantitativo con diseño experimental en contexto de laboratorio. Se evaluó el poder biosorbente del polvo de las hojas de Neem y cáscaras de naranja para la remoción de azul de metileno a diferentes concentraciones en soluciones acuosas, las alícuotas se analizaron empleando espectrofotometría UV-VIS.	El polvo de las cáscaras de naranja provocó una mayor remoción del colorante entre 86.77 % y 89.99 %, mientras que el de las hojas de Neem entre 77.03 % y 87.84 %.
Torres y Gaibor (2015)	Estudio de la aplicación del olote o tusa de maíz para la reducción del color en aguas residuales de la hilandería Guijarro Cantón Guano.	Enfoque cuantitativo con diseño experimental en contexto de laboratorio. Se especificaron las propiedades del olote como lecho filtrante en el tratamiento de las aguas residuales en tinturados de lana de borrego, implicó la caracterización de las	La mejor aplicación fue el filtro con tamaño de partícula T2 (4.5 mm), T3 (2.36 mm), grava y carbón activado de olote o tusa de maíz llegando a reducir un 78.63 % del color, siendo eficiente al descargar el efluente al lecho del

		aguas residuales, el diseño y la construcción del filtro (prototipo).	río Guano.
Zambrano (2018)	Remoción de colorantes sintéticos de las aguas residuales de la industria alimentaria usando como material adsorbente biomasa de arroz.	Enfoque cuantitativo con diseño experimental en contexto de laboratorio. Se evaluó la capacidad de adsorción de la cáscara de arroz en soluciones colorantes de Azul Brillante FCF y Tartrazina, bajo condiciones estáticas. Los estudios de adsorción fueron evaluados en función del pH, concentración inicial, dosis del adsorbente, tiempo de contacto y temperatura.	La adsorción fue efectiva a pH ácidos (pH 2), alcanzándose el equilibrio a los 60 y 90 minutos en una dosis de adsorbente de 1.4 g de cáscara de arroz para Azul Brillante FCF y Tartrazina, respectivamente.
González y Ladino (2018)	Determinación de la eficiencia de bioadsorción del colorante rojo allura #40, utilizando tusa de maíz, cáscara de banano y cascarilla de arroz; aplicado a aguas sintéticas.	Enfoque cuantitativo con diseño experimental en contexto de laboratorio. En esta investigación, se tuvieron en cuenta variables como pH, material adsorbente y tamaño de partícula, y como constantes la temperatura ambiente, tiempo de contacto y concentración del colorante.	Se determinó que la eficiencia de remoción fue de 99.911 % para la tusa de maíz, 99.366 % para la cáscara de banano y para la cascarilla de arroz 86.560 % en prueba batch.
Bonilla et al. (2015)	Remoción de pigmentos de efluentes a través de un biofiltro de gravedad de lecho fijo de exoesqueletos de especies marinas.	Enfoque cuantitativo con diseño experimental en contexto de laboratorio. Se confeccionó un biofiltro de lecho fijo a base de exoesqueletos (escamas) marinos finamente pulverizados, para la remoción de pigmentos orgánicos e inorgánicos disueltos en efluentes sintéticos. Se cuantificó la conductividad eléctrica, pH y	Los biofiltros construidos fueron capaces de remover pigmentos inorgánicos, siendo menos efectivos en la remoción de pigmentos orgánicos de origen animal, para los cuales se hizo necesaria la utilización de varias unidades de tratamiento en serie.

		turbidez de los efluentes sin tratar y sometidos a tratamiento.	
--	--	--	--

Nota: Elaboración propia con datos tomados de las fuentes ya mencionadas.

4.2. Variables

Según plantea Hernández et al. (2014), una variable constituye una propiedad que puede medirse u observarse.

Una variable se considera cualitativa si sus valores representan una cualidad, atributo o categoría; en cambio, es cuantitativa cuando sus valores representan una cantidad expresada en números. Esta última puede clasificarse como continua si toma todos los valores dentro de un intervalo de números reales y no considerando valores aislados (Rincón, 2017).

Las variables que incluyen dos categorías se denominan dicotómicas, mientras que aquellas con tres o más categorías son llamadas multicotómicas o policotómicas (Coronado, 2007).

Una variable es independiente cuando, dentro de una relación establecida, no depende de ninguna otra; al contrario, en una variable dependiente sus valores dependen de los que asuma otra variable (Núñez, 2007).

En la Tabla 4.2., se especifican las variables consideradas en el presente estudio.

Tabla 4.2.*Variables consideradas en la investigación*

Clasificación	Tipo	Variable	Subdivisión	Valores
Independiente	Cualitativa	Tipo de adsorbente.	Policotómica	<ul style="list-style-type: none"> • Escamas de pescado. • Olote. • Brácteas de maíz.
		Tipo de adsorbato.	Dicotómica	<ul style="list-style-type: none"> • FD&C Azul No. 1. • FD&C Rojo No. 40.
	Cuantitativa	Tamaño de partícula del adsorbente.	Continua	<ul style="list-style-type: none"> • Menor a 1 mm. • Mayor a 1 mm pero menor a 3 mm.
		Potencial de hidrógeno (pH) de las soluciones.	Continua	<ul style="list-style-type: none"> • 3 • 8
Dependiente	Cualitativa	Capacidad adsorbente de los residuos agroindustriales.	Policotómica	<ul style="list-style-type: none"> • Nula • Baja • Media • Alta • Total
		Luminosidad del color.	Policotómica	<ul style="list-style-type: none"> • Igual que la solución estándar. • Ligero • Pálido • Muy pálido • Blanco

Nota: Elaboración propia.

4.3. Muestra

La investigación implicó aguas sintéticas de los colorantes, el volumen total de las soluciones preparadas se sometió a los ensayos de adsorción, distribuidas según se aprecia en la Tabla 4.3.:

Tabla 4.3.*Ensayos de adsorción considerados en la investigación*

Residuo agroindustrial	Colorante	Tamaño de partícula	pH de solución
Escamas de pescado	FD&C Azul No. 1	T < 1 mm	3
			8
		1 mm < T < 3 mm	3
			8
	FD&C Rojo No. 40	T < 1 mm	3
			8
		1 mm < T < 3 mm	3
			8
Olote	FD&C Azul No. 1	T < 1 mm	3
			8
		1 mm < T < 3 mm	3
			8
	FD&C Rojo No. 40	T < 1 mm	3
			8
		1 mm < T < 3 mm	3
			8
Brácteas de maíz	FD&C Azul No. 1	T < 1 mm	3
			8
		1 mm < T < 3 mm	3
			8
	FD&C Rojo No. 40	T < 1 mm	3
			8
		1 mm < T < 3 mm	3
			8

Nota: Elaboración propia.

Para cada residuo agroindustrial, se obtuvieron veinticuatro muestras de soluciones debido a que el ensayo se realizó por triplicado, resultando un total de setenta y dos muestras de filtrado.

4.4. Instrumentos de Medición y Técnicas

- **Instrumento de medición:** aplicación móvil para Android “Colorimeter” versión 5.5.1 desarrollada por Research Lab Tools, Brasil para la determinación de las coordenadas del espacio de color CIELAB.

“Colorimeter”, es una aplicación para teléfono móvil de colorímetro portátil, con la cual con solo activar la cámara y elegir la muestra, se obtienen los parámetros de color tales como CIELAB, Chroma, Hue^o, RGB y espectros visibles (400 nm a 700 nm) en tiempo real; además, permite explorar todos los colores capturados en los ensayos previamente guardados (Research Lab Tools, 2015).

- **Técnica de recolección de datos:** observación experimental para obtener resultados de carácter objetivo utilizando la aplicación de teléfono móvil.

- **Técnica de procesamiento de datos:** programa IBM SPSS Statistics 22.0 para el Análisis de Varianza (ANOVA).

4.5. Procedimientos

4.5.1. Preparación de los bioadsorbentes

En la Tabla 4.4., se presentan los insumos utilizados para procesar cada tipo de residuo agroindustrial. Asimismo, se detallan cada una de las etapas realizadas para la obtención de los productos secos como materiales bioadsorbentes.

Tabla 4.4.

Materiales utilizados según el tipo de bioadsorbente obtenido

Materiales utilizados \ Tipo de bioadsorbente	Escamas de pescado	Olote	Brácteas de maíz
Escamas de pescado frescas.	X		
Olote fresco.		X	
Brácteas de maíz frescas.			X
Dos cubetas plásticas multiusos con capacidad de 5 galones.		X	X
Un balde plástico multiusos con capacidad de 2 galones.	X		
Agua de grifo.	X	X	X
Un recipiente plástico (huacal).		X	X
Un colador de cocina.	X	X	X
Un par de guantes de nitrilo SHOWA™ serie 730-08.	X	X	X
Guantes de látex desechables.	X	X	X
Zaranda galvanizada de luz de malla de 3 mm.	X	X	X
Cartón corrugado de 3 mm de espesor.	X	X	X
Hilo nylon.	X	X	X
Una aguja para coser.	X	X	X
Un par de guantes de seguridad de látex marca Kimberly-Clark Professional* Jackson* G40.	X	X	X
Un colador malla para cocina con luz de malla de 1 mm.	X	X	X
Un recipiente plástico sin tapa.	X	X	X
Bolsas plásticas color negro.	X	X	X
Un cuchillo de acero inoxidable.		X	X
Una tabla plástica para picar alimentos.		X	X
Hojas de papel toalla absorbente.		X	

Tijeras de acero inoxidable.	X	X	X
Una báscula digital de cocina marca Fox Run modelo 45005.	X	X	X
Un termohigrómetro digital marca Taylor 1732.	X	X	X
Un temporizador de teléfono móvil.	X	X	X
Un termómetro de mercurio marca Fisher Scientific serie 3709.	X	X	X
Un molino manual para carne marca Weston.	X	X	X
Un molino manual para granos Vikingo®.		X	

Nota: Elaboración propia.

Procedimiento

- Adquisición de las materias primas: las escamas de pescado frescas, únicamente mantenidas en refrigeración para su conservación a petición del investigador, fueron donadas por una empresa dedicada al procesamiento de pescados y mariscos, ubicada en el municipio de San Salvador, departamento de San Salvador, su traslado a la residencia del investigador se realizó a temperatura ambiente y utilizando una bolsa plástica negra con un balde plástico multiusos con capacidad de 2 galones. El olote y las brácteas de maíz frescos fueron donados por una empresa dedicada al procesamiento del maíz para la elaboración de productos nostálgicos, ubicada en el municipio de Soyapango, departamento de San Salvador, su traslado a la residencia del investigador se realizó a temperatura ambiente y utilizando dos cubetas plásticas multiusos con capacidad de 5 galones para cada residuo agroindustrial.
- Pesaje de las materias primas: se determinó la masa (g) requerida de las materias primas para la preparación del material adsorbente, se utilizó una báscula digital de cocina, un recipiente plástico sin tapa y guantes de látex desechables. Se llevó a cabo en la residencia del investigador.
- Reducción de tamaño de las materias primas (sólo para olote y brácteas de maíz): se utilizó un cuchillo de acero inoxidable, una tabla plástica para picar alimentos, un guante de seguridad de látex y guantes de látex desechables obteniendo piezas de 2 cm aproximadamente. Los objetivos fueron aumentar el área superficial facilitando el análisis de humedad, optimizar los enjuagues posteriores y acelerar el secado solar. Se llevó a cabo en la residencia del investigador.

- Enjuague: se utilizó agua de grifo a una temperatura de 50 °C con una duración de 3 minutos por cada uno de los dos enjuagues, se realizó manualmente aplicando frotación con el objetivo de reducir, mediante dilución, la materia orgánica o inorgánica superficial de las materias primas (restos de piel, sangre, grasa, almidón, pigmentos, polvo o sales) que pudieran interferir con los resultados de la investigación. Se utilizó un balde plástico multiusos, un recipiente plástico (huacal), un colador de cocina, un par de guantes de nitrilo y temporizador de teléfono móvil, así como un termómetro de mercurio para mantener la temperatura controlada. Se llevó a cabo en la residencia del investigador.
- Escurrido (sólo para escamas de pescado y brácteas de maíz): se exprimieron manualmente durante 5 segundos, con el objetivo de reducir el contenido de humedad que pudo absorberse durante los enjuagues. Se utilizó un par de guantes de nitrilo y un temporizador de teléfono móvil. Se llevó a cabo en la residencia del investigador.
- Reducción de humedad (sólo para olote): se utilizaron hojas de papel toalla absorbente con un tiempo de contacto de 2 minutos, con el objetivo de disminuir el contenido de humedad que pudo absorberse durante los enjuagues. Se utilizó un temporizador de teléfono móvil y guantes de látex desechables. Se llevó a cabo en la residencia del investigador.
- Secado solar: las materias primas se colocaron uniformemente en bandejas de 1 yd² utilizando un guante de látex desechable y se expusieron a la luz solar por un periodo de 7 días consecutivos, a una temperatura promedio de 40 °C y 31 % de humedad relativa del aire atmosférico, se midió mediante un termohigrómetro digital. Los objetivos fueron reducir en mayor medida la humedad contenida en las materias primas, retrasando su deterioro por acción de microorganismos o enzimas, así como facilitar la reducción de tamaño posterior. Las bandejas fueron construidas con zaranda galvanizada de luz de malla de 3 mm y cintas de cartón corrugado de 6 cm de altura y 3 mm de espesor con costura de hilo nylon para cada una, se utilizó un par de guantes de seguridad de látex, una aguja para coser y unas tijeras de acero inoxidable. Se llevó a cabo en la residencia del investigador.

- Pesaje de los productos secos: se determinó la masa (g) de los productos luego del secado solar, se utilizó una báscula digital de cocina, un recipiente plástico sin tapa y guantes de látex desechables. Se llevó a cabo en la residencia del investigador.
- Reducción de tamaño de los productos secos: se realizó tanto la trituración (1 mm < partícula < 3 mm) como la molturación (partícula < 1 mm) utilizando un molino manual para granos (sólo para olote), un molino manual para carne y guantes de látex desechables. Se llevó a cabo en la residencia del investigador.
- Tamizado: para el tamaño de partícula < 1 mm se utilizó un colador malla para cocina con luz de malla de 1 mm y para 1 mm < tamaño de partícula < 3 mm se utilizó un trozo de zaranda galvanizada con luz de malla de 3 mm, así como guantes de látex desechables. Se llevó a cabo en la residencia del investigador.
- Almacenamiento: en bolsas plásticas color negro, para protegerlos de la luz y humedad ambiental. Se mantuvieron en la residencia del investigador.

4.5.2. Caracterización de los bioadsorbentes

4.5.2.1. Análisis de humedad de las materias primas

Materiales utilizados

- Residuos agroindustriales previo al secado solar.
- Un analizador de humedad RADWAG® de la serie MAC 50/WH.
- Tres bolsas plásticas de cierre de cremallera.
- Una espátula de laboratorio.

Procedimiento

- Las muestras analizadas se sometieron únicamente a limpieza seca y reducción de tamaño (para el caso del olote y brácteas de maíz).

- Se almacenaron en bolsas plásticas de cierre de cremallera y se manipularon con espátula de laboratorio.
- Se determinó la humedad de las escamas de pescado, olote y brácteas de maíz, en base húmeda y en base seca, por triplicado, utilizando el analizador de humedad programado con perfil de secado estándar (120 °C) y en modo de terminación de secado automática (cambio de masa por 1 mg/durante 60 s). El análisis se llevó a cabo en uno de los laboratorios de Química de una Universidad privada.

4.5.2.2. Análisis de humedad de los productos secos

Materiales utilizados

- Residuos agroindustriales luego del secado solar.
- Un analizador de humedad RADWAG® de la serie MAC 50/WH.
- Tres bolsas plásticas de cierre de cremallera.
- Una espátula de laboratorio.

Procedimiento

- Las muestras secas se almacenaron en bolsas plásticas de cierre de cremallera y se manipularon con espátula de laboratorio.
- Se determinó la humedad residual de las escamas de pescado, olote y brácteas de maíz, en base húmeda y en base seca, por triplicado, utilizando el analizador de humedad programado con perfil de secado estándar (120 °C) y en modo de terminación de secado automática (cambio de masa por 1 mg/durante 60 s). El análisis se llevó a cabo en uno de los laboratorios de Química de una Universidad privada.

4.5.3. Preparación de los reactivos para ajuste de pH

4.5.3.1. Solución de ácido clorhídrico (HCl) 0.1 N

Materiales utilizados

- Solución comercial de ácido clorhídrico (concentración: 37 %m/m y densidad: 1.19 g/ml).
- Agua destilada.
- Guantes de látex desechables.
- Gafas de protección.
- Una mascarilla de protección desechable.
- Un matraz aforado de 250 ml provisto de tapón plástico.
- Una pipeta graduada de 10 ml.
- Una propipeta.
- Un vaso de precipitados de 50 ml.
- Dos frascos lavadores.

Procedimiento

- Adquisición del reactivo: la solución comercial de ácido clorhídrico se compró en una Droguería ubicada en el municipio de San Salvador, departamento de San Salvador.
- Preparación de la solución a utilizar: se prepararon 250 ml de solución a una concentración de ácido clorhídrico de 0.1 N que fue utilizada para toda la investigación, mediante una dilución, con agua destilada, de 2 ml de la solución comprada. Se utilizó un par de guantes de látex desechables, mascarilla de protección desechable y gafas de protección, así como un matraz aforado, una pipeta graduada, una propipeta, un vaso de precipitados y dos frascos lavadores proporcionados por una Universidad privada. Se llevó a cabo en uno de los laboratorios de Química de dicha Universidad.
- Almacenamiento de la solución preparada: protegida de la luz.

4.5.3.2. Solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N

Materiales utilizados

- Hidróxido de sodio sólido en perlas.
- Agua destilada.
- Guantes de látex desechables.
- Una mascarilla de protección desechable.
- Gafas de protección.
- Un matraz aforado de 250 ml provisto de tapón plástico.
- Un agitador de vidrio.
- Un vaso de precipitados de 100 ml.
- Un vaso de precipitados de 600 ml.
- Dos frascos lavadores.
- Un vidrio de reloj.
- Una espátula de laboratorio.
- Un trípode de laboratorio.
- Una malla de asbesto.
- Una caja de fósforos de seguridad.
- Balanza analítica RADWAG® de la serie AS 310/C/2.
- Un temporizador de teléfono móvil.
- Un mechero Bunsen.

Procedimiento

- Adquisición del reactivo: el hidróxido de sodio sólido en perlas se compró en una Droguería ubicada en el municipio de San Salvador, departamento de San Salvador.

- Preparación del agua destilada hervida: el agua destilada se colocó a ebullición por 10 minutos utilizando un vaso de precipitados de 600 ml, un trípode de laboratorio, una malla de asbesto, un mechero Bunsen y fósforos de seguridad. Posteriormente, se dejó enfriar por 2 horas. El objetivo fue eliminar gases disueltos que pudieran reaccionar con el producto químico en la solución preparada. Se llevó a cabo en uno de los laboratorios de Química de dicha Universidad.

- Preparación de la solución a utilizar: se prepararon 250 ml de solución a una concentración de hidróxido de sodio de 0.1 N con agua destilada hervida que fue utilizada para toda la investigación, requiriendo 1 g de hidróxido de sodio en perlas. Se usó un par de guantes de látex desechables, gafas de protección y mascarilla de protección desechable, así como un vidrio de reloj, una espátula de laboratorio, un vaso de precipitados de 100 ml, un agitador de vidrio, un matraz aforado, dos frascos lavadores y una balanza analítica proporcionados por una Universidad privada. Se llevó a cabo en uno de los laboratorios de Química de dicha Universidad.
- Almacenamiento de la solución preparada: protegida de la luz.

4.5.4. Preparación de las soluciones sintéticas de los adsorbatos

En la Tabla 4.5., se presentan los insumos utilizados para la preparación de las soluciones según el tipo de colorante. Asimismo, se detallan cada una de las etapas realizadas para la obtención de las soluciones sintéticas de los adsorbatos.

Tabla 4.5.

Materiales utilizados según el tipo de colorante

Materiales utilizados \ Tipo de colorante	FD&C Azul No. 1	FD&C Rojo No. 40
Fracos de solución comercial de colorante FD&C Azul No. 1 al 0.5 %m/v.	X	
Fracos de solución comercial de colorante FD&C Rojo No. 40 al 0.5 %m/v.		X
Agua destilada.	X	X
Solución de ácido clorhídrico (HCl) 0.1 N.	X	X
Solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N.	X	X
Guantes de látex desechables.	X	X
Gafas de protección.	X	X
Dos matraces aforados de 1000 ml provistos de tapones.	X	X
Una pipeta graduada de 10 ml.	X	X
Una propipeta.	X	X
Un vaso de precipitados de 100 ml.	X	X
Un vaso de precipitados de 2000 ml.	X	X
Un agitador de vidrio.	X	X
Dos frascos lavadores.	X	X
pH-metro digital marca Sper Scientific.	X	X

Nota: Elaboración propia.

Procedimiento

- Adquisición de los colorantes: las soluciones comerciales a una concentración del 0.5 %m/v que equivale a 5000 partes por millón (ppm) de los colorantes en estudio, en prácticos frascos plásticos de 30 ml con gotero para uso alimenticio, se compraron en un supermercado del municipio de Santa Tecla, departamento de La Libertad.
- Determinación del pH del agua destilada: se utilizó un pH-metro digital (método potenciométrico) y dos vasos de precipitados de 2000 ml, obteniéndose un valor de 7.38 unidades. El agua destilada fue comprada en una Droguería ubicada en el municipio de San Salvador, departamento de San Salvador. Se llevó a cabo en uno de los laboratorios de Química de una Universidad privada.
- Preparación de las soluciones ácidas estándar de los colorantes: según el pH del agua destilada utilizada, se ajustó a un valor de pH de 3 unidades adicionando alícuotas de ácido clorhídrico (HCl) 0.1 N, se gastaron 51.0 ml aproximadamente de esta solución. Para cada uno de los colorantes en estudio, se prepararon 1000 ml de solución a una concentración de colorante de 0.005 %m/v que equivale a 50 ppm mediante una dilución de 10 ml de la solución comprada. Se utilizó un pH-metro digital, guantes de látex desechables y gafas de protección, así como un matraz aforado, una pipeta graduada, una propipeta, un vaso de precipitados de 100 ml y dos frascos lavadores proporcionados por una Universidad privada. Se llevó a cabo en uno de los laboratorios de Química de dicha Universidad.
- Preparación de las soluciones alcalinas estándar de los colorantes: según el pH del agua destilada utilizada, se ajustó a un valor de pH de 8 unidades adicionando alícuotas de hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N, se gastaron 0.8 ml aproximadamente de esta solución. Para cada uno de los colorantes en estudio, se prepararon 1000 ml de solución a una concentración de colorante de 0.005 %m/v que equivale a 50 ppm mediante una dilución de 10 ml de la solución comprada. Se utilizó un pH-metro digital, guantes de látex desechables y gafas de protección, así como un matraz aforado, una pipeta graduada, una propipeta, un vaso de precipitados y dos frascos lavadores proporcionados por una Universidad privada. Se llevó a cabo en uno de los laboratorios de Química de dicha Universidad.

- Almacenamiento de las soluciones preparadas: protegidas de la luz.

4.5.5. Construcción del módulo para adsorción en lecho fijo

Materiales utilizados

- Dos codos lisos de PVC 3 bocas de 1/2 pulg.
- Seis codos lisos de PVC 90° de 1/2 pulg.
- Dos tees de PVC de 1/2 pulg.
- Tubo de PVC de 1/2 pulg.
- Un frasco de pegamento para PVC Durman®.
- Manguera de plástico transparente de 1/2 pulg.
- Doce varillas de madera de 18 cm de largo.
- Veinticuatro correas de amarre plásticas de 6 pulg.
- Doce clips metálicos niquelados.
- Hilo nylon.
- Cedazo plástico de luz de malla de 1 mm.
- Un par de guantes de seguridad de látex marca Kimberly-Clark Professional* Jackson* G40.
- Seis bandas de goma.
- Trozos de fibra de vidrio de 6 cm x 10 cm.
- Doce anillos galvanizados de 1¼ pulg.
- Tijeras de acero inoxidable.
- Un picahielo.
- Una sierra 24T de 12 pulg con marco Stanley®.

Procedimiento

- Adquisición de materiales: se compraron en una Ferretería ubicada en el municipio de Santa Tecla, departamento de La Libertad; los clips metálicos niquelados en una Librería ubicada en el municipio de Antiguo Cuscatlán, departamento de La Libertad.

- Corte del tubo de PVC: se cortaron seis tubos de 60 cm de largo, dos tubos de 20 cm de largo y cuatro tubos de 8 cm de largo, utilizando la sierra y un par de guantes de seguridad de látex. Se llevó a cabo en la residencia del investigador.
- Montaje de las piezas de PVC: se procedió a pegar las piezas (tubos, codos y tees) según diseño propuesto utilizando pegamento para PVC y un par de guantes de seguridad de látex, se dejó curar por 24 horas. Las dimensiones del módulo terminado fueron 66 cm de alto, 66 cm de largo y 25 cm de profundidad. Se llevó a cabo en la residencia del investigador.
- Colocación de las unidades para adsorción en lecho fijo: se cortaron seis piezas de 40 cm de manguera plástica transparente de 1/2 pulg de diámetro interno, a cada una se le colocaron 2 varillas de madera sujetadas por 4 correas de amarre para aumentar la resistencia y garantizar una posición recta, en el interior se colocó la fibra de vidrio doblada de tal manera de obtener un tapón de 3 cm de longitud. Se cortaron seis trozos de 6 cm x 6 cm de cedazo plástico de luz de malla de 1 mm para ser colocado en la parte inferior de cada manguera sujetado por una banda de goma. Se hicieron dos perforaciones en la parte superior de la manguera utilizando un picahielo; se sujetaron las mangueras, que actuarán como columnas, al módulo construido con ayuda de hilo nylon, clips metálicos niquelados y anillos galvanizados de 1¼ pulg. Se utilizó la sierra, tijeras de acero inoxidable y un par de guantes de seguridad de látex. Se llevó a cabo en la residencia del investigador.

4.5.6. Construcción de la cabina de luz

Materiales utilizados

- Dos tablas de 50 cm x 50 cm de plywood de pino de 3/4 pulg.
- Cuatro tuercas mariposa galvanizadas de 1/2 pulg.
- Trece arandelas planas galvanizadas de 3/16 pulg.
- Cuatro arandelas planas galvanizadas de 5/8 pulg.
- Doce grapas plásticas conductor 6 mm para cable coaxial.
- Dos arandelas planas galvanizadas de 3/4 pulg.

- Ocho tuercas hexagonales galvanizadas de 1/2 pulg.
- Cuatro varillas roscadas galvanizadas de 50 cm de longitud de 1/2 pulg.
- Dos luminarias spot canope base GU10 de una luz Tecno Lite®.
- Dos focos LED base GU10 de 5.5 W, 350 lm, 6500 K (luz de día) tecno lite®.
- Un nivel de línea de aluminio de 3 pulg Stanley®.
- Ocho protectores redondos de plástico de 1/2 pulg.
- Cable eléctrico vulcan TSJ 16-2 para conexión industrial.
- Un interruptor superficial de una vía.
- Cinco tapones aislantes roscables.
- Un enchufe macho de 2 espigas planas.
- Tela Italy negro 99.
- Pintura mate negra acrílica.
- Pintura mate blanca acrílica.
- Doce chinchetas niqueladas.
- Lana negra.
- Hilo de coser negro.
- Aguja para coser.
- Tijeras de acero inoxidable.
- Un taladro.
- Una broca espada para madera de 1 pulg.
- Una broca espada para madera de 3/4 pulg.
- Una broca espada para madera de 1/2 pulg.
- Pegamento termofusible.
- Una pistola de pegamento termofusible.
- Una brocha para pintar.
- Una tenaza para pelar cable eléctrico.
- Un par de guantes de seguridad de látex marca Kimberly-Clark Professional* Jackson* G40.

Procedimiento

- Adquisición de materiales: se compraron en una Ferretería ubicada en el municipio de Santa Tecla, departamento de La Libertad; la tela negra, lana negra, aguja para coser e hilo de coser en un Comercio de telas; el pegamento termofusible, las chinchetas niqueladas y la pistola de pegamento en una Librería, ambos ubicados en el municipio de Antiguo Cuscatlán, departamento de La Libertad.

- Preparación de insumos: se perforaron cuatro agujeros de 1/2 pulg de diámetro en los extremos de la tabla inferior de madera, cuatro agujeros de 3/4 pulg de diámetro en los extremos de la tabla superior de madera. En la tabla de madera que se ubicó en la parte superior de la cabina se perforó un agujero central de 1 pulg de diámetro que sirvió para colocar el lente de la cámara del teléfono móvil. Se procedió a pintar con una brocha la tabla superior de color negro y la tabla inferior de color blanco. Se cortó un trozo de 150 cm x 50 cm de tela negra que revistió tres lados de la cabina y un trozo de tela de 50 cm x 50 cm que actuó como cortina en la parte frontal de la cabina. Se utilizó un par de guantes de seguridad de látex, tijeras de acero inoxidable, taladro, brocas espada para madera, aguja para coser e hilo de coser negro. Se llevó a cabo en la residencia del investigador.
- Montaje de la cabina: se ajustaron las cuatro varillas roscadas galvanizadas de 50 cm de longitud de 1/2 pulg en cada uno de los extremos de las dos tablas de madera, utilizando cuatro tuercas mariposa galvanizadas de 1/2 pulg, doce arandelas planas galvanizadas de 3/16 pulg y ocho tuercas hexagonales galvanizadas de 1/2 pulg, en cada extremo de las varillas roscadas se colocó un protector redondo de plástico de 1/2 pulg. Se ubicaron las dos luminarias con sus focos LED en la tabla de la parte superior realizando la conexión eléctrica respectiva en la cara inferior de dicha tabla, utilizando cable eléctrico vulcan TSJ 16-2, cinco tapones aislantes roscables, un interruptor superficial de una vía, doce grapas plásticas conductor 6 mm, así como un enchufe macho. En la tabla superior se colocaron cuatro arandelas planas galvanizadas de 5/8 pulg en los agujeros laterales y dos arandelas planas galvanizadas de 3/4 pulg en el agujero central (arriba y abajo de la tabla). La tela negra fue adherida a los laterales de la tabla superior con pegamento termofusible y diez chinchetas niqueladas, en la cara frontal se sujetó el trozo de tela negra con ayuda de lana negra y dos chinchetas niqueladas. En la parte superior externa se colocó un nivel de línea de aluminio de 3 pulg para garantizar una nivelación horizontal perfecta, en la parte inferior interna se colocó una arandela plana galvanizada de 3/16 pulg para indicar el centro de la cabina. Se utilizó un par de guantes de seguridad de látex y la pistola de pegamento termofusible. Se llevó a cabo en la residencia del investigador.

4.5.7. Ensayos de bioadsorción

4.5.7.1. Obtención de los filtrados

Materiales utilizados

- Un módulo para la adsorción.
- Tres probetas graduadas de vidrio de 50 ml.
- Seis vasos de precipitados de vidrio de 100 ml.
- Un embudo plástico.
- Un reloj digital.
- Un par de guantes de látex desechables.
- Gafas de protección.
- Una espátula de laboratorio.
- Fichas para registro de datos.

Procedimiento

- Se colocaron 20 ml del residuo agroindustrial en estudio de tamaño de partícula < 1 mm en cada una de las seis mangueras plásticas (columnas de adsorción en lecho fijo) utilizando una probeta graduada de vidrio de 50 ml, una espátula de laboratorio y un embudo plástico, se aplicaron pequeños golpes para ajustar el contenido del bioadsorbente dentro de la probeta y manguera.
- Se vertieron 40 ml de solución estándar (50 ppm) ácida ($\text{pH} = 3$) del colorante FD&C Azul No. 1 en las primeras tres columnas, utilizando una probeta graduada de vidrio de 50 ml. Se vertieron 40 ml de solución estándar (50 ppm) alcalina ($\text{pH} = 8$) del colorante FD&C Azul No. 1 en las siguientes tres columnas utilizando una probeta graduada de vidrio de 50 ml. Se dejó un lapso de tiempo de 3 minutos entre ellas; además, se tomó el tiempo que tardó en consumirse la solución sobrenadante a través del lecho. Se utilizó un par de guantes de látex desechables y gafas de protección.
- Se colocaron 20 ml del residuo agroindustrial en estudio de $1 \text{ mm} < \text{tamaño de partícula} < 3 \text{ mm}$ en cada una de las seis mangueras plásticas

(columnas de adsorción en lecho fijo) utilizando una probeta graduada de vidrio de 50 ml, una espátula de laboratorio y un embudo plástico, se aplicaron pequeños golpes para ajustar el contenido del bioadsorbente dentro de la probeta y manguera.

- Se vertieron 40 ml de solución estándar (50 ppm) ácida (pH = 3) del colorante FD&C Azul No. 1 en las primeras tres columnas, utilizando una probeta graduada de vidrio de 50 ml. Se vertieron 40 ml de solución estándar (50 ppm) alcalina (pH = 8) del colorante FD&C Azul No. 1 en las siguientes tres columnas utilizando una probeta graduada de vidrio de 50 ml. Se dejó un lapso de tiempo de 3 minutos entre ellas; además, se tomó el tiempo que tardó en consumirse la solución sobrenadante a través del lecho. Se utilizó un par de guantes de látex desechables y gafas de protección.

- Se colocaron 20 ml del residuo agroindustrial en estudio de tamaño de partícula < 1 mm en cada una de las seis mangueras plásticas (columnas de adsorción en lecho fijo) utilizando una probeta graduada de vidrio de 50 ml, una espátula de laboratorio y un embudo plástico, se aplicaron pequeños golpes para ajustar el contenido del bioadsorbente dentro de la probeta y manguera.

- Se vertieron 40 ml de solución estándar (50 ppm) ácida (pH = 3) del colorante FD&C Rojo No. 40 en las primeras tres columnas, utilizando una probeta graduada de vidrio de 50 ml. Se vertieron 40 ml de solución estándar (50 ppm) alcalina (pH = 8) del colorante FD&C Rojo No. 40 en las siguientes tres columnas utilizando una probeta graduada de vidrio de 50 ml. Se dejó un lapso de tiempo de 3 minutos entre ellas; además, se tomó el tiempo que tardó en consumirse la solución sobrenadante a través del lecho. Se utilizó un par de guantes de látex desechables y gafas de protección.

- Se colocaron 20 ml del residuo agroindustrial en estudio de tamaño de partícula < 3 mm en cada una de las seis mangueras plásticas (columnas de adsorción en lecho fijo) utilizando una probeta graduada de vidrio de 50 ml, una espátula de laboratorio y un embudo plástico, se aplicaron pequeños golpes para ajustar el contenido del bioadsorbente dentro de la probeta y manguera.

- Se vertieron 40 ml de solución estándar (50 ppm) ácida (pH = 3) del colorante FD&C Rojo No. 40 en las primeras tres columnas, utilizando una probeta graduada de vidrio de 50 ml. Se vertieron 40 ml de solución estándar (50 ppm) alcalina (pH = 8) del colorante FD&C Rojo No. 40 en las siguientes tres columnas utilizando una probeta graduada de vidrio de 50 ml. Se dejó un lapso de tiempo de 3 minutos entre ellas; además, se tomó el tiempo que tardó en consumirse la solución sobrenadante a través del lecho. Se utilizó un par de guantes de látex desechables y gafas de protección.
- Los filtrados se recolectaron en vasos de precipitados de 100 ml, transcurridos 20 minutos luego de consumirse la solución sobrenadante a través de los lechos para garantizar una mejor filtración. Se obtuvieron veinticuatro muestras de filtrado por residuo agroindustrial.
- Se realizaron los pasos anteriores utilizando los otros dos residuos agroindustriales. En total, se obtuvieron setenta y dos muestras de filtrado.
- A cada muestra de filtrado (ensayo) se le asignó un código alfanumérico, tomando en cuenta la estructura siguiente:

Letra1 Número1 Letra2 Número2 Letra3 Número3

 donde:
 - Letra1: tipo de residuo agroindustrial. “E” significa escamas de pescado, “O” significa olote, “B” significa brácteas de maíz.
 - Número1: tamaño de partícula del residuo. “1” significa tamaño de partícula < 1 mm, “3” significa 1 mm < tamaño de partícula < 3 mm.
 - Letra2: tipo de colorante. “A” significa FD&C Azul No. 1, “R” significa FD&C Rojo No. 40.
 - Número2: pH de la solución colorante. “3” significa pH = 3 unidades, “8” significa pH = 8 unidades.
 - Letra3: “P” significa prueba (repetición).
 - Número3: “1” significa primera prueba, “2” significa segunda prueba y “3” significa tercera prueba.

- Los resultados se registraron en fichas previamente elaboradas, una para cada columna, conteniendo la siguiente información:
 - Código del ensayo.
 - Residuo agroindustrial.
 - Tipo de colorante.
 - Tamaño de partícula.
 - pH de la solución.
 - Número de prueba (repetición).
 - Hora de inicio de la prueba.
 - Tiempo de consumo del sobrenadante.
 - Volumen de filtrado.
 - Hora de finalización de la prueba.

- Estos ensayos se llevaron a cabo en uno de los laboratorios de Química de una Universidad privada.

4.5.7.2. Obtención de las coordenadas del espacio de color de las soluciones estándar de colorantes

Materiales utilizados

- Soluciones estándar de colorantes: FD&C Azul No. 1 a pH = 3 y a pH = 8, FD&C Rojo No. 40 a pH = 3 y a pH = 8.
- Una cabina de luz.
- Un teléfono móvil.
- Una tapadera plástica blanca de 10.5 cm de diámetro.
- Aplicación "Colorimeter" para teléfono móvil.
- Fichas para registro de datos.

Procedimiento

- Se colocó el teléfono móvil en la parte superior de la cabina, se verificó que el lente de la cámara estuviera sobre el agujero.

- Se encendieron las dos luminarias de la cabina.
- Se ajustó la tabla superior de la cabina a una altura de 27 cm de la base, con ello se pudo verificar que la imagen del teléfono móvil estaba dentro del campo visual, centrada y nítida.
- Se ajustaron las dos luminarias de tal manera que se encontraran a un ángulo de 45° con respecto al lente de la cámara, para evitar así la reflexión especular (brillo).
- Se colocaron alícuotas de soluciones estándar de colorantes a 50 ppm: FD&C Azul No. 1 a pH = 3 y a pH = 8, así como FD&C Rojo No. 40 a pH = 3 y a pH = 8, en una tapadera plástica blanca que actuó como portamuestra. Se realizó por triplicado.
- A cada muestra de solución estándar de colorante se le asignó un código alfanumérico, tomando en cuenta la estructura siguiente:

Letra1 Número1 Letra2 Número2

donde:

 - Letra1: tipo de colorante. “A” significa FD&C Azul No. 1, “R” significa FD&C Rojo No. 40.
 - Número1: pH de la solución colorante. “3” significa pH = 3 unidades, “8” significa pH = 8 unidades.
 - Letra2: “P” significa prueba (repetición).
 - Número2: “1” significa primera prueba, “2” significa segunda prueba y “3” significa tercera prueba.
- La tapadera plástica se introdujo en la cabina, colocándola en posición central.
- Utilizando la aplicación “Colorimeter”, se obtuvieron las coordenadas del espacio de color CIELAB y se registró en fichas conteniendo la siguiente información:
 - Código de la solución estándar.

- Tipo de colorante.
- pH de la solución.
- Número de prueba (repetición).
- L*.
- a*.
- b*.

- Estos ensayos se llevaron a cabo en uno de los laboratorios de Química de una Universidad privada.

4.5.7.3. Obtención de las coordenadas del espacio de color de los filtrados

Materiales utilizados

- Muestras de filtrados.
- Una cabina de luz.
- Un teléfono móvil.
- Una tapadera plástica blanca de 10.5 cm de diámetro.
- Aplicación “Colorimeter” para teléfono móvil.
- Fichas para registro de datos.

Procedimiento

- Se colocó el teléfono móvil en la parte superior de la cabina, se verificó que el lente de la cámara estuviera sobre el agujero.
- Se encendieron las dos luminarias de la cabina.
- Se ajustó la tabla superior de la cabina a una altura de 27 cm de la base, con ello se pudo verificar que la imagen del teléfono móvil estaba dentro del campo visual, centrada y nítida.

- Se ajustaron las dos luminarias de tal manera que se encontraran a un ángulo de 45° con respecto al lente de la cámara, para evitar así la reflexión especular (brillo).
- Cada muestra de filtrado se colocó en la tapadera plástica, se utilizó el mismo código que en el ensayo para la obtención de filtrados.
- La tapadera plástica se introdujo en la cabina, colocándola en posición central.
- Utilizando la aplicación “Colorimeter”, se obtuvieron las coordenadas del espacio de color CIELAB y se registró en fichas conteniendo la siguiente información:
 - Código de la muestra de filtrado.
 - Residuo agroindustrial.
 - Tipo de colorante.
 - Tamaño de partícula.
 - pH de la solución.
 - Número de prueba (repetición).
 - L*
 - a*.
 - b*.
- Estos ensayos se llevaron a cabo en uno de los laboratorios de Química de una Universidad privada.
- Se calculó la diferencia de color ΔE^*_{ab} entre la solución estándar y cada muestra de filtrado, utilizando la fórmula:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

4.5.8. Análisis estadístico de los datos.

Cada prueba se realizó por triplicado, calculando así el promedio de las diferencias de color ΔE^*_{ab} entre las soluciones estándar de colorante y las muestras de filtrados.

Se aplicó Análisis de Varianza (ANOVA) a los promedios de las diferencias de color ΔE^*_{ab} , utilizando 3 tipos de diseños experimentales:

- Diseño factorial 2^k , donde k representa a los factores (tamaño de partícula y pH), cada uno con 2 niveles (bajo y alto), realizado para cada colorante (FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40) y por cada residuo agroindustrial (escamas de pescado, olote y brácteas de maíz), resultando así 6 análisis estadísticos. El objetivo fue evaluar la interacción de los niveles de los factores.
- Diseño completamente al azar, se realizaron 2 análisis estadísticos, uno por cada colorante. El objetivo fue establecer si existía diferencia significativa entre los promedios de la diferencia de color de los residuos agroindustriales por cada uno de los colorantes estudiados.
- Diseño de bloques completamente al azar, un único análisis estadístico, siendo los bloques cada colorante y los tratamientos cada uno de los residuos agroindustriales. El objetivo fue comprobar si existía diferencia significativa entre los promedios de la diferencia de color de los residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes.

4.6. Hipótesis de trabajo

a. Para el diseño factorial 2^k , las hipótesis planteadas fueron:

- H_0 : No hay interacción entre los factores: tamaño de partícula y pH para el colorante FD&C Azul No. 1 correspondiente a las escamas de pescado.
- H_1 : Hay interacción entre los factores: tamaño de partícula y pH para el colorante FD&C Azul No. 1 correspondiente a las escamas de pescado.
- H_0 : No hay interacción entre los factores: tamaño de partícula y pH para el colorante FD&C Azul No. 1 correspondiente al olote.
- H_1 : Hay interacción entre los factores: tamaño de partícula y pH para el colorante FD&C Azul No. 1 correspondiente al olote.

- H_0 : No hay interacción entre los factores: tamaño de partícula y pH para el colorante FD&C Azul No. 1 correspondiente a las brácteas de maíz.
- H_1 : Hay interacción entre los factores: tamaño de partícula y pH para el colorante FD&C Azul No. 1 correspondiente a las brácteas de maíz.
- H_0 : No hay interacción entre los factores: tamaño de partícula y pH para el colorante FD&C Rojo No. 40 correspondiente a las escamas de pescado.
- H_1 : Hay interacción entre los factores: tamaño de partícula y pH para el colorante FD&C Rojo No. 40 correspondiente a las escamas de pescado.
- H_0 : No hay interacción entre los factores: tamaño de partícula y pH para el colorante FD&C Rojo No. 40 correspondiente al olote.
- H_1 : Hay interacción entre los factores: tamaño de partícula y pH para el colorante FD&C Rojo No. 40 correspondiente al olote.
- H_0 : No hay interacción entre los factores: tamaño de partícula y pH para el colorante FD&C Rojo No. 40 correspondiente a las brácteas de maíz.
- H_1 : Hay interacción entre los factores: tamaño de partícula y pH para el colorante FD&C Rojo No. 40 correspondiente a las brácteas de maíz.

b. Para el diseño completamente al azar, las hipótesis planteadas fueron:

- H_0 : No existe diferencia significativa entre los promedios de la diferencia de color de los residuos agroindustriales para el colorante FD&C Azul No. 1.
- H_1 : Sí existe diferencia significativa entre los promedios de la diferencia de color de los residuos agroindustriales para el colorante FD&C Azul No. 1.
- H_0 : No existe diferencia significativa entre los promedios de la diferencia de color de los residuos agroindustriales para el colorante FD&C Rojo No. 40.
- H_1 : Sí existe diferencia significativa entre los promedios de la diferencia de color de los residuos agroindustriales para el colorante FD&C Rojo No. 40.

c. Para el diseño de bloques completamente al azar, las hipótesis planteadas fueron:

- H_0 : No existe diferencia significativa entre los promedios de la diferencia de color de los residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes.
- H_1 : Sí existe diferencia significativa entre los promedios de la diferencia de color de los residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

Este capítulo reúne los datos obtenidos de las diferentes pruebas a las que fueron sometidos los tres residuos agroindustriales (escamas de pescado, olote y brácteas de maíz); primeramente, su caracterización como humedad en base seca y base húmeda antes y después del secado, previo a los ensayos de bioadsorción. Se muestran los volúmenes y tiempos transcurridos para cada uno de los ensayos, contrastando el tipo y tamaño de residuo agroindustrial, así como el tipo y pH de las soluciones de colorantes, que permitieron calcular la diferencia de color entre estándares y filtrados. Para terminar, se muestran los datos estadísticos, en tablas y figuras, obtenidos mediante el programa IBM SPSS Statistics 22.0 según el diseño experimental considerado.

5.1. Caracterización de los bioadsorbentes

En la Tabla 5.1. se muestra la cantidad de residuos agroindustriales tratados en toda la investigación. En las Tablas 5.2. a 5.7. se muestran los datos del análisis de humedad de los productos frescos y secos, la Tabla 5.8. constituye un consolidado a manera de resumen de los análisis de humedad realizados, es importante destacar que cada prueba se realizó por triplicado.

Tabla 5.1.

Cantidad de materias primas

Residuo agroindustrial	Fresco (g)	Seco (g)
Escamas de pescado	3512	1736
Olote	10132	2070
Brácteas de maíz	5127	1521

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.2.

Análisis de humedad de las escamas de pescado frescas

Medición	P1	P2	P3
Temperatura de secado (°C)	120	120	120
Masa inicial (g)	4.016	4.055	4.019
Masa final (g)	1.764	1.789	1.779
Tiempo de secado (min)	34.00	35.35	34.08
Humedad en base húmeda (%)	56.065	55.871	55.735
Humedad en base seca (%)	127.607	126.607	125.913
Promedio de humedad en base húmeda (%)	55.890		
Promedio de humedad en base seca (%)	126.709		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.3.*Análisis de humedad del olote fresco*

Medición	P1	P2	P3
Temperatura de secado (°C)	120	120	120
Masa inicial (g)	3.094	3.006	3.020
Masa final (g)	0.608	0.574	0.637
Tiempo de secado (min)	61.33	65.33	66.83
Humedad en base húmeda (%)	80.336	80.905	78.907
Humedad en base seca (%)	408.552	423.693	374.097
Promedio de humedad en base húmeda (%)	80.049		
Promedio de humedad en base seca (%)	402.114		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.4.*Análisis de humedad de las brácteas de maíz frescas*

Medición	P1	P2	P3
Temperatura de secado (°C)	120	120	120
Masa inicial (g)	3.007	3.009	3.001
Masa final (g)	0.798	0.819	0.817
Tiempo de secado (min)	18.50	23.58	23.17
Humedad en base húmeda (%)	73.453	72.754	72.758
Humedad en base seca (%)	276.691	267.032	267.074
Promedio de humedad en base húmeda (%)	72.988		
Promedio de humedad en base seca (%)	270.266		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.5.*Análisis de humedad de las escamas de pescado secas*

Medición	P1	P2	P3
Temperatura de secado (°C)	120	120	120
Masa inicial (g)	2.084	2.033	2.032
Masa final (g)	1.855	1.808	1.807
Tiempo de secado (min)	11.17	12.75	11.83
Humedad en base húmeda (%)	10.988	11.067	11.073
Humedad en base seca (%)	12.345	12.444	12.451
Promedio de humedad en base húmeda (%)	11.043		
Promedio de humedad en base seca (%)	12.413		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.6.*Análisis de humedad del olote seco*

Medición	P1	P2	P3
Temperatura de secado (°C)	120	120	120
Masa inicial (g)	3.077	3.002	3.072
Masa final (g)	2.872	2.801	2.874
Tiempo de secado (min)	16.50	16.25	14.08
Humedad en base húmeda (%)	6.662	6.727	6.415
Humedad en base seca (%)	7.138	7.212	6.855
Promedio de humedad en base húmeda (%)	6.601		
Promedio de humedad en base seca (%)	7.068		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.7.*Análisis de humedad las brácteas de maíz secas*

Medición	P1	P2	P3
Temperatura de secado (°C)	120	120	120
Masa inicial (g)	2.009	2.034	2.016
Masa final (g)	1.839	1.863	1.845
Tiempo de secado (min)	7.08	6.67	6.75
Humedad en base húmeda (%)	8.507	8.362	8.482
Humedad en base seca (%)	9.298	9.125	9.268
Promedio de humedad en base húmeda (%)	8.450		
Promedio de humedad en base seca (%)	9.230		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.8.*Resumen: análisis de humedad de los productos frescos y secos*

Residuo agroindustrial	Producto fresco		Producto seco	
	Humedad promedio en base húmeda (%)	Humedad promedio en base seca (%)	Humedad promedio en base húmeda (%)	Humedad promedio en base seca (%)
Escamas de pescado	55.890	126.709	11.043	12.413
Olote	80.049	402.114	6.601	7.068
Brácteas de maíz	72.988	270.266	8.450	9.230

Nota: Elaboración propia.

5.2. Ensayos de bioadsorción

En las Tablas 5.9. a 5.12., se muestran los datos correspondientes a las coordenadas del espacio de color CIELAB para las soluciones estándar de colorante FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40; en las Tablas 5.13. a 5.36., se muestran los parámetros cuantificados en los ensayos y las coordenadas del espacio de color CIELAB para los filtrados, según el tipo de residuo agroindustrial, tamaño de partícula, tipo de colorante y pH. En las Tablas 5.37. a 5.39. se muestra, a manera de resumen, la caracterización de los ensayos de bioadsorción para cada residuo agroindustrial y en las Tablas 5.40. a 5.42. se muestran, como un consolidado, los promedios de las coordenadas del espacio de color de estándares y filtrados para cada uno de los residuos agroindustriales. Es importante destacar que cada prueba se realizó por triplicado.

Tabla 5.9.

Obtención de las coordenadas del espacio de color de la solución estándar ácida del colorante FD&C Azul No. 1

Código de la solución estándar	A3P1	A3P2	A3P3
pH de la solución	3	3	3
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Coordenada L*	+58.9	+58.5	+59.6
Coordenada a*	-8.6	-8.4	-8.2
Coordenada b*	-43.8	-43.8	-44.8
Imagen del color			
Promedio de valores L*a*b*	L*: +59.0	a*: -8.4	b*: -44.1
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	A3		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.10.

Obtención de las coordenadas del espacio de color de la solución estándar alcalina del colorante FD&C Azul No. 1

Código de la solución estándar	A8P1	A8P2	A8P3
pH de la solución	8	8	8
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Coordenada L*	+58.4	+60.1	+58.1
Coordenada a*	-3.8	-4.9	-3.3
Coordenada b*	-49.0	-49.0	-49.5
Imagen del color			
Promedio de valores L*a*b*	L*: +58.9	a*: -4.0	b*: -49.2
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	A8		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.11.

Obtención de las coordenadas del espacio de color de la solución estándar ácida del colorante FD&C Rojo No. 40

Código de la solución estándar	R3P1	R3P2	R3P3
pH de la solución	3	3	3
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Coordenada L*	+40.4	+40.5	+36.0
Coordenada a*	+60.2	+59.9	+56.8
Coordenada b*	+47.1	+48.4	+44.8
Imagen del color			
Promedio de valores L*a*b*	L*: +39.0	a*: +59.0	b*: +46.8
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	R3		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.12.

Obtención de las coordenadas del espacio de color de la solución estándar alcalina del colorante FD&C Rojo No. 40

Código de la solución estándar	R8P1	R8P2	R8P3
pH de la solución	8	8	8
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Coordenada L*	+41.1	+40.2	+34.8
Coordenada a*	+60.0	+59.8	+56.5
Coordenada b*	+49.0	+48.5	+45.5
Imagen del color			
Promedio de valores L*a*b*	L*: +38.7	a*: +58.8	b*: +47.7
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	R8		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.13.

Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Azul No. 1 para escamas de pescado $T < 1$ mm y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	E1A3P1	E1A3P2	E1A3P3
Tamaño de partícula	< 1 mm	< 1 mm	< 1 mm
pH de la solución	3	3	3
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	141.80 min	156.42 min	167.32 min
Caudal de sobrenadante	0.28 ml/min	0.26 ml/min	0.24 ml/min
Volumen de filtrado	24.0 ml	24.5 ml	24.5 ml
Coordenada L*	+82.8	+83.5	+85.6
Coordenada a*	+0.0	+0.0	+0.0
Coordenada b*	-0.0	-0.0	-0.0
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	155.18 min		
Caudal promedio de sobrenadante	0.26 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	24.3 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +84.0	a*: +0.0	b*: -0.0
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	E1A3		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.14.

Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Azul No. 1 para escamas de pescado $T < 1$ mm y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	E1A8P1	E1A8P2	E1A8P3
Tamaño de partícula	< 1 mm	< 1 mm	< 1 mm
pH de la solución	8	8	8
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	158.20 min	132.30 min	161.78 min
Caudal de sobrenadante	0.25 ml/min	0.30 ml/min	0.25 ml/min
Volumen de filtrado	24.0 ml	23.5 ml	24.0 ml
Coordenada L*	+81.7	+82.4	+81.0
Coordenada a*	+0.0	+0.0	+0.0
Coordenada b*	-0.0	-0.0	-0.0
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	150.76 min		
Caudal promedio de sobrenadante	0.27 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	23.8 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +81.7	a*: +0.0	b*: -0.0
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	E1A8		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.15.

Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Azul No. 1 para escamas de pescado 1 mm $< T < 3$ mm y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	E3A3P1	E3A3P2	E3A3P3
Tamaño de partícula	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm
pH de la solución	3	3	3
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	1.12 min	1.00 min	1.20 min
Caudal de sobrenadante	35.71 ml/min	40.00 ml/min	33.33 ml/min
Volumen de filtrado	32.0 ml	32.5 ml	32.5 ml
Coordenada L*	+68.8	+68.1	+69.1
Coordenada a*	-22.7	-22.0	-22.8
Coordenada b*	-33.3	-33.7	-33.3
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	1.11 min		
Caudal promedio de sobrenadante	36.35 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	32.3 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +68.7	a*: -22.5	b*: -33.4
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	E3A3		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.16.

Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Azul No. 1 para escamas de pescado $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	E3A8P1	E3A8P2	E3A8P3
Tamaño de partícula	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm
pH de la solución	8	8	8
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	0.80 min	1.32 min	0.93 min
Caudal de sobrenadante	50.00 ml/min	30.30 ml/min	43.01 ml/min
Volumen de filtrado	32.5 ml	32.5 ml	32.0 ml
Coordenada L*	+64.1	+68.7	+66.7
Coordenada a*	-13.8	-20.1	-15.6
Coordenada b*	-41.1	-36.6	-40.8
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	1.02 min		
Caudal promedio de sobrenadante	41.10 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	32.3 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +66.5	a*: -16.5	b*: -39.5
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	E3A8		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.17.

Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Rojo No. 40 para escamas de pescado $T < 1\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	E1R3P1	E1R3P2	E1R3P3
Tamaño de partícula	< 1 mm	< 1 mm	< 1 mm
pH de la solución	3	3	3
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	157.53 min	115.17 min	127.80 min
Caudal de sobrenadante	0.25 ml/min	0.35 ml/min	0.31 ml/min
Volumen de filtrado	24.5 ml	23.5 ml	23.5 ml
Coordenada L*	+85.0	+84.9	+84.6
Coordenada a*	+0.0	+0.0	+0.0
Coordenada b*	-0.0	-0.0	-0.0
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	133.50 min		
Caudal promedio de sobrenadante	0.30 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	23.8 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +84.8	a*: +0.0	b*: -0.0
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	E1R3		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.18.

Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Rojo No. 40 para escamas de pescado $T < 1$ mm y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	E1R8P1	E1R8P2	E1R8P3
Tamaño de partícula	< 1 mm	< 1 mm	< 1 mm
pH de la solución	8	8	8
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	141.30 min	130.70 min	146.17 min
Caudal de sobrenadante	0.28 ml/min	0.31 ml/min	0.27 ml/min
Volumen de filtrado	23.0 ml	22.5 ml	23.0 ml
Coordenada L*	+83.8	+82.8	+83.5
Coordenada a*	+0.0	+0.0	+0.0
Coordenada b*	-0.0	-0.0	-0.0
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	139.39 min		
Caudal promedio de sobrenadante	0.29 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	22.8 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +83.4	a*: +0.0	b*: -0.0
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	E1R8		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.19.

Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Rojo No. 40 para escamas de pescado 1 mm $< T < 3$ mm y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	E3R3P1	E3R3P2	E3R3P3
Tamaño de partícula	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm
pH de la solución	3	3	3
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	1.23 min	2.57 min	2.10 min
Caudal de sobrenadante	32.52 ml/min	15.56 ml/min	19.05 ml/min
Volumen de filtrado	33.0 ml	33.0 ml	32.5 ml
Coordenada L*	+46.1	+46.5	+46.4
Coordenada a*	+64.4	+63.1	+63.4
Coordenada b*	+59.2	+59.3	+59.3
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	1.97 min		
Caudal promedio de sobrenadante	22.38 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	32.8 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +46.3	a*: +63.6	b*: +59.3
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	E3R3		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.20.

Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Rojo No. 40 para escamas de pescado $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	E3R8P1	E3R8P2	E3R8P3
Tamaño de partícula	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm
pH de la solución	8	8	8
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	2.48 min	1.72 min	1.27 min
Caudal de sobrenadante	16.13 ml/min	23.26 ml/min	31.50 ml/min
Volumen de filtrado	34.0 ml	33.0 ml	33.5 ml
Coordenada L*	+44.2	+42.2	+42.8
Coordenada a*	+64.7	+63.3	+63.4
Coordenada b*	+57.7	+55.9	+56.4
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	1.82 min		
Caudal promedio de sobrenadante	23.63 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	33.50 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +43.1	a*: +63.8	b*: +56.7
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	E3R8		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.21.

Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Azul No. 1 para olote $T < 1\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	O1A3P1	O1A3P2	O1A3P3
Tamaño de partícula	< 1 mm	< 1 mm	< 1 mm
pH de la solución	3	3	3
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	484.20 min	597.30 min	499.55 min
Caudal de sobrenadante	0.08 ml/min	0.07 ml/min	0.08 ml/min
Volumen de filtrado	18.5 ml	19.5 ml	19.5 ml
Coordenada L*	+79.9	+78.3	+77.6
Coordenada a*	-4.1	-3.2	-3.2
Coordenada b*	+7.0	+6.8	+6.8
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	527.02 min		
Caudal promedio de sobrenadante	0.08 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	19.2 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +78.6	a*: -3.5	b*: +6.9
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	O1A3		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.22.

Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Azul No. 1 para olote $T < 1 \text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	O1A8P1	O1A8P2	O1A8P3
Tamaño de partícula	< 1 mm	< 1 mm	< 1 mm
pH de la solución	8	8	8
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	679.08 min	818.28 min	867.78 min
Caudal de sobrenadante	0.06 ml/min	0.05 ml/min	0.05 ml/min
Volumen de filtrado	20.0 ml	20.5 ml	20.5 ml
Coordenada L*	+62.1	+62.4	+63.8
Coordenada a*	-24.0	-24.6	-25.6
Coordenada b*	-26.4	-25.9	-25.6
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	788.38 min		
Caudal promedio de sobrenadante	0.05 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	20.3 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +62.8	a*: -24.7	b*: -26.0
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	O1A8		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.23.

Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Azul No. 1 para olote $1 \text{ mm} < T < 3 \text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	O3A3P1	O3A3P2	O3A3P3
Tamaño de partícula	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm
pH de la solución	3	3	3
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	4.37 min	3.38 min	3.13 min
Caudal de sobrenadante	9.15 ml/min	11.83 ml/min	12.78 ml/min
Volumen de filtrado	27.5 ml	27.5 ml	28.0 ml
Coordenada L*	+67.5	+67.9	+68.6
Coordenada a*	-24.5	-24.0	-23.7
Coordenada b*	-29.8	-30.8	-31.8
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	3.63 min		
Caudal promedio de sobrenadante	11.25 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	27.7 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +68.0	a*: -24.1	b*: -30.8
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	O3A3		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.24.

Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Azul No. 1 para olote $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	O3A8P1	O3A8P2	O3A8P3
Tamaño de partícula	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm
pH de la solución	8	8	8
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	4.10 min	9.17 min	18.92 min
Caudal de sobrenadante	9.76 ml/min	4.36 ml/min	2.11 ml/min
Volumen de filtrado	27.5 ml	28.0 ml	27.0 ml
Coordenada L*	+64.7	+65.4	+64.4
Coordenada a*	-17.2	-17.6	-19.7
Coordenada b*	-37.3	-37.4	-33.9
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	10.73 min		
Caudal promedio de sobrenadante	5.41 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	27.5 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +64.8	a*: -18.2	b*: -36.2
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	O3A8		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.25.

Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Rojo No. 40 para olote $T < 1\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	O1R3P1	O1R3P2	O1R3P3
Tamaño de partícula	< 1 mm	< 1 mm	< 1 mm
pH de la solución	3	3	3
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	548.70 min	483.63 min	429.17 min
Caudal de sobrenadante	0.07 ml/min	0.08 ml/min	0.09 ml/min
Volumen de filtrado	21.5 ml	20.5 ml	21.5 ml
Coordenada L*	+58.4	+61.6	+59.0
Coordenada a*	+45.0	+36.6	+45.6
Coordenada b*	+39.8	+32.7	+41.2
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	487.17 min		
Caudal promedio de sobrenadante	0.08 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	21.2 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +59.7	a*: +42.4	b*: +37.9
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	O1R3		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.26.

Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Rojo No. 40 para olote $T < 1 \text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	O1R8P1	O1R8P2	O1R8P3
Tamaño de partícula	< 1 mm	< 1 mm	< 1 mm
pH de la solución	8	8	8
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	568.42 min	786.62 min	621.97 min
Caudal de sobrenadante	0.07 ml/min	0.05 ml/min	0.06 ml/min
Volumen de filtrado	21.0 ml	21.0 ml	21.0 ml
Coordenada L*	+47.8	+48.0	+49.1
Coordenada a*	+64.6	+63.2	+64.4
Coordenada b*	+60.6	+60.6	+61.6
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	659.00 min		
Caudal promedio de sobrenadante	0.06 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	21.0 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +48.3	a*: +64.1	b*: +60.9
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	O1R8		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.27.

Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Rojo No. 40 para olote $1 \text{ mm} < T < 3 \text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	O3R3P1	O3R3P2	O3R3P3
Tamaño de partícula	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm
pH de la solución	3	3	3
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	4.07 min	3.87 min	4.48 min
Caudal de sobrenadante	9.83 ml/min	10.34 ml/min	8.93 ml/min
Volumen de filtrado	28.5 ml	29.0 ml	29.0 ml
Coordenada L*	+42.8	+42.3	+37.5
Coordenada a*	+62.0	+61.7	+59.6
Coordenada b*	+52.3	+50.4	+49.5
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	4.14 min		
Caudal promedio de sobrenadante	9.70 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	28.8 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +40.9	a*: +61.1	b*: +50.7
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	O3R3		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.28.

Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Rojo No. 40 para olote $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	O3R8P1	O3R8P2	O3R8P3
Tamaño de partícula	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm
pH de la solución	8	8	8
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	3.27 min	2.20 min	2.63 min
Caudal de sobrenadante	12.23 ml/min	18.18 ml/min	15.21 ml/min
Volumen de filtrado	29.5 ml	29.5 ml	29.0 ml
Coordenada L*	+40.8	+42.0	+41.0
Coordenada a*	+60.0	+60.9	+60.9
Coordenada b*	+48.3	+50.0	+49.5
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	2.70 min		
Caudal promedio de sobrenadante	15.21 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	29.3 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +41.3	a*: +60.6	b*: +49.3
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	O3R8		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.29.

Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Azul No. 1 para brácteas de maíz $T < 1\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	B1A3P1	B1A3P2	B1A3P3
Tamaño de partícula	< 1 mm	< 1 mm	< 1 mm
pH de la solución	3	3	3
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	431.38 min	595.70 min	621.30 min
Caudal de sobrenadante	0.09 ml/min	0.07 ml/min	0.06 ml/min
Volumen de filtrado	20.5 ml	21.0 ml	22.0 ml
Coordenada L*	+76.4	+77.5	+76.2
Coordenada a*	-5.7	-5.6	-4.8
Coordenada b*	+10.5	+10.5	+10.2
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	549.46 min		
Caudal promedio de sobrenadante	0.07 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	21.2 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +76.7	a*: -5.4	b*: +10.4
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	B1A3		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.30.

Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Azul No. 1 para brácteas de maíz $T < 1$ mm y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	B1A8P1	B1A8P2	B1A8P3
Tamaño de partícula	< 1 mm	< 1 mm	< 1 mm
pH de la solución	8	8	8
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	643.77 min	652.48 min	638.20 min
Caudal de sobrenadante	0.06 ml/min	0.06 ml/min	0.06 ml/min
Volumen de filtrado	20.5 ml	20.5 ml	21.5 ml
Coordenada L*	+60.2	+64.6	+62.2
Coordenada a*	-28.1	-34.9	-29.8
Coordenada b*	-19.2	-12.7	-18.4
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	644.82 min		
Caudal promedio de sobrenadante	0.06 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	20.8 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +62.3	a*: -30.9	b*: -16.8
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	B1A8		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.31.

Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Azul No. 1 para brácteas de maíz 1 mm < T < 3 mm y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	B3A3P1	B3A3P2	B3A3P3
Tamaño de partícula	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm
pH de la solución	3	3	3
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	3.10 min	3.83 min	4.00 min
Caudal de sobrenadante	12.90 ml/min	10.44 ml/min	10.00 ml/min
Volumen de filtrado	30.0 ml	30.0 ml	29.5 ml
Coordenada L*	+76.3	+75.1	+76.0
Coordenada a*	-24.3	-23.0	-23.8
Coordenada b*	-36.7	-37.5	-37.1
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	3.64 min		
Caudal promedio de sobrenadante	11.11 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	29.8 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +75.8	a*: -23.7	b*: -37.1
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	B3A3		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.32.

Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Azul No. 1 para brácteas de maíz $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	B3A8P1	B3A8P2	B3A8P3
Tamaño de partícula	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm
pH de la solución	8	8	8
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	4.42 min	3.92 min	3.50 min
Caudal de sobrenadante	9.05 ml/min	10.20 ml/min	11.43 ml/min
Volumen de filtrado	29.5 ml	30.0 ml	30.5 ml
Coordenada L*	+71.5	+70.0	+69.7
Coordenada a*	-20.4	-18.5	-17.6
Coordenada b*	-38.2	-39.6	-40.5
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	3.95 min		
Caudal promedio de sobrenadante	10.23 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	30.0 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +70.4	a*: -18.8	b*: -39.4
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	B3A8		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.33.

Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Rojo No. 40 para brácteas de maíz $T < 1\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	B1R3P1	B1R3P2	B1R3P3
Tamaño de partícula	< 1 mm	< 1 mm	< 1 mm
pH de la solución	3	3	3
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	433.20 min	363.60 min	445.67 min
Caudal de sobrenadante	0.09 ml/min	0.11 ml/min	0.09 ml/min
Volumen de filtrado	21.5 ml	20.5 ml	22.0 ml
Coordenada L*	+54.6	+54.8	+55.5
Coordenada a*	+51.7	+52.8	+53.4
Coordenada b*	+47.6	+48.3	+48.7
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	414.16 min		
Caudal promedio de sobrenadante	0.10 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	21.3 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +55.0	a*: +52.6	b*: +48.2
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	B1R3		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.34.

Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Rojo No. 40 para brácteas de maíz $T < 1$ mm y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	B1R8P1	B1R8P2	B1R8P3
Tamaño de partícula	< 1 mm	< 1 mm	< 1 mm
pH de la solución	8	8	8
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	277.30 min	251.82 min	208.58 min
Caudal de sobrenadante	0.14 ml/min	0.16 ml/min	0.19 ml/min
Volumen de filtrado	22.5 ml	22.5 ml	21.0 ml
Coordenada L*	+46.9	+47.4	+47.0
Coordenada a*	+64.5	+64.8	+63.5
Coordenada b*	+59.9	+60.3	+59.8
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	245.90 min		
Caudal promedio de sobrenadante	0.16 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	22.0 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +47.1	a*: +64.3	b*: +60.0
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	B1R8		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.35.

Obtención de los filtrados ácidos del colorante FD&C Rojo No. 40 para brácteas de maíz 1 mm $< T < 3$ mm y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	B3R3P1	B3R3P2	B3R3P3
Tamaño de partícula	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm
pH de la solución	3	3	3
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	3.33 min	4.08 min	4.70 min
Caudal de sobrenadante	12.01 ml/min	9.80 ml/min	8.51 ml/min
Volumen de filtrado	28.0 ml	29.0 ml	30.0 ml
Coordenada L*	+38.7	+38.6	+42.0
Coordenada a*	+59.7	+59.0	+61.6
Coordenada b*	+49.9	+51.9	+50.5
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	4.04 min		
Caudal promedio de sobrenadante	10.11 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	29.0 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +39.8	a*: +60.1	b*: +50.8
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	B3R3		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.36.

Obtención de los filtrados alcalinos del colorante FD&C Rojo No. 40 para brácteas de maíz $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$ y sus coordenadas del espacio de color

Código del ensayo	B3R8P1	B3R8P2	B3R8P3
Tamaño de partícula	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm	1 mm < T < 3 mm
pH de la solución	8	8	8
Número de prueba (repetición)	1	2	3
Tiempo de consumo del sobrenadante	3.28 min	5.25 min	4.00 min
Caudal de sobrenadante	12.20 ml/min	7.62 ml/min	10.00 ml/min
Volumen de filtrado	29.5 ml	29.5 ml	30.5 ml
Coordenada L*	+35.4	+39.9	+36.5
Coordenada a*	+56.8	+60.0	+58.8
Coordenada b*	+45.3	+47.4	+47.8
Imagen del color			
Tiempo promedio de consumo del sobrenadante	4.18 min		
Caudal promedio de sobrenadante	9.94 ml/min		
Volumen promedio de filtrado	29.8 ml		
Promedio de valores L*a*b*	L*: +37.3	a*: +58.5	b*: +46.8
Imagen del color promedio			
Código de la muestra promedio	B3R8		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.37.

Resumen: caracterización de los ensayos de bioadsorción para escamas de pescado

Código de la muestra	Tiempo promedio de consumo del sobrenadante (min)	Caudal promedio de sobrenadante (ml/min)	Volumen promedio de filtrado (ml)
E1A3	155.18	0.26	24.3
E1A8	150.76	0.27	23.8
E3A3	1.11	36.35	32.3
E3A8	1.02	41.10	32.3
E1R3	133.50	0.30	23.8
E1R8	139.39	0.29	22.8
E3R3	1.97	22.38	32.8
E3R8	1.82	23.63	33.5

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.38.*Resumen: caracterización de los ensayos de bioadsorción para olote*

Código de la muestra	Tiempo promedio de consumo del sobrenadante (min)	Caudal promedio de sobrenadante (ml/min)	Volumen promedio de filtrado (ml)
O1A3	527.02	0.08	19.2
O1A8	788.38	0.05	20.3
O3A3	3.63	11.25	27.7
O3A8	10.73	5.41	27.5
O1R3	487.17	0.08	21.2
O1R8	659.00	0.06	21.0
O3R3	4.14	9.70	28.8
O3R8	2.70	15.21	29.3

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.39.*Resumen: caracterización de los ensayos de bioadsorción para brácteas de maíz*

Código de la muestra	Tiempo promedio de consumo del sobrenadante (min)	Caudal promedio de sobrenadante (ml/min)	Volumen promedio de filtrado (ml)
B1A3	549.46	0.07	21.2
B1A8	644.82	0.06	20.8
B3A3	3.64	11.11	29.8
B3A8	3.95	10.23	30.0
B1R3	414.16	0.10	21.3
B1R8	245.90	0.16	22.0
B3R3	4.04	10.11	29.0
B3R8	4.18	9.94	29.8

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.40.*Resumen: promedio de las coordenadas del espacio de color de estándares y filtrados para escamas de pescado*

Código de la muestra	Tipo de solución	Coordenada L*	Coordenada a*	Coordenada b*	Imagen del color
A3	estándar	+59.0	-8.4	-44.1	
E1A3	filtrado	+84.0	+0.0	-0.0	
A8	estándar	+58.9	-4.0	-49.2	
E1A8	filtrado	+81.7	+0.0	-0.0	
A3	estándar	+59.0	-8.4	-44.1	
E3A3	filtrado	+68.7	-22.5	-33.4	
A8	estándar	+58.9	-4.0	-49.2	
E3A8	filtrado	+66.5	-16.5	-39.5	
R3	estándar	+39.0	+59.0	+46.8	
E1R3	filtrado	+84.8	+0.0	-0.0	
R8	estándar	+38.7	+58.8	+47.7	
E1R8	filtrado	+83.4	+0.0	-0.0	
R3	estándar	+39.0	+59.0	+46.8	
E3R3	filtrado	+46.3	+63.6	+59.3	
R8	estándar	+38.7	+58.8	+47.7	
E3R8	filtrado	+43.1	+63.8	+56.7	

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.41.

Resumen: promedio de las coordenadas del espacio de color de estándares y filtrados para olote

Código de la muestra	Tipo de solución	Coordenada L*	Coordenada a*	Coordenada b*	Imagen del color
A3	estándar	+59.0	-8.4	-44.1	
O1A3	filtrado	+78.6	-3.5	+6.9	
A8	estándar	+58.9	-4.0	-49.2	
O1A8	filtrado	+62.8	-24.7	-26.0	
A3	estándar	+59.0	-8.4	-44.1	
O3A3	filtrado	+68.0	-24.1	-30.8	
A8	estándar	+58.9	-4.0	-49.2	
O3A8	filtrado	+64.8	-18.2	-36.2	
R3	estándar	+39.0	+59.0	+46.8	
O1R3	filtrado	+59.7	+42.4	+37.9	
R8	estándar	+38.7	+58.8	+47.7	
O1R8	filtrado	+48.3	+64.1	+60.9	
R3	estándar	+39.0	+59.0	+46.8	
O3R3	filtrado	+40.9	+61.1	+50.7	
R8	estándar	+38.7	+58.8	+47.7	
O3R8	filtrado	+41.3	+60.6	+49.3	

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.42.

Resumen: promedio de las coordenadas del espacio de color de estándares y filtrados para brácteas de maíz

Código de la muestra	Tipo de solución	Coordenada L*	Coordenada a*	Coordenada b*	Imagen del color
A3	estándar	+59.0	-8.4	-44.1	
B1A3	filtrado	+76.7	-5.4	+10.4	
A8	estándar	+58.9	-4.0	-49.2	
B1A8	filtrado	+62.3	-30.9	-16.8	
A3	estándar	+59.0	-8.4	-44.1	
B3A3	filtrado	+75.8	-23.7	-37.1	
A8	estándar	+58.9	-4.0	-49.2	
B3A8	filtrado	+70.4	-18.8	-39.4	
R3	estándar	+39.0	+59.0	+46.8	
B1R3	filtrado	+55.0	+52.6	+48.2	
R8	estándar	+38.7	+58.8	+47.7	
B1R8	filtrado	+47.1	+64.3	+60.0	
R3	estándar	+39.0	+59.0	+46.8	
B3R3	filtrado	+39.8	+60.1	+50.8	
R8	estándar	+38.7	+58.8	+47.7	
B3R8	filtrado	+37.3	+58.5	+46.8	

Nota: Elaboración propia.

5.3. Cálculo de la diferencia de color (ΔE^*ab)

En las Tablas 5.43. a 5.48., se muestran los datos resultantes del cálculo de la diferencia de color (ΔE^*ab) entre estándar y filtrado para FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40, tomando en cuenta cada uno de los tres residuos agroindustriales. Es importante destacar que cada prueba se realizó por triplicado.

Tabla 5.43.

*Cálculo de la diferencia de color (ΔE^*ab) entre estándar y filtrado para colorante FD&C Azul No. 1 en escamas de pescado*

Código de la muestra	Coordenada L*	Coordenada a*	Coordenada b*	ΔE^*ab	ΔE^*ab promedio
A3P1	58.9	-8.6	-43.8	50.6	51.4
E1A3P1	82.8	0.0	0.0		
A3P2	58.5	-8.4	-43.8	51.1	
E1A3P2	83.5	0.0	0.0		
A3P3	59.6	-8.2	-44.8	52.4	
E1A3P3	85.6	0.0	0.0		
A8P1	58.4	-3.8	-49.0	54.4	54.4
E1A8P1	81.7	0.0	0.0		
A8P2	60.1	-4.9	-49.0	54.1	
E1A8P2	82.4	0.0	0.0		
A8P3	58.1	-3.3	-49.5	54.6	
E1A8P3	81.0	0.0	0.0		
A3P1	58.9	-8.6	-43.8	20.2	20.2
E3A3P1	68.8	-22.7	-33.3		
A3P2	58.5	-8.4	-43.8	19.5	
E3A3P2	68.1	-22.0	-33.7		
A3P3	59.6	-8.2	-44.8	20.9	
E3A3P3	69.1	-22.8	-33.3		
A8P1	58.4	-3.8	-49.0	14.0	17.6
E3A8P1	64.1	-13.8	-41.1		
A8P2	60.1	-4.9	-49.0	21.4	
E3A8P2	68.7	-20.1	-36.6		
A8P3	58.1	-3.3	-49.5	17.3	
E3A8P3	66.7	-15.6	-40.8		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.44.

*Cálculo de la diferencia de color (ΔE^*ab) entre estándar y filtrado para colorante FD&C Rojo No. 40 en escamas de pescado*

Código de la muestra	Coordenada L*	Coordenada a*	Coordenada b*	ΔE^*ab	ΔE^*ab promedio
R3P1	40.4	60.2	47.1	88.5	88.2
E1R3P1	85.0	0.0	0.0		
R3P2	40.5	59.9	48.4	88.9	
E1R3P2	84.9	0.0	0.0		
R3P3	36.0	56.8	44.8	87.2	
E1R3P3	84.6	0.0	0.0		
R8P1	41.1	60.0	49.0	88.5	87.9
E1R8P1	83.8	0.0	0.0		
R8P2	40.2	59.8	48.5	88.0	
E1R8P2	82.8	0.0	0.0		
R8P3	34.8	56.5	45.5	87.4	
E1R8P3	83.5	0.0	0.0		
R3P1	40.4	60.2	47.1	14.0	15.3
E3R3P1	46.1	64.4	59.2	12.8	
R3P2	40.5	59.9	48.4		
E3R3P2	46.5	63.1	59.3		
R3P3	36.0	56.8	44.8	19.0	
E3R3P3	46.4	63.4	59.3	10.4	11.3
R8P1	41.1	60.0	49.0		
E3R8P1	44.2	64.7	57.7	8.4	
R8P2	40.2	59.8	48.5		
E3R8P2	42.2	63.3	55.9	15.2	
R8P3	34.8	56.5	45.5		
E3R8P3	42.8	63.4	56.4		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.45.

*Cálculo de la diferencia de color (ΔE^*ab) entre estándar y filtrado para colorante FD&C Azul No. 1 en olote*

Código de la muestra	Coordenada L*	Coordenada a*	Coordenada b*	ΔE^*ab	ΔE^*ab promedio
A3P1	58.9	-8.6	-43.8	55.2	54.9
O1A3P1	79.9	-4.1	7.0		
A3P2	58.5	-8.4	-43.8	54.6	
O1A3P2	78.3	-3.2	6.8		
A3P3	59.6	-8.2	-44.8	54.9	
O1A3P3	77.6	-3.2	6.8		
A8P1	58.4	-3.8	-49.0	30.5	31.4
O1A8P1	62.1	-24.0	-26.4		
A8P2	60.1	-4.9	-49.0	30.4	
O1A8P2	62.4	-24.6	-25.9		
A8P3	58.1	-3.3	-49.5	33.2	
O1A8P3	63.8	-25.6	-25.6		
A3P1	58.9	-8.6	-43.8	22.9	22.5
O3A3P1	67.5	-24.5	-29.8		
A3P2	58.5	-8.4	-43.8	22.4	
O3A3P2	67.9	-24.0	-30.8		
A3P3	59.6	-8.2	-44.8	22.1	
O3A3P3	68.6	-23.7	-31.8		
A8P1	58.4	-3.8	-49.0	18.9	20.1
O3A8P1	64.7	-17.2	-37.3		
A8P2	60.1	-4.9	-49.0	18.0	
O3A8P2	65.4	-17.6	-37.4		
A8P3	58.1	-3.3	-49.5	23.5	
O3A8P3	64.4	-19.7	-33.9		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.46.

*Cálculo de la diferencia de color (ΔE^*ab) entre estándar y filtrado para colorante FD&C Rojo No. 40 en olote*

Código de la muestra	Coordenada L*	Coordenada a*	Coordenada b*	ΔE^*ab	ΔE^*ab promedio
R3P1	40.4	60.2	47.1	24.7	28.5
O1R3P1	58.4	45.0	39.8		
R3P2	40.5	59.9	48.4	35.1	
O1R3P2	61.6	36.6	32.7		
R3P3	36.0	56.8	44.8	25.8	
O1R3P3	59.0	45.6	41.2		
R8P1	41.1	60.0	49.0	14.2	17.3
O1R8P1	47.8	64.6	60.6		
R8P2	40.2	59.8	48.5	14.8	
O1R8P2	48.0	63.2	60.6		
R8P3	34.8	56.5	45.5	22.9	
O1R8P3	49.1	64.4	61.6		
R3P1	40.4	60.2	47.1	6.0	5.0
O3R3P1	42.8	62.0	52.3		
R3P2	40.5	59.9	48.4	3.2	
O3R3P2	42.3	61.7	50.4		
R3P3	36.0	56.8	44.8	5.7	
O3R3P3	37.5	59.6	49.5		
R8P1	41.1	60.0	49.0	0.8	4.0
O3R8P1	40.8	60.0	48.3		
R8P2	40.2	59.8	48.5	2.6	
O3R8P2	42.0	60.9	50.0		
R8P3	34.8	56.5	45.5	8.6	
O3R8P3	41.0	60.9	49.5		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.47.

*Cálculo de la diferencia de color (ΔE^*ab) entre estándar y filtrado para colorante FD&C Azul No. 1 en brácteas de maíz*

Código de la muestra	Coordenada L*	Coordenada a*	Coordenada b*	ΔE^*ab	ΔE^*ab promedio
A3P1	58.9	-8.6	-43.8	57.1	57.4
B1A3P1	76.4	-5.7	10.5		
A3P2	58.5	-8.4	-43.8	57.6	
B1A3P2	77.5	-5.6	10.5		
A3P3	59.6	-8.2	-44.8	57.6	
B1A3P3	76.2	-4.8	10.2		
A8P1	58.4	-3.8	-49.0	38.5	42.3
B1A8P1	60.2	-28.1	-19.2		
A8P2	60.1	-4.9	-49.0	47.3	
B1A8P2	64.6	-34.9	-12.7		
A8P3	58.1	-3.3	-49.5	41.1	
B1A8P3	62.2	-29.8	-18.4		
A3P1	58.9	-8.6	-43.8	24.5	23.8
B3A3P1	76.3	-24.3	-36.7		
A3P2	58.5	-8.4	-43.8	23.0	
B3A3P2	75.1	-23	-37.5		
A3P3	59.6	-8.2	-44.8	23.9	
B3A3P3	76	-23.8	-37.1		
A8P1	58.4	-3.8	-49.0	23.7	21.2
B3A8P1	71.5	-20.4	-38.2		
A8P2	60.1	-4.9	-49.0	19.3	
B3A8P2	70	-18.5	-39.6		
A8P3	58.1	-3.3	-49.5	20.5	
B3A8P3	69.7	-17.6	-40.5		

Nota: Elaboración propia.

Tabla 5.48.

*Cálculo de la diferencia de color (ΔE^{*ab}) entre estándar y filtrado para colorante FD&C Rojo No. 40 en brácteas de maíz*

Código de la muestra	Coordenada L*	Coordenada a*	Coordenada b*	ΔE^{*ab}	ΔE^{*ab} promedio
R3P1	40.4	60.2	47.1	16.6	17.6
B1R3P1	54.6	51.7	47.6		
R3P2	40.5	59.9	48.4	16.0	
B1R3P2	54.8	52.8	48.3		
R3P3	36.0	56.8	44.8	20.2	
B1R3P3	55.5	53.4	48.7		
R8P1	41.1	60.0	49.0	13.1	16.0
B1R8P1	46.9	64.5	59.9		
R8P2	40.2	59.8	48.5	14.7	
B1R8P2	47.4	64.8	60.3		
R8P3	34.8	56.5	45.5	20.1	
B1R8P3	47.0	63.5	59.8		
R3P1	40.4	60.2	47.1	3.3	5.7
B3R3P1	38.7	59.7	49.9		
R3P2	40.5	59.9	48.4	4.1	
B3R3P2	38.6	59.0	51.9		
R3P3	36.0	56.8	44.8	9.6	
B3R3P3	42.0	61.6	50.5		
R8P1	41.1	60.0	49.0	7.5	4.1
B3R8P1	35.4	56.8	45.3		
R8P2	40.2	59.8	48.5	1.2	
B3R8P2	39.9	60.0	47.4		
R8P3	34.8	56.5	45.5	3.7	
B3R8P3	36.5	58.8	47.8		

Nota: Elaboración propia.

5.4. Análisis de Varianza (ANOVA)

Se muestran los resultados de ANOVA para el diseño factorial 2^k . Todos los cálculos y datos fueron generados mediante el software IBM SPSS Statistics 22.0.

5.4.1. Diseño factorial 2^k

5.4.1.1. Escamas de pescado y FD&C Azul No. 1

La Tabla 5.49. declara los factores en estudio: tamaño de partícula y pH con su respectiva etiqueta de valor, la Tabla 5.50. muestra las pruebas de efectos inter-sujetos

considerando tamaño de partícula, pH y su interacción (tamaño de partícula*pH) para escamas de pescado y FD&C Azul No. 1.

Tabla 5.49.

Factores inter-sujetos y etiqueta de valor para escamas de pescado y FD&C Azul No. 1

		Etiqueta de valor	N
Tamaño de partícula	1	bajo	6
	3	alto	6
pH	3	bajo	6
	8	alto	6

Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Tabla 5.50.

Pruebas de efectos inter-sujetos para escamas de pescado y FD&C Azul No. 1

Variable dependiente: Diferencia de color

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	3488.133 ^a	3	1162.711	306.790	.000
Interceptación	15443.470	1	15443.470	4074.875	.000
Tamaño de partícula	3464.261	1	3464.261	914.071	.000
pH	.099	1	.099	.026	.876
Tamaño de partícula * pH	23.773	1	23.773	6.273	.037
Error	30.319	8	3.790		
Total	18961.922	12			
Total corregido	3518.452	11			

a. R al cuadrado = .991 (R al cuadrado ajustada = .988)

Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Decisión:

F observado (F_o), se obtiene de la prueba.

F crítico (F_c), se obtiene de tablas de distribución F.

$F_c = F_{\alpha}(v_1, v_2)$, donde:

α : nivel de significación (Error Tipo I, es la probabilidad de rechazar H_0 , siendo H_0 cierta).

v_1 : grados de libertad del numerador (la interacción entre los dos factores: tamaño de partícula y pH).

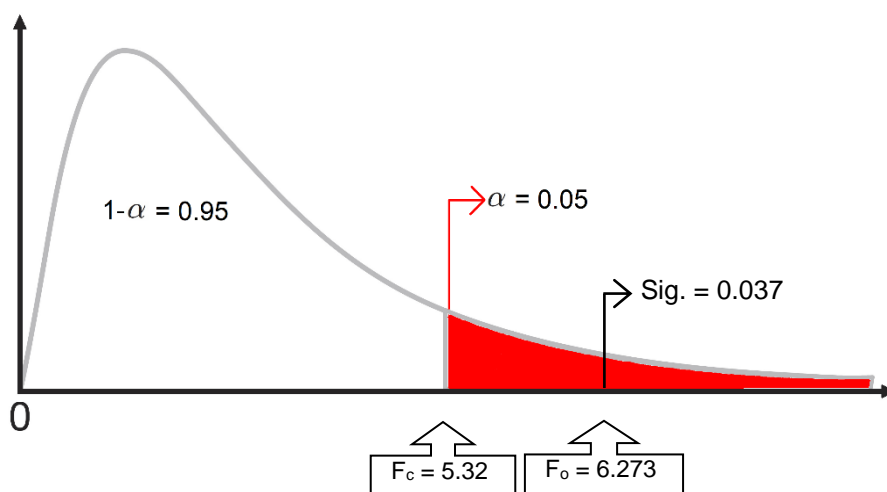
v_2 : grados de libertad del denominador (el error).

La Tabla 5.77. (véase al final del presente capítulo) muestra los valores críticos para la distribución F, por lo tanto, el valor de $F_c = F_{0.05}(1,8) = 5.32$.

La Figura 5.1. representa, en la distribución F, cada uno de los valores requeridos que permitió tomar la decisión con respecto a las hipótesis planteadas, de acuerdo a la interacción de los factores para escamas de pescado y FD&C Azul No. 1.

Figura 5.1.

Distribución F indicando F_c , F_o , α y Sig. para escamas de pescado y FD&C Azul No. 1



Nota: Elaboración propia.

Como $F_o > F_c$, es decir $6.273 > 5.32$, se rechazó la hipótesis nula (H_0), por lo que se aceptó la hipótesis alternativa (H_1). En términos del valor p de la prueba, la decisión quedó así: siendo $\alpha > \text{Sig.}$ (valor p), es decir $0.05 > 0.037$, se rechazó la hipótesis nula (H_0), por lo que se aceptó la hipótesis alternativa (H_1).

Conclusión:

A un nivel de significación del 0.05, existió interacción entre los factores: tamaño de partícula y pH para el colorante FD&C Azul No. 1 correspondiente a las escamas de pescado.

La Tabla 5.51. muestra las medias de la diferencia de color (ΔE^*ab) de cada uno de los factores según su etiqueta de valor para escamas de pescado y FD&C Azul No. 1.

Tabla 5.51.

Medias de la diferencia de color para escamas de pescado y FD&C Azul No. 1

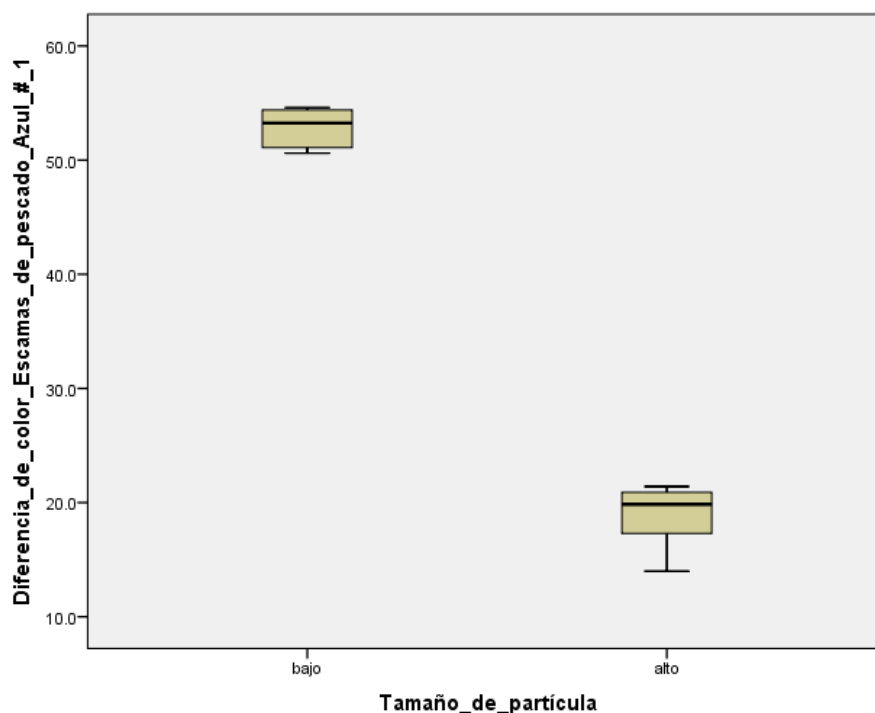
Factores \ Etiquetas de valor	Bajo	Alto
Tamaño de partícula	52.865	18.883
pH	35.783	35.965

Nota: Elaboración propia.

Las Figuras 5.2. y 5.3. constituyen diagramas de caja, que permitieron evaluar la dispersión de los datos de la variable dependiente (diferencia de color) según el tamaño de partícula (valor bajo o alto) o pH (valor bajo o alto), respectivamente, ambas considerando escamas de pescado y FD&C Azul No. 1.

Figura 5.2.

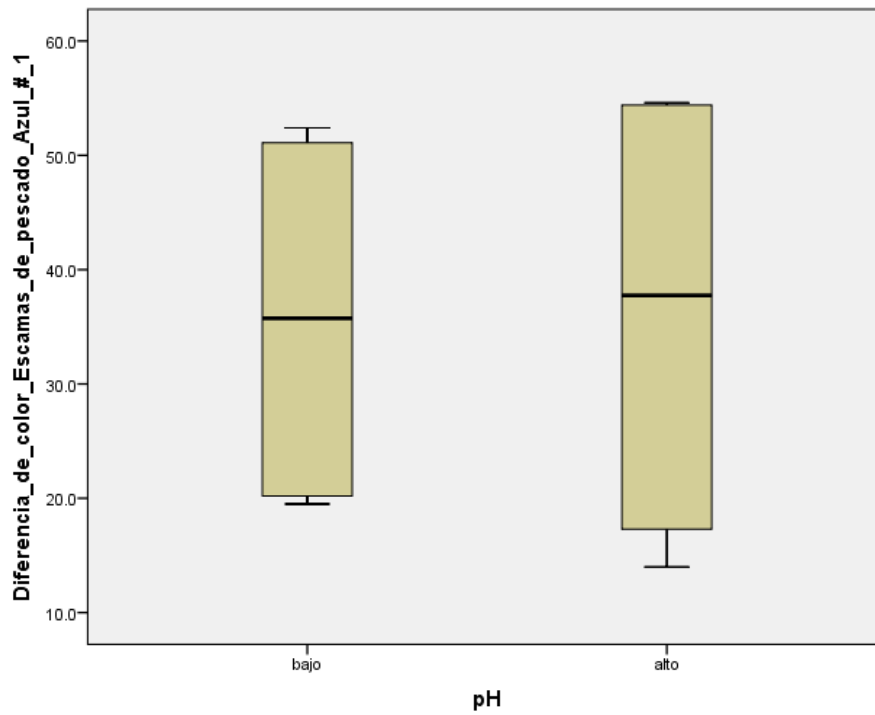
Diagrama de caja: Diferencia de color vs. Tamaño de partícula para escamas de pescado y FD&C Azul No. 1



Nota: Generado por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Figura 5.3.

Diagrama de caja: Diferencia de color vs. pH para escamas de pescado y FD&C Azul No. 1

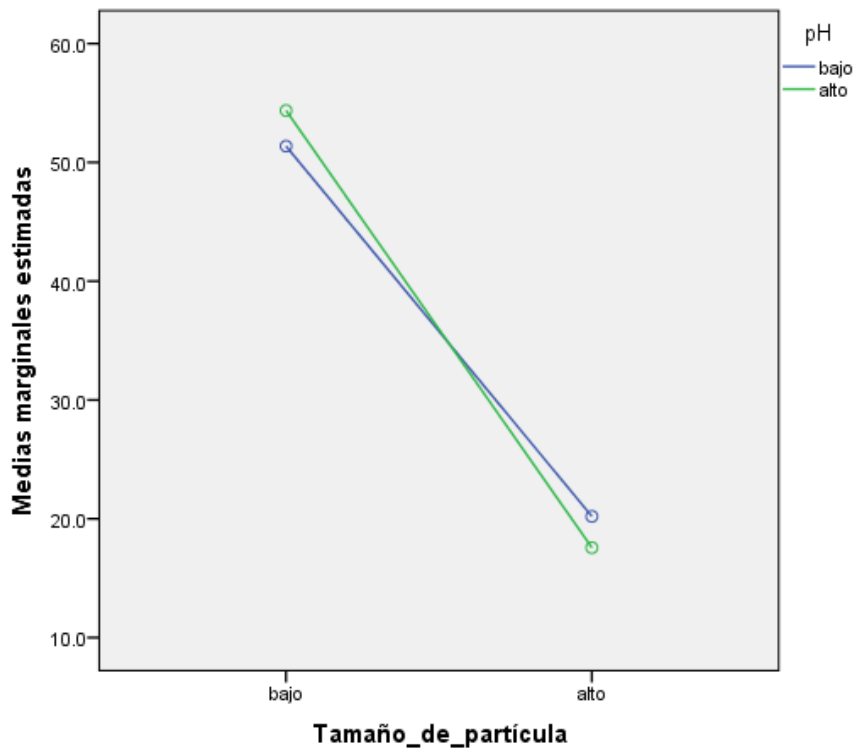


Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

En la Figura 5.4. se muestra el gráfico de perfil de las medias marginales estimadas que permitió evaluar la interacción entre ambos factores estudiados para escamas de pescado y FD&C Azul No. 1.

Figura 5.4.

Gráfico de perfil: Medias marginales estimadas según Tamaño de partícula y pH para escamas de pescado y FD&C Azul No. 1



Nota: Generado por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

5.4.1.2. Escamas de pescado y FD&C Rojo No. 40

La Tabla 5.52. declara los factores en estudio: tamaño de partícula y pH con su respectiva etiqueta de valor, la Tabla 5.53. muestra las pruebas de efectos inter-sujetos considerando tamaño de partícula, pH y su interacción (tamaño de partícula*pH) para escamas de pescado y FD&C Rojo No. 40.

Tabla 5.52.

Factores inter-sujetos y etiqueta de valor para escamas de pescado y FD&C Rojo No. 40

		Etiqueta de valor	N
Tamaño de partícula	1	bajo	6
	3	alto	6
pH	3	bajo	6
	8	alto	6

Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Tabla 5.53.

Pruebas de efectos inter-sujetos para escamas de pescado y FD&C Rojo No. 40
Variable dependiente: Diferencia de color

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	16800.929 ^a	3	5600.310	928.741	.000
Interceptación	30835.741	1	30835.741	5113.722	.000
Tamaño de partícula	16777.641	1	16777.641	2782.362	.000
pH	13.021	1	13.021	2.159	.180
Tamaño de partícula * pH	10.268	1	10.268	1.703	.228
Error	48.240	8	6.030		
Total	47684.910	12			
Total corregido	16849.169	11			

a. R al cuadrado = .997 (R al cuadrado ajustada = .996)
 Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Decisión:

F observado (F_o), se obtiene de la prueba.

F crítico (F_c), se obtiene de tablas de distribución F.

$F_c = F_{\alpha}(v_1, v_2)$, donde:

α : nivel de significación (Error Tipo I, es la probabilidad de rechazar H_0 , siendo H_0 cierta).

v_1 : grados de libertad del numerador (la interacción entre los dos factores: tamaño de partícula y pH).

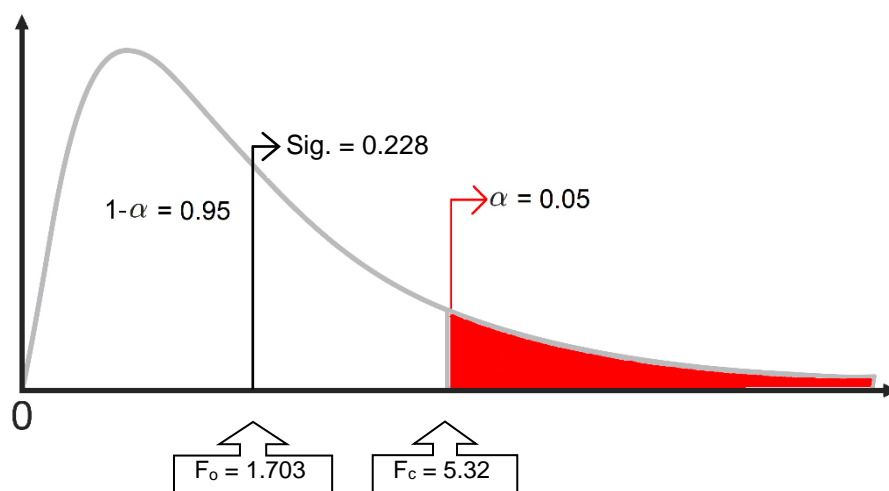
v_2 : grados de libertad del denominador (el error).

La Tabla 5.77. (véase al final del presente capítulo) muestra los valores críticos para la distribución F, por lo tanto, el valor de $F_c = F_{0.05}(1,8) = 5.32$.

La Figura 5.5. representa, en la distribución F, cada uno de los valores requeridos que permitió tomar la decisión con respecto a las hipótesis planteadas, de acuerdo a la interacción de los factores para escamas de pescado y FD&C Rojo No. 40.

Figura 5.5.

Distribución F indicando F_c , F_o , α y Sig. para escamas de pescado y FD&C Rojo No. 40



Nota: Elaboración propia.

Como $F_o < F_c$, es decir $1.703 < 5.32$, se aceptó la hipótesis nula (H_0). En términos del valor p de la prueba, la decisión quedó así: siendo $\alpha < \text{Sig. (valor p)}$, es decir $0.05 < 0.228$, se aceptó la hipótesis nula (H_0).

Conclusión:

A un nivel de significación del 0.05, no existió interacción entre los factores: tamaño de partícula y pH para el colorante FD&C Rojo No. 40 correspondiente a las escamas de pescado.

La Tabla 5.54. muestra las medias de la diferencia de color (ΔE^*ab) de cada uno de los factores según su etiqueta de valor para escamas de pescado y FD&C Rojo No. 40.

Tabla 5.54.

Medias de la diferencia de color para escamas de pescado y FD&C Rojo No. 40

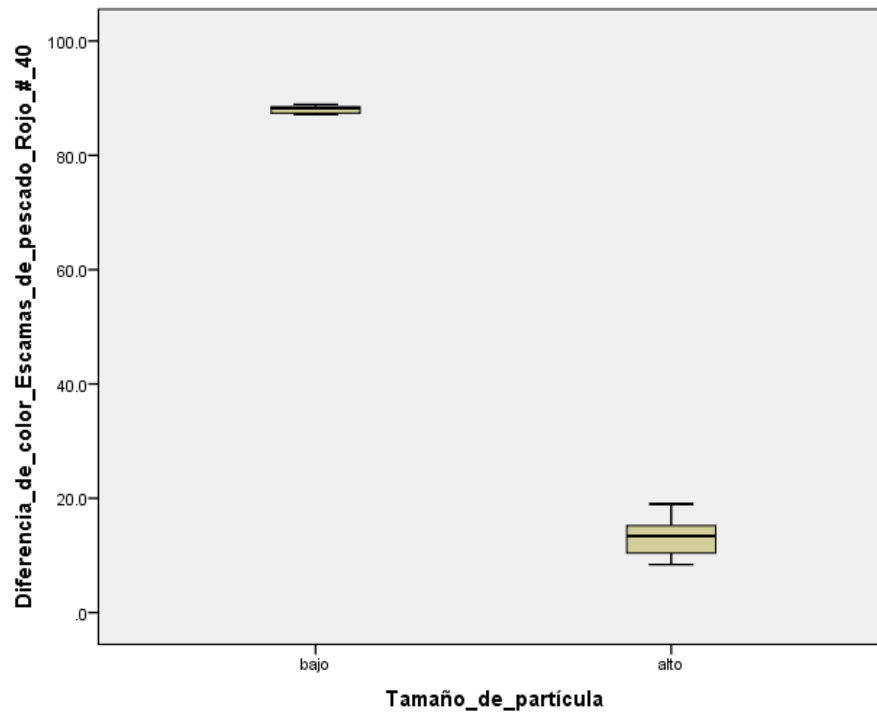
Factores \ Etiquetas de valor	Bajo	Alto
Tamaño de partícula	88.083	13.300
pH	51.733	49.650

Nota: Elaboración propia.

Las Figuras 5.6. y 5.7. constituyen diagramas de caja, que permitieron evaluar la dispersión de los datos de la variable dependiente (diferencia de color) según el tamaño de partícula (valor bajo o alto) o pH (valor bajo o alto), respectivamente, ambas considerando escamas de pescado y FD&C Rojo No. 40.

Figura 5.6.

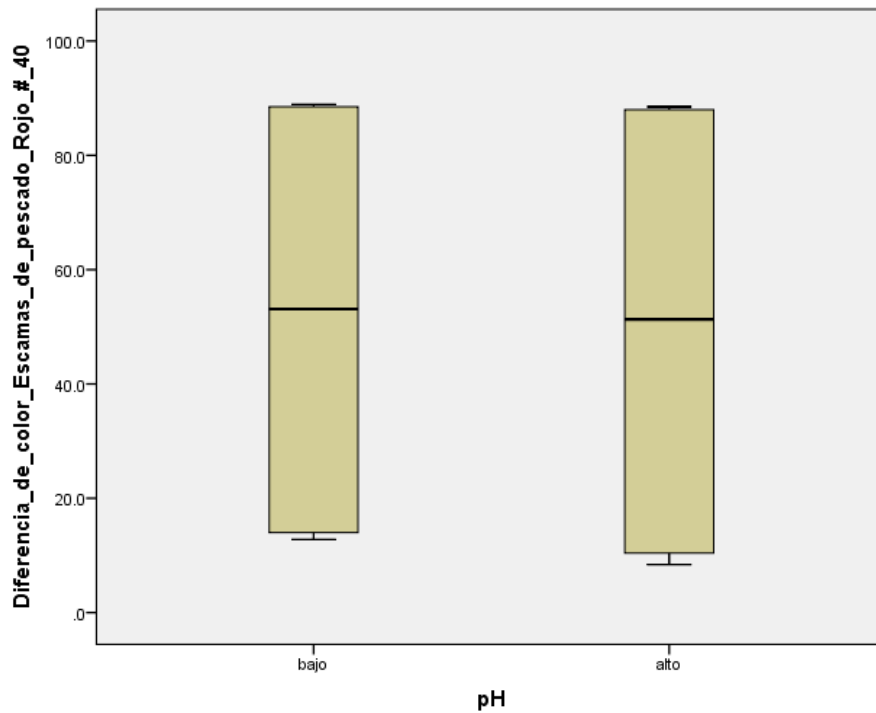
Diagrama de caja: Diferencia de color vs. Tamaño de partícula para escamas de pescado y FD&C Rojo No. 40



Nota: Generado por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Figura 5.7.

Diagrama de caja: Diferencia de color vs. pH para escamas de pescado y FD&C Rojo No. 40

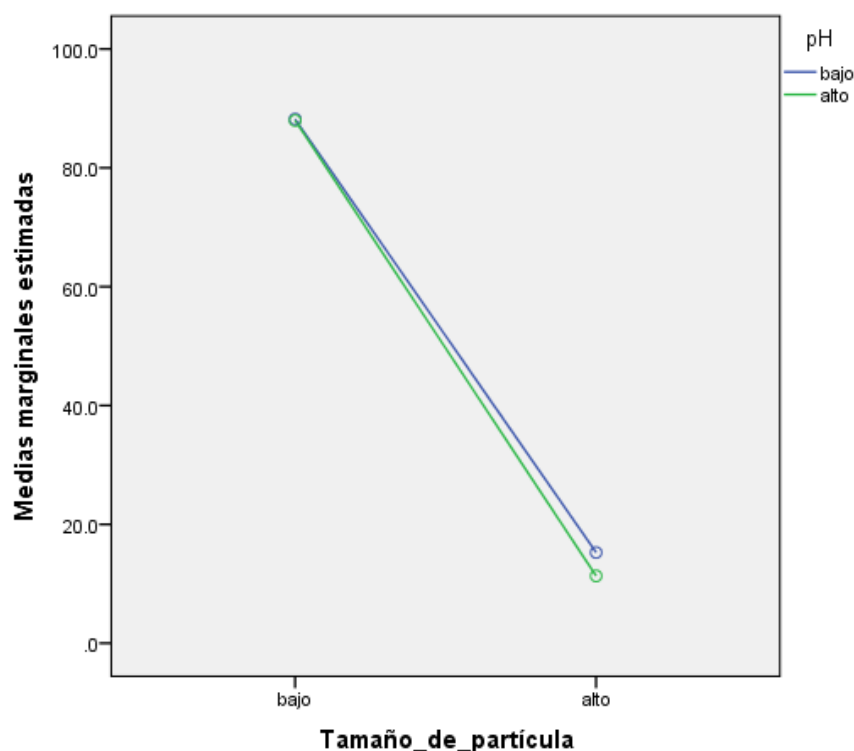


Nota: Generado por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

En la Figura 5.8. se muestra el gráfico de perfil de las medias marginales estimadas que permitió evaluar la interacción entre ambos factores estudiados para escamas de pescado y FD&C Rojo No. 40.

Figura 5.8.

Gráfico de perfil: Medias marginales estimadas según Tamaño de partícula y pH para escamas de pescado y FD&C Rojo No. 40



Nota: Generado por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

5.4.1.3. Olote y FD&C Azul No. 1

La Tabla 5.55. declara los factores en estudio: tamaño de partícula y pH con su respectiva etiqueta de valor, la Tabla 5.56. muestra las pruebas de efectos inter-sujetos considerando tamaño de partícula, pH y su interacción (tamaño de partícula*pH) para olote y FD&C Azul No. 1.

Tabla 5.55.

Factores inter-sujetos y etiqueta de valor para olote y FD&C Azul No. 1

		Etiqueta de valor	N
Tamaño de partícula	1	bajo	6
	3	alto	6
pH	3	bajo	6
	8	alto	6

Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Tabla 5.56.

Pruebas de efectos inter-sujetos para olote y FD&C Azul No. 1
Variable dependiente: Diferencia de color

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	2268.977 ^a	3	756.326	263.528	.000
Interceptación	12454.963	1	12454.963	4339.708	.000
Tamaño de partícula	1430.083	1	1430.083	498.287	.000
pH	501.813	1	501.813	174.848	.000
Tamaño de partícula * pH	337.080	1	337.080	117.449	.000
Error	22.960	8	2.870		
Total	14746.900	12			
Total corregido	2291.937	11			

a. R al cuadrado = .990 (R al cuadrado ajustada = .986)

Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Decisión:

F observado (F_o), se obtiene de la prueba.

F crítico (F_c), se obtiene de tablas de distribución F.

$F_c = F_{\alpha}(v_1, v_2)$, donde:

α : nivel de significación (Error Tipo I, es la probabilidad de rechazar H_0 , siendo H_0 cierta).

v_1 : grados de libertad del numerador (la interacción entre los dos factores: tamaño de partícula y pH).

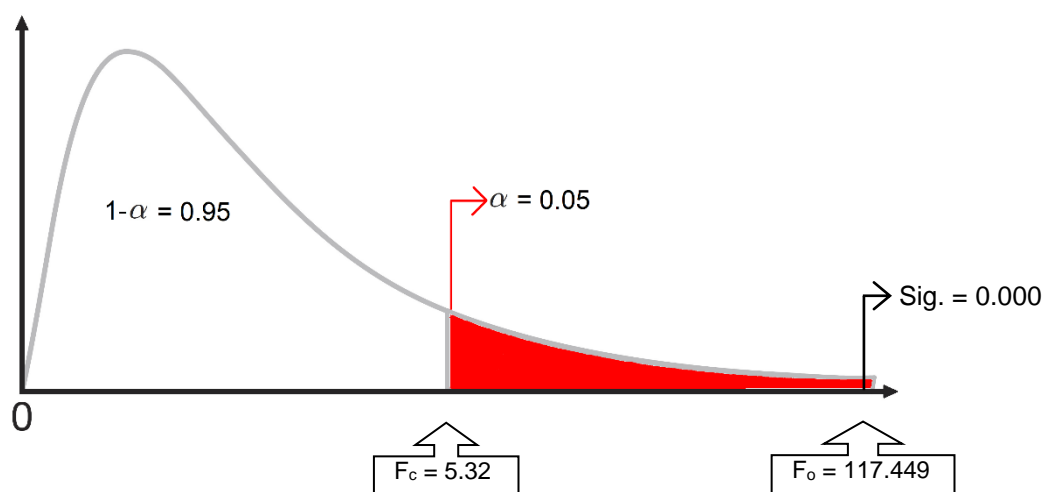
v_2 : grados de libertad del denominador (el error).

La Tabla 5.77. (véase al final del presente capítulo) muestra los valores críticos para la distribución F, por lo tanto, el valor de $F_c = F_{0.05}(1,8) = 5.32$.

La Figura 5.9. representa, en la distribución F, cada uno de los valores requeridos que permitió tomar la decisión con respecto a las hipótesis planteadas, de acuerdo a la interacción de los factores para olote y FD&C Azul No. 1.

Figura 5.9.

Distribución F indicando F_c , F_o , α y Sig. para para olote y FD&C Azul No. 1



Nota: Elaboración propia.

Como $F_o > F_c$, es decir $117.449 > 5.32$, se rechazó la hipótesis nula (H_0), por lo que se aceptó la hipótesis alternativa (H_1). En términos del valor p de la prueba, la decisión quedó así: siendo $\alpha > \text{Sig. (valor p)}$, es decir $0.05 > 0.037$, se rechazó la hipótesis nula (H_0), por lo que se aceptó la hipótesis alternativa (H_1).

Conclusión:

A un nivel de significación del 0.05, existió interacción entre los factores: tamaño de partícula y pH para el colorante FD&C Azul No. 1 correspondiente al olote.

La Tabla 5.57. muestra las medias de la diferencia de color (ΔE^*ab) de cada uno de los factores según su etiqueta de valor para olote y FD&C Azul No. 1.

Tabla 5.57.

Medias de la diferencia de color para olote y FD&C Azul No. 1

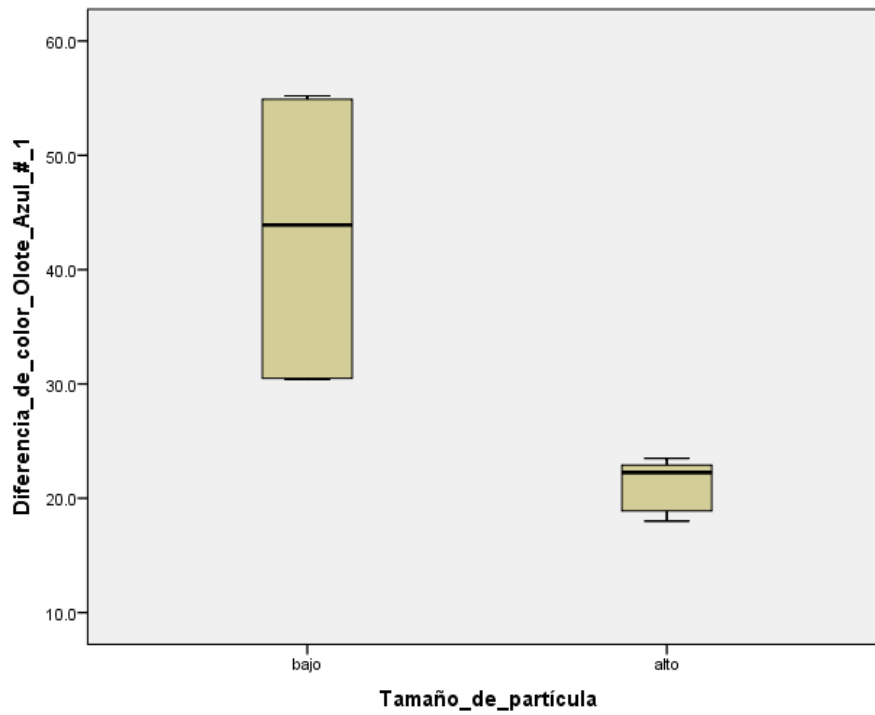
Factores \ Etiquetas de valor	Bajo	Alto
Tamaño de partícula	43.133	21.300
pH	38.683	25.750

Nota: Elaboración propia.

Las Figuras 5.10. y 5.11. constituyen diagramas de caja, que permitieron evaluar la dispersión de los datos de la variable dependiente (diferencia de color) según el tamaño de partícula (valor bajo o alto) o pH (valor bajo o alto), respectivamente, ambas considerando olote y FD&C Azul No. 1.

Figura 5.10.

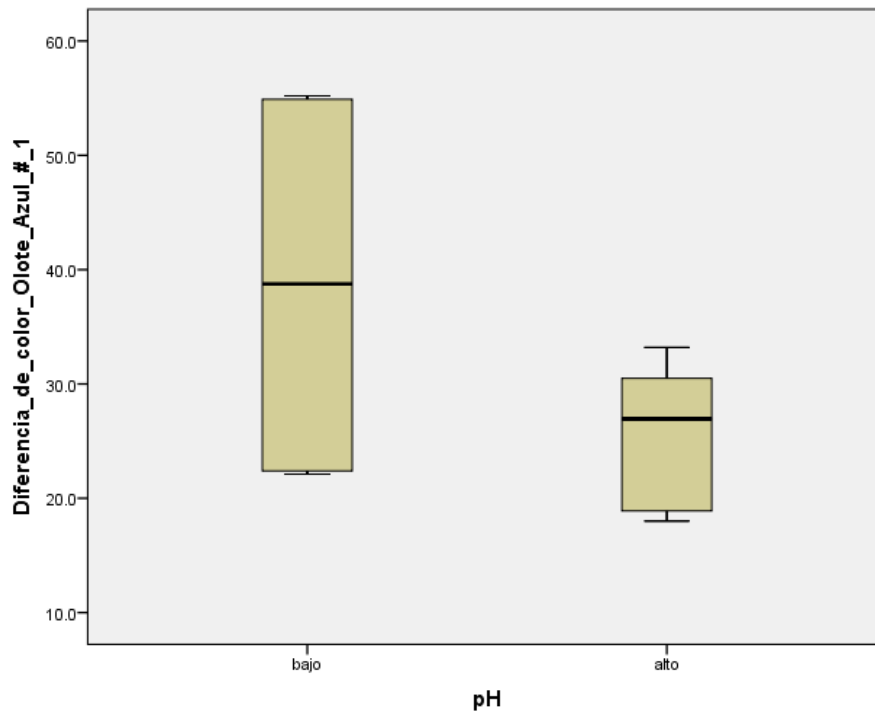
Diagrama de caja: Diferencia de color vs. Tamaño de partícula para olote y FD&C Azul No. 1



Nota: Generado por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Figura 5.11.

Diagrama de caja: Diferencia de color vs. pH para olote y FD&C Azul No. 1

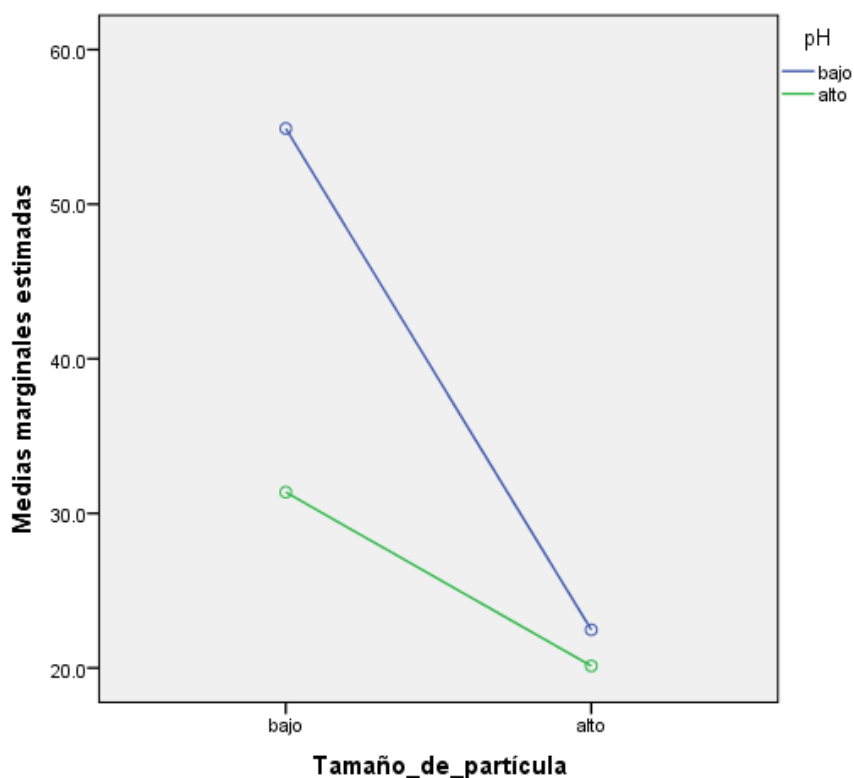


Nota: Generado por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

En la Figura 5.12. se muestra el gráfico de perfil de las medias marginales estimadas que permitió evaluar la interacción entre ambos factores estudiados para olote y FD&C Azul No. 1.

Figura 5.12.

Gráfico de perfil: Medias marginales estimadas según Tamaño de partícula y pH para olote y FD&C Azul No. 1



Nota: Generado por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

5.4.1.4. Olote y FD&C Rojo No. 40

La Tabla 5.58. declara los factores en estudio: tamaño de partícula y pH con su respectiva etiqueta de valor, la Tabla 5.59. muestra las pruebas de efectos inter-sujetos considerando tamaño de partícula, pH y su interacción (tamaño de partícula*pH) para olote y FD&C Rojo No. 40.

Tabla 5.58.*Factores inter-sujetos y etiqueta de valor para olote y FD&C Rojo No. 40*

		Etiqueta de valor	N
Tamaño de partícula	1	bajo	6
	3	alto	6
pH	3	bajo	6
	8	alto	6

Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Tabla 5.59.*Pruebas de efectos inter-sujetos para olote y FD&C Rojo No. 40**Variable dependiente: Diferencia de color*

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	1210.047 ^a	3	403.349	21.427	.000
Interceptación	2252.280	1	2252.280	119.648	.000
Tamaño de partícula	1019.363	1	1019.363	54.152	.000
pH	111.630	1	111.630	5.930	.041
Tamaño de partícula * pH	79.053	1	79.053	4.200	.075
Error	150.593	8	18.824		
Total	3612.920	12			
Total corregido	1360.640	11			

a. R al cuadrado = .889 (R al cuadrado ajustada = .848)

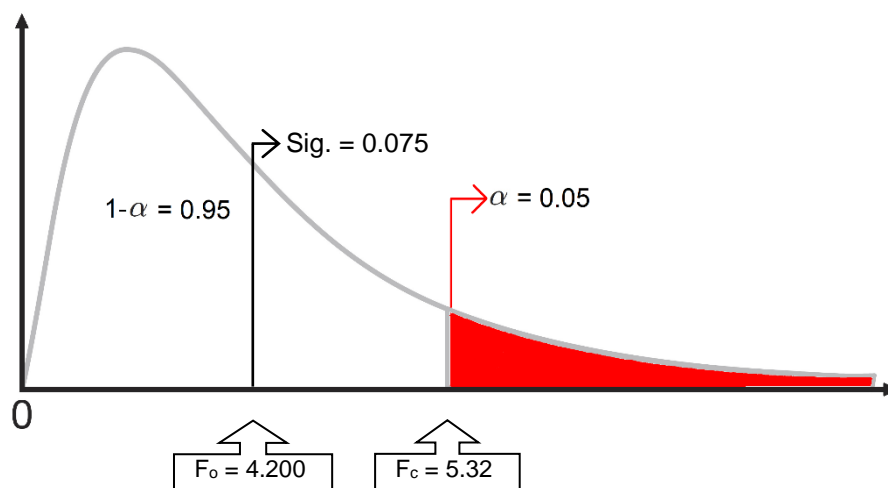
Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Decisión:F observado (F_o), se obtiene de la prueba.F crítico (F_c), se obtiene de tablas de distribución F. $F_c = F_{\alpha}(v_1, v_2)$, donde: α : nivel de significación (Error Tipo I, es la probabilidad de rechazar H_0 , siendo H_0 cierta). v_1 : grados de libertad del numerador (la interacción entre los dos factores: tamaño de partícula y pH). v_2 : grados de libertad del denominador (el error).La Tabla 5.77. (véase al final del presente capítulo) muestra los valores críticos para la distribución F, por lo tanto, el valor de $F_c = F_{0.05}(1,8) = 5.32$.

La Figura 5.13. representa, en la distribución F, cada uno de los valores requeridos que permitió tomar la decisión con respecto a las hipótesis planteadas, de acuerdo a la interacción de los factores para olote y FD&C Rojo No. 40.

Figura 5.13.

Distribución F indicando F_c , F_o , α y Sig. para olote y FD&C Rojo No. 40



Nota: Elaboración propia.

Como $F_o < F_c$, es decir $4.200 < 5.32$, se aceptó la hipótesis nula (H_0). En términos del valor p de la prueba, la decisión quedó así: siendo $\alpha < \text{Sig.}$ (valor p), es decir $0.05 < 0.075$, se aceptó la hipótesis nula (H_0).

Conclusión:

A un nivel de significación del 0.05, no existió interacción entre los factores: tamaño de partícula y pH para el colorante FD&C Rojo No. 40 correspondiente al olote.

La Tabla 5.60. muestra las medias de la diferencia de color (ΔE^*ab) de cada uno de los factores según su etiqueta de valor para olote y FD&C Rojo No. 40.

Tabla 5.60.

Medias de la diferencia de color para olote y FD&C Rojo No. 40

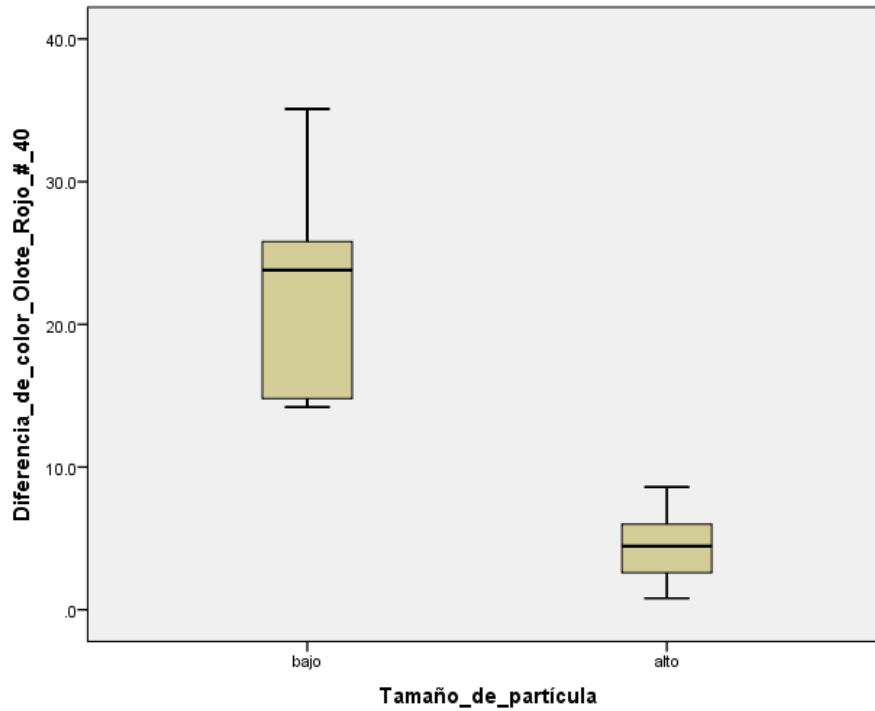
Factores \ Etiquetas de valor	Bajo	Alto
Tamaño de partícula	22.917	4.483
pH	16.750	10.650

Nota: Elaboración propia.

Las Figuras 5.14. y 5.15. constituyen diagramas de caja, que permitieron evaluar la dispersión de los datos de la variable dependiente (diferencia de color) según el tamaño de partícula (valor bajo o alto) o pH (valor bajo o alto), respectivamente, ambas considerando olote y FD&C Rojo No. 40.

Figura 5.14.

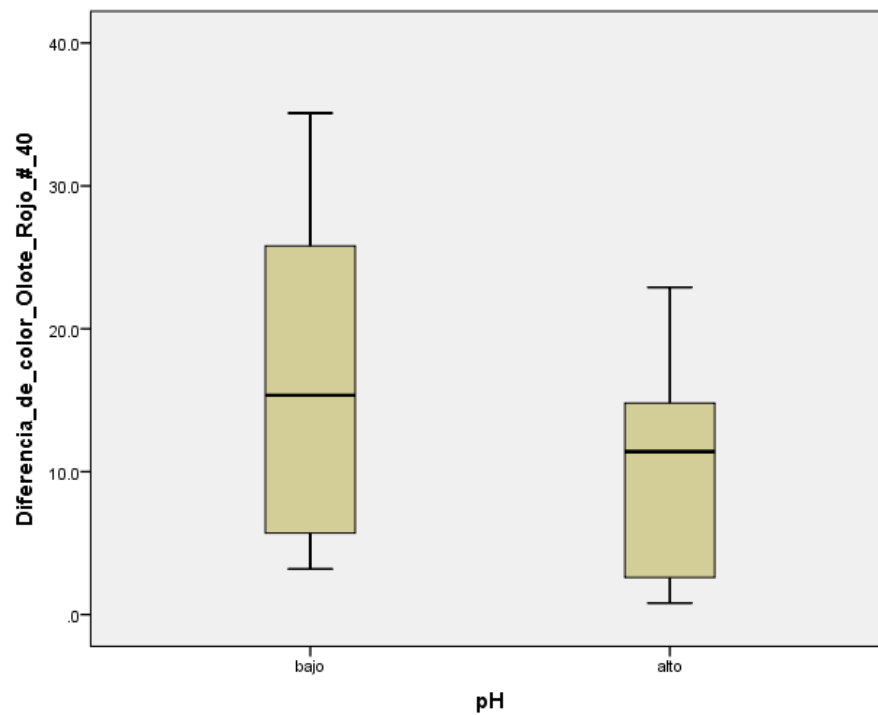
Diagrama de caja: Diferencia de color vs. Tamaño de partícula para olote y FD&C Rojo No. 40



Nota: Generado por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Figura 5.15.

Diagrama de caja: Diferencia de color vs. pH para olote y FD&C Rojo No. 40

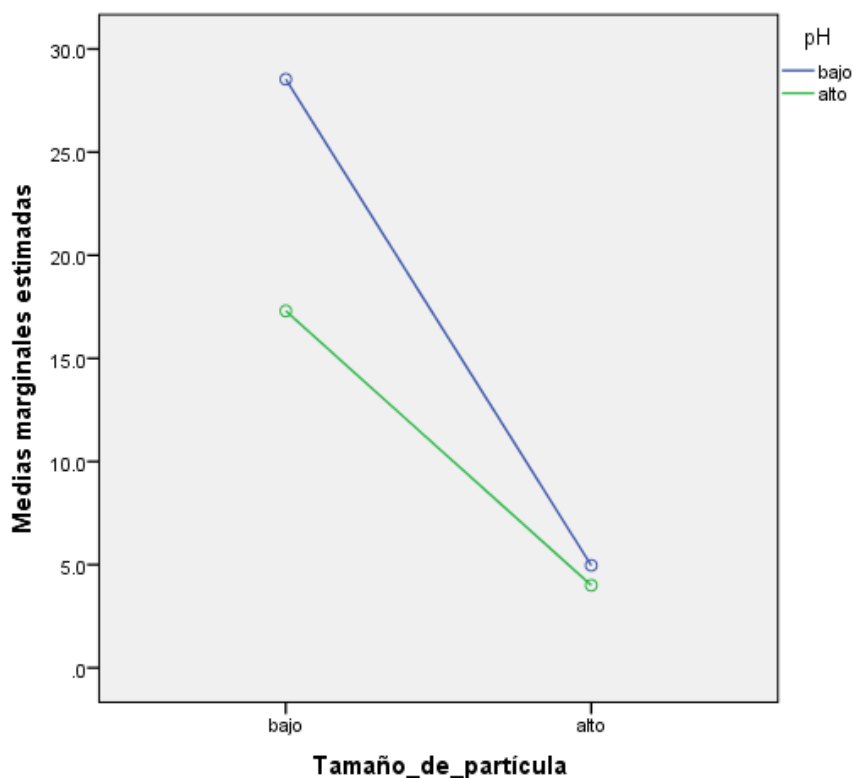


Nota: Generado por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

En la Figura 5.16. se muestra el gráfico de perfil de las medias marginales estimadas que permitió evaluar la interacción entre ambos factores estudiados para olote y FD&C Rojo No. 40.

Figura 5.16.

Gráfico de perfil: Medias marginales estimadas según Tamaño de partícula y pH para olote y FD&C Rojo No. 40



Nota: Generado por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

5.4.1.5. Brácteas de maíz y FD&C Azul No. 1

La Tabla 5.61. declara los factores en estudio: tamaño de partícula y pH con su respectiva etiqueta de valor, la Tabla 5.62. muestra las pruebas de efectos inter-sujetos considerando tamaño de partícula, pH y su interacción (tamaño de partícula*pH) para brácteas de maíz y FD&C Azul No. 1.

Tabla 5.61.

Factores inter-sujetos y etiqueta de valor para brácteas de maíz y FD&C Azul No. 1

		Etiqueta de valor	N
Tamaño de partícula	1	bajo	6
	3	alto	6
pH	3	bajo	6
	8	alto	6

Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Tabla 5.62.

Pruebas de efectos inter-sujetos para brácteas de maíz y FD&C Azul No. 1
Variable dependiente: Diferencia de color

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	2603.469 ^a	3	867.823	132.156	.000
Interceptación	15703.567	1	15703.567	2391.406	.000
Tamaño de partícula	2249.541	1	2249.541	342.570	.000
pH	236.741	1	236.741	36.052	.000
Tamaño de partícula * pH	117.187	1	117.187	17.846	.003
Error	52.533	8	6.567		
Total	18359.570	12			
Total corregido	2656.003	11			

a. R al cuadrado = .980 (R al cuadrado ajustada = .973)
 Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Decisión:

F observado (F_o), se obtiene de la prueba.

F crítico (F_c), se obtiene de tablas de distribución F.

$F_c = F_{\alpha}(v_1, v_2)$, donde:

α : nivel de significación (Error Tipo I, es la probabilidad de rechazar H_0 , siendo H_0 cierta).

v_1 : grados de libertad del numerador (la interacción entre los dos factores: tamaño de partícula y pH).

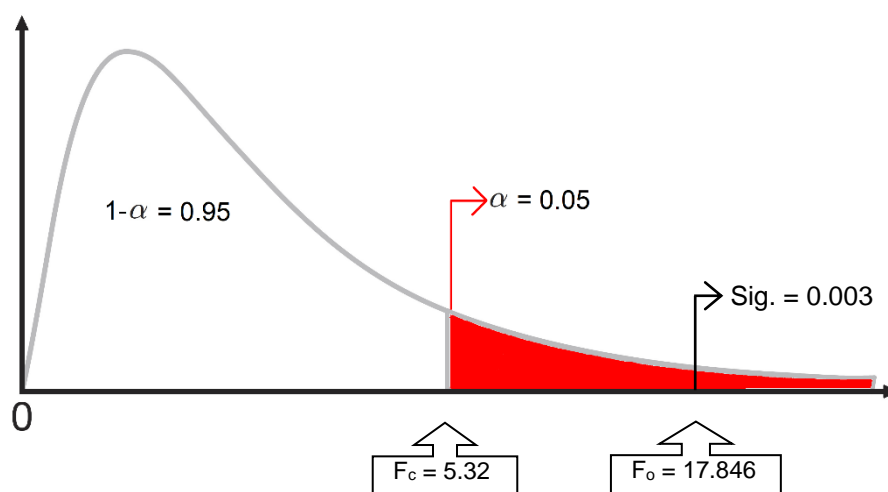
v_2 : grados de libertad del denominador (el error).

La Tabla 5.77. (véase al final del presente capítulo) muestra los valores críticos para la distribución F, por lo tanto, el valor de $F_c = F_{0.05}(1,8) = 5.32$.

La Figura 5.17. representa, en la distribución F, cada uno de los valores requeridos que permitió tomar la decisión con respecto a las hipótesis planteadas, de acuerdo a la interacción de los factores para brácteas de maíz y FD&C Azul No. 1.

Figura 5.17.

Distribución F indicando F_c , F_o , α y Sig. para brácteas de maíz y FD&C Azul No. 1



Nota: Elaboración propia.

Como $F_o > F_c$, es decir $17.846 > 5.32$, se rechazó la hipótesis nula (H_0), por lo que se aceptó la hipótesis alternativa (H_1). En términos del valor p de la prueba, la decisión quedó así: siendo $\alpha > \text{Sig.}$ (valor p), es decir $0.05 > 0.003$, se rechazó la hipótesis nula (H_0), por lo que se aceptó la hipótesis alternativa (H_1).

Conclusión:

A un nivel de significación del 0.05, existió interacción entre los factores: tamaño de partícula y pH para el colorante FD&C Azul No. 1 correspondiente a las brácteas de maíz.

La Tabla 5.63. muestra las medias de la diferencia de color (ΔE^*ab) de cada uno de los factores según su etiqueta de valor para brácteas de maíz y FD&C Azul No. 1.

Tabla 5.63.

Medias de la diferencia de color para brácteas de maíz y FD&C Azul No. 1

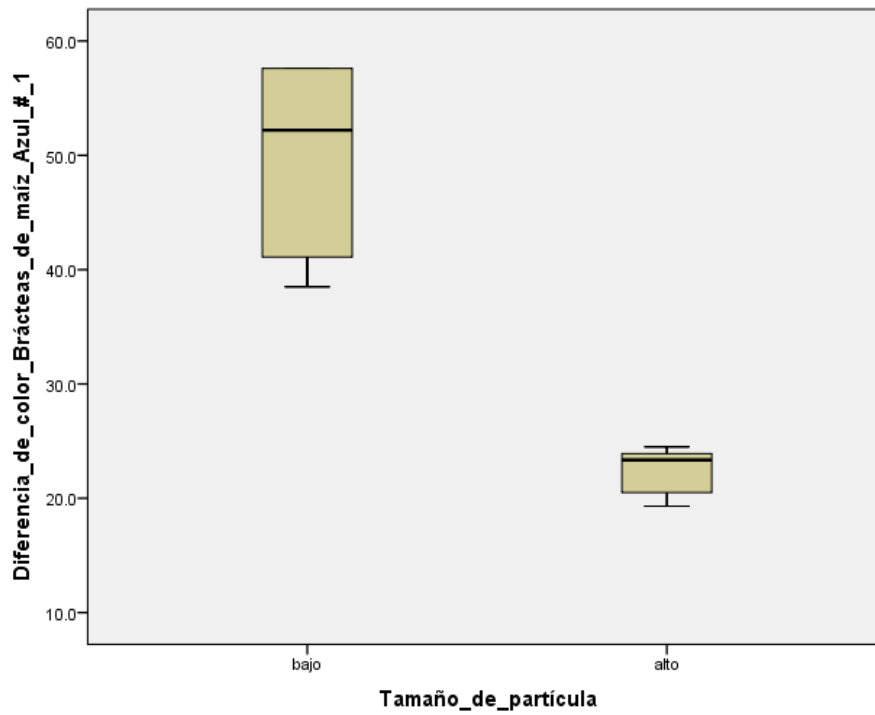
Factores \ Etiquetas de valor	Bajo	Alto
Tamaño de partícula	49.867	22.483
pH	40.617	31.733

Nota: Elaboración propia.

Las Figuras 5.18. y 5.19. constituyen diagramas de caja, que permitieron evaluar la dispersión de los datos de la variable dependiente (diferencia de color) según el tamaño de partícula (valor bajo o alto) o pH (valor bajo o alto), respectivamente, ambas considerando brácteas de maíz y FD&C Azul No. 1.

Figura 5.18.

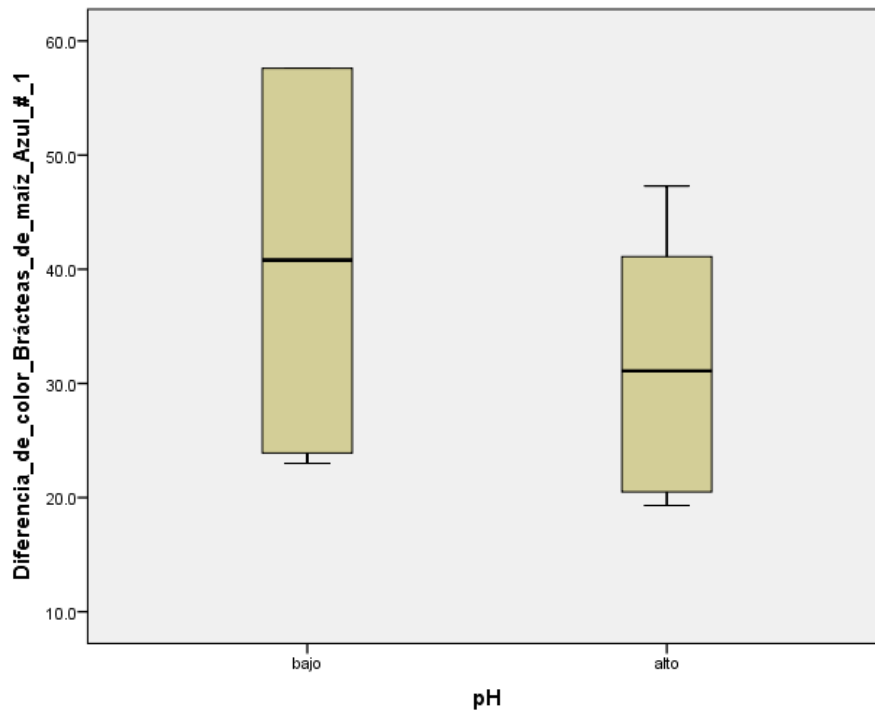
Diagrama de caja: Diferencia de color vs. Tamaño de partícula para brácteas de maíz y FD&C Azul No. 1



Nota: Generado por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Figura 5.19.

Diagrama de caja: Diferencia de color vs. pH para brácteas de maíz y FD&C Azul No. 1

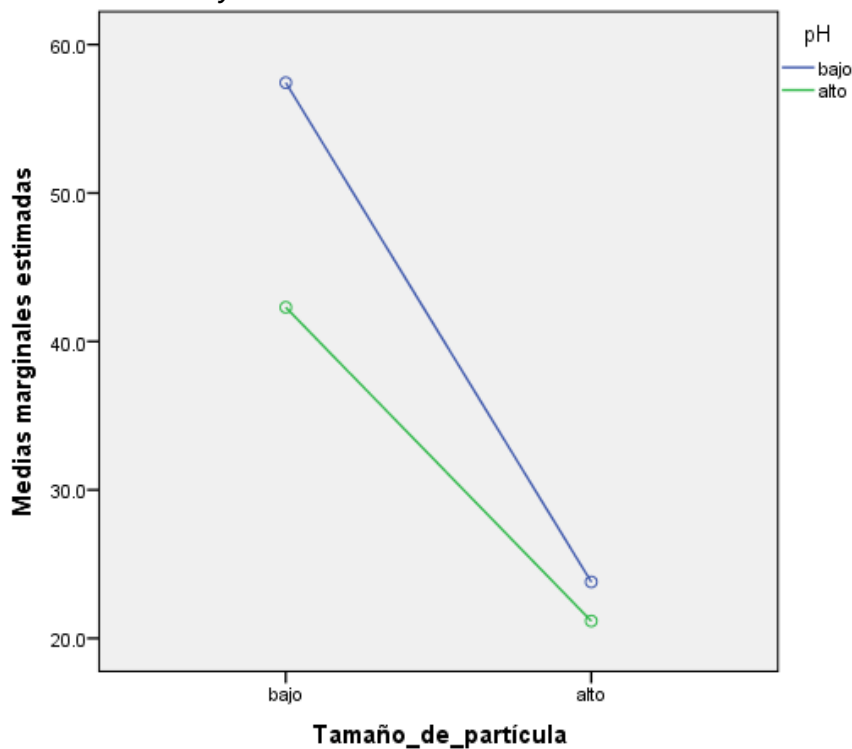


Nota: Generado por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

En la Figura 5.20. se muestra el gráfico de perfil de las medias marginales estimadas que permitió evaluar la interacción entre ambos factores estudiados para brácteas de maíz y FD&C Azul No. 1.

Figura 5.20.

Gráfico de perfil: Medias marginales estimadas según Tamaño de partícula y pH para brácteas de maíz y FD&C Azul No. 1



Nota: Generado por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

5.4.1.6. Brácteas de maíz y FD&C Rojo No. 40

La Tabla 5.64. declara los factores en estudio: tamaño de partícula y pH con su respectiva etiqueta de valor, la Tabla 5.65. muestra las pruebas de efectos inter-sujetos considerando tamaño de partícula, pH y su interacción (tamaño de partícula*pH) para brácteas de maíz y FD&C Rojo No. 40.

Tabla 5.64.*Factores inter-sujetos y etiqueta de valor para brácteas de maíz y FD&C Rojo No. 40*

		Etiqueta de valor	N
Tamaño de partícula	1	bajo	6
	3	alto	6
pH	3	bajo	6
	8	alto	6

Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Tabla 5.65.*Pruebas de efectos inter-sujetos para brácteas de maíz y FD&C Rojo No. 40*
Variable dependiente: Diferencia de color

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo corregido	431.169 ^a	3	143.723	14.216	.001
Interceptación	1410.501	1	1410.501	139.515	.000
Tamaño de partícula	423.641	1	423.641	41.903	.000
pH	7.521	1	7.521	.744	.414
Tamaño de partícula * pH	.007	1	.007	.001	.979
Error	80.880	8	10.110		
Total	1922.550	12			
Total corregido	512.049	11			

a. R al cuadrado = .842 (R al cuadrado ajustada = .783)

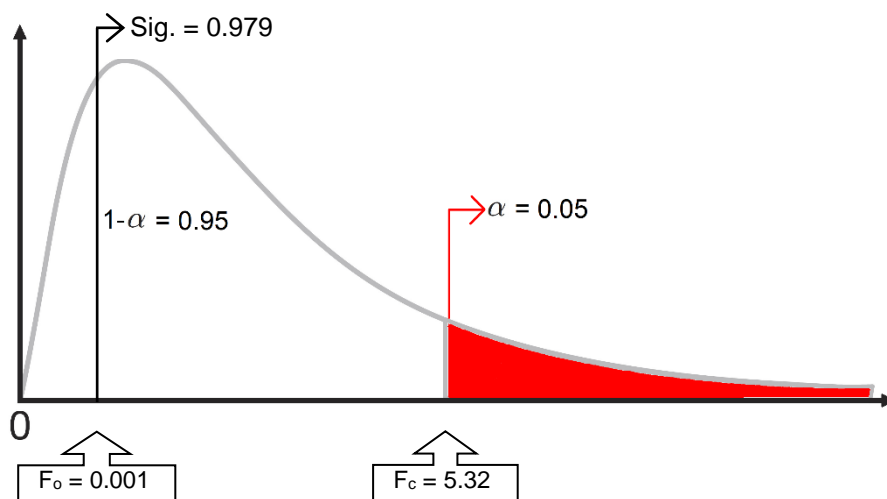
Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Decisión:F observado (F_o), se obtiene de la prueba.F crítico (F_c), se obtiene de tablas de distribución F. $F_c = F_{\alpha}(v_1, v_2)$, donde: α : nivel de significación (Error Tipo I, es la probabilidad de rechazar H_0 , siendo H_0 cierta). v_1 : grados de libertad del numerador (la interacción entre los dos factores: tamaño de partícula y pH). v_2 : grados de libertad del denominador (el error).La Tabla 5.77. (véase al final del presente capítulo) muestra los valores críticos para la distribución F, por lo tanto, el valor de $F_c = F_{0.05}(1,8) = 5.32$.

La Figura 5.21. representa, en la distribución F, cada uno de los valores requeridos que permitió tomar la decisión con respecto a las hipótesis planteadas, de acuerdo a la interacción de los factores para brácteas de maíz y FD&C Rojo No. 40.

Figura 5.21.

Distribución F indicando F_c , F_o , α y Sig. para brácteas de maíz y FD&C Rojo No. 40



Nota: Elaboración propia.

Como $F_o < F_c$, es decir $0.001 < 5.32$, se aceptó la hipótesis nula (H_0). En términos del valor p de la prueba, la decisión quedó así: siendo $\alpha < \text{Sig.}$ (valor p), es decir $0.05 < 0.979$, se aceptó la hipótesis nula (H_0).

Conclusión:

A un nivel de significación del 0.05, no existió interacción entre los factores: tamaño de partícula y pH para el colorante FD&C Rojo No. 40 correspondiente a las brácteas de maíz.

La Tabla 5.66. muestra las medias de la diferencia de color (ΔE^*ab) de cada uno de los factores según su etiqueta de valor para brácteas de maíz y FD&C Rojo No. 40.

Tabla 5.66.

Medias de la diferencia de color para brácteas de maíz y FD&C Rojo No. 40

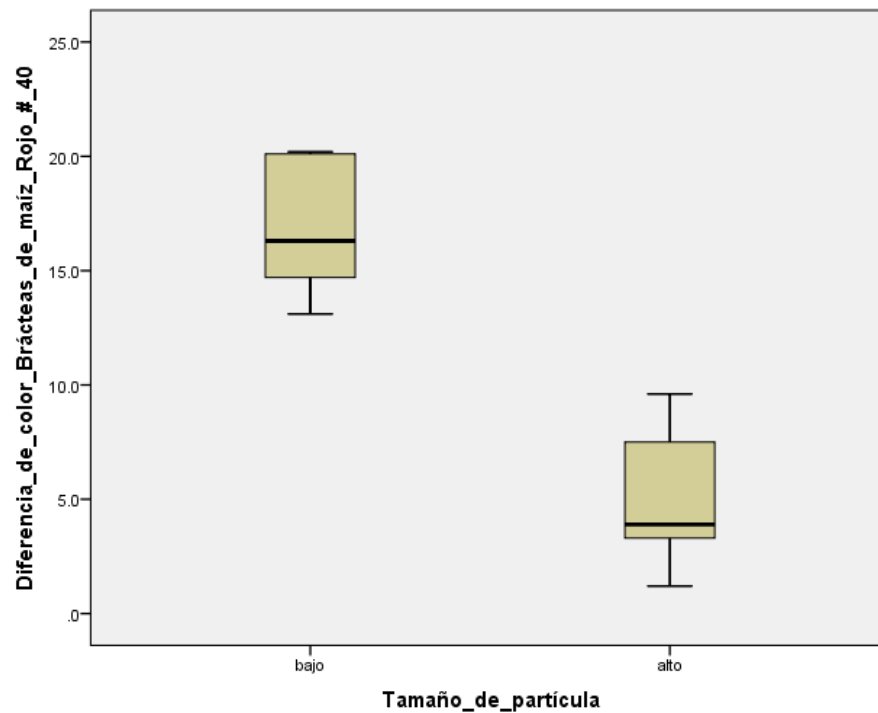
Factores \ Etiquetas de valor	Bajo	Alto
Tamaño de partícula	16.783	4.900
pH	11.633	10.050

Nota: Elaboración propia.

Las Figuras 5.22. y 5.23. constituyen diagramas de caja, que permitieron evaluar la dispersión de los datos de la variable dependiente (diferencia de color) según el tamaño de partícula (valor bajo o alto) o pH (valor bajo o alto), respectivamente, ambas considerando brácteas de maíz y FD&C Rojo No. 40.

Figura 5.22.

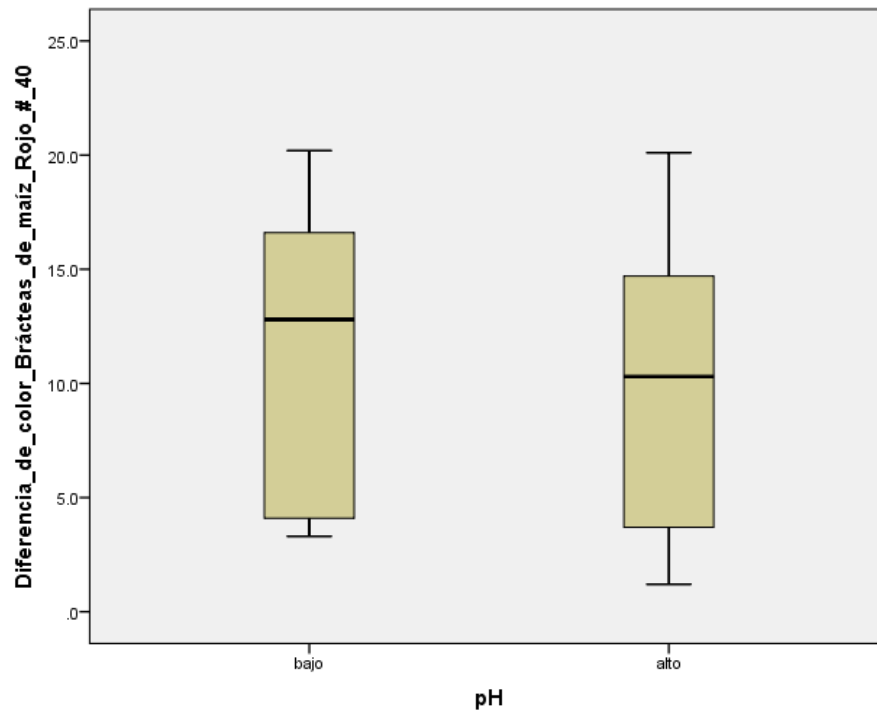
Diagrama de caja: Diferencia de color vs. Tamaño de partícula para brácteas de maíz y FD&C Rojo No. 40



Nota: Generado por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Figura 5.23.

Diagrama de caja: Diferencia de color vs. pH para brácteas de maíz y FD&C Rojo No. 40

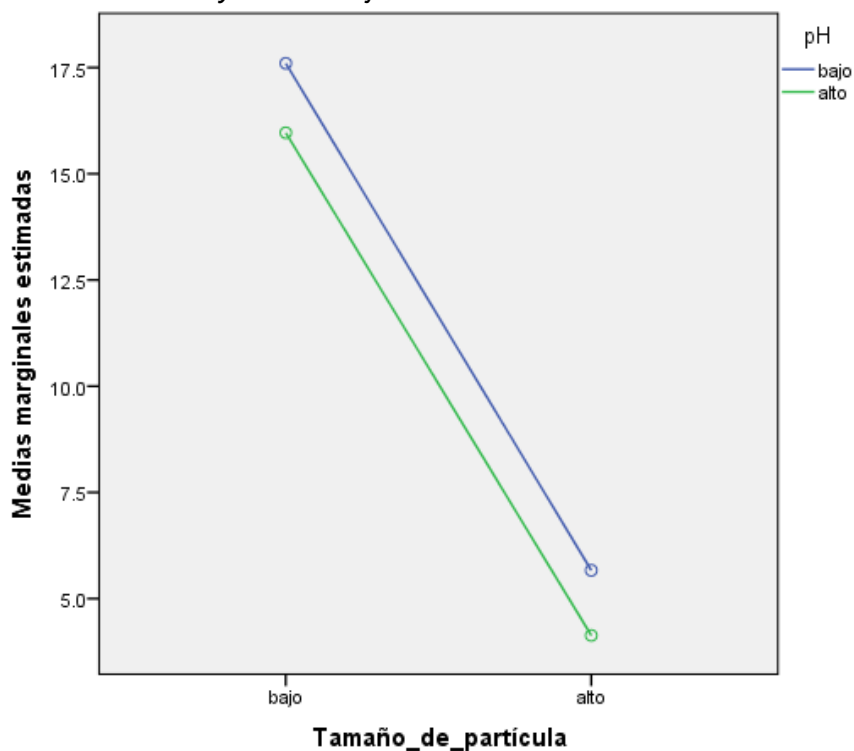


Nota: Generado por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

En la Figura 5.24. se muestra el gráfico de perfil de las medias marginales estimadas que permitió evaluar la interacción entre ambos factores estudiados para brácteas de maíz y FD&C Rojo No. 40.

Figura 5.24.

Gráfico de perfil: Medias marginales estimadas según Tamaño de partícula y pH para brácteas de maíz y FD&C Rojo No. 40



Nota: Generado por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

5.4.2. Diseño completamente al azar

5.4.2.1. Residuos agroindustriales y FD&C Azul No. 1

La Tabla 5.67. muestra los estadísticos descriptivos: media y desviación estándar de la diferencia de color para cada uno de los residuos agroindustriales, considerando el colorante FD&C Azul No. 1.

Tabla 5.67.

Descriptivos de la diferencia de color de los residuos agroindustriales para FD&C Azul No. 1

	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	Mínimo	Máximo
Escamas de pescado	12	35.874	17.8846	5.1628	14.0	54.6
Olote	12	32.217	14.4346	4.1669	18.0	55.2
Brácteas de maíz	12	36.175	15.5388	4.4857	19.3	57.6
Total	36	34.755	15.6597	2.6100	14.0	57.6

Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

La Tabla 5.68. muestra el resumen del ANOVA de la diferencia de color de los residuos agroindustriales para FD&C Azul No. 1, donde se destaca el valor observado del estadístico de prueba F, así como el valor p (Sig.).

Tabla 5.68.

ANOVA de la diferencia de color de los residuos agroindustriales para FD&C Azul No. 1

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	116.545	2	58.272	.227	.798
Dentro de grupos	8466.391	33	256.557		
Total	8582.936	35			

Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

La Tabla 5.69. muestra las diferencias de medias de la diferencia de color (ΔE^*ab) para FD&C Azul No. 1 comparando los residuos agroindustriales entre sí como pares, se acompaña del valor p (Sig.) para cada una de estas combinaciones.

Tabla 5.69.

Comparaciones múltiples de los residuos agroindustriales según la Diferencia Mínima Significativa (DMS) para FD&C Azul No. 1

Variable dependiente: Diferencia de color

(I) Residuo agroindustrial	(J) Residuo agroindustrial	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza	
					Límite inferior	Límite superior
Escamas de pescado	Olote	3.6575	6.5391	.580	-9.646	16.961
	Brácteas de maíz	-.3008	6.5391	.964	-13.605	13.003
Olote	Escamas de pescado	-3.6575	6.5391	.580	-16.961	9.646
	Brácteas de maíz	-3.9583	6.5391	.549	-17.262	9.346
Brácteas de maíz	Escamas de pescado	.3008	6.5391	.964	-13.003	13.605
	Olote	3.9583	6.5391	.549	-9.346	17.262

Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Decisión:

F observado (F_o), se obtiene de la prueba.

F crítico (F_c), se obtiene de tablas de distribución F.

$F_c = F_{\alpha}(v_1, v_2)$, donde:

α : nivel de significación (Error Tipo I, es la probabilidad de rechazar H_0 , siendo H_0 cierta).

v_1 : grados de libertad del numerador (entre grupos).

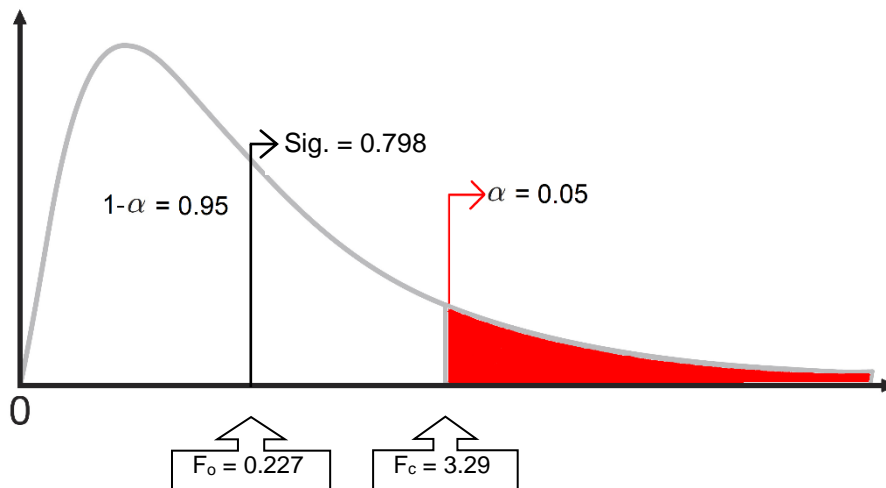
v_2 : grados de libertad del denominador (dentro de grupos).

La Tabla 5.77. (véase al final del presente capítulo) muestra los valores críticos para la distribución F, por lo tanto, el valor de $F_c = F_{0.05}(2,33) = 3.29$ (fue necesario interpolar).

La Figura 5.25. representa, en la distribución F, cada uno de los valores requeridos que permitió tomar la decisión con respecto a las hipótesis planteadas, de acuerdo a los residuos agroindustriales y FD&C Azul No. 1.

Figura 5.25.

Distribución F indicando F_c , F_o , α y Sig. para residuos agroindustriales y FD&C Azul No. 1



Nota: Elaboración propia.

Como $F_o < F_c$, es decir $0.227 < 3.29$, se aceptó la hipótesis nula (H_0). En términos del valor p de la prueba, la decisión quedó así: siendo $\alpha < \text{Sig.}$ (valor p), es decir $0.05 < 0.798$, se aceptó la hipótesis nula (H_0).

Conclusión:

A un nivel de significación del 0.05, no existió diferencia significativa entre los promedios de la diferencia de color de los residuos agroindustriales para el colorante FD&C Azul No. 1.

5.4.2.2. Residuos agroindustriales y FD&C Rojo No. 40

La Tabla 5.70. muestra los estadísticos descriptivos: media y desviación estándar de la diferencia de color para cada uno de los residuos agroindustriales, considerando el colorante FD&C Rojo No. 40.

Tabla 5.70.

Descriptivos de la diferencia de color de los residuos agroindustriales para FD&C Rojo No. 40

	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	Mínimo	Máximo
Escamas de pescado	12	50.692	39.1375	11.2980	8.4	88.9
Olote	12	13.700	11.1218	3.2106	.8	35.1
Brácteas de maíz	12	10.842	6.8228	1.9696	1.2	20.2
Total	36	25.078	29.5587	4.9265	.8	88.9

Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

La Tabla 5.71. muestra el resumen del ANOVA de la diferencia de color de los residuos agroindustriales para FD&C Rojo No. 40, donde se destaca el valor observado del estadístico de prueba F, así como el valor p (Sig.).

Tabla 5.71.

ANOVA de la diferencia de color de los residuos agroindustriales para FD&C Rojo No. 40

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	11858.304	2	5929.152	10.451	.000
Dentro de grupos	18721.858	33	567.329		
Total	30580.162	35			

Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

La Tabla 5.72. muestra las diferencias de medias de la diferencia de color (ΔE^{*ab}) para FD&C Rojo No. 40 comparando los residuos agroindustriales entre sí como pares, se acompaña del valor p (Sig.) para cada una de estas combinaciones.

Tabla 5.72.

Comparaciones múltiples de los residuos agroindustriales según la Diferencia Mínima Significativa (DMS) de la diferencia de color para FD&C Rojo No. 40
Variable dependiente: Diferencia de color

(I) Residuo agroindustrial	(J) Residuo agroindustrial	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza	
					Límite inferior	Límite superior
Escamas de pescado	Olote	36.9917*	9.7239	.001	17.208	56.775
	Brácteas de maíz	39.8500*	9.7239	.000	20.067	59.633
Olote	Escamas de pescado	-36.9917*	9.7239	.001	-56.775	-17.208
	Brácteas de maíz	2.8583	9.7239	.771	-16.925	22.642
Brácteas de maíz	Escamas de pescado	-39.8500*	9.7239	.000	-59.633	-20.067
	Olote	-2.8583	9.7239	.771	-22.642	16.925

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.
Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Decisión:

F observado (F_o), se obtiene de la prueba.

F crítico (F_c), se obtiene de tablas de distribución F.

$F_c = F_{\alpha}(v_1, v_2)$, donde:

α : nivel de significación (Error Tipo I, es la probabilidad de rechazar H_0 , siendo H_0 cierta).

v_1 : grados de libertad del numerador (entre grupos).

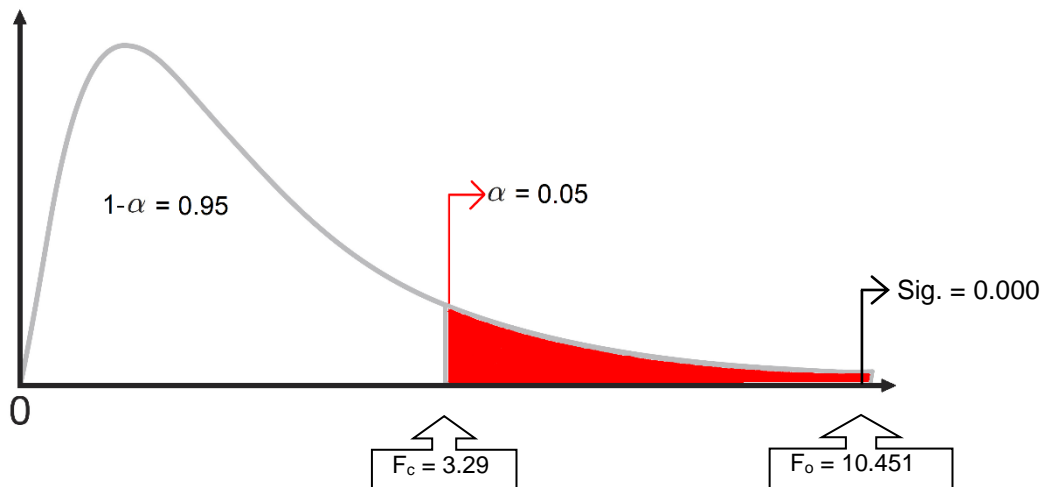
v_2 : grados de libertad del denominador (dentro de grupos).

La Tabla 5.77. (véase al final del presente capítulo) muestra los valores críticos para la distribución F, por lo tanto, el valor de $F_c = F_{0.05}(2,33) = 3.29$ (fue necesario interpolar).

La Figura 5.26. representa, en la distribución F, cada uno de los valores requeridos que permitió tomar la decisión con respecto a las hipótesis planteadas, de acuerdo a los residuos agroindustriales y FD&C Rojo No. 40.

Figura 5.26.

Distribución F indicando F_c , F_o , α y Sig. para residuos agroindustriales y FD&C Rojo No. 40



Nota: Elaboración propia.

Como $F_o > F_c$, es decir $10.451 > 3.29$, se rechazó la hipótesis nula (H_0), por lo que se aceptó la hipótesis alternativa (H_1). En términos del valor p de la prueba, la decisión quedó así: siendo $\alpha > \text{Sig.}$ (valor p), es decir $0.05 > 0.000$, se rechazó la hipótesis nula (H_0), por lo que se aceptó la hipótesis alternativa (H_1).

Conclusión:

A un nivel de significación del 0.05, sí existió diferencia significativa entre los promedios de la diferencia de color de los residuos agroindustriales para el colorante FD&C Rojo No. 40.

5.4.3. Diseño de bloques completamente al azar

La Tabla 5.73. declara los factores inter-sujetos de los residuos agroindustriales y los colorantes con su respectiva etiqueta de valor.

Tabla 5.73.

Factores inter-sujetos de los residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes

		Etiqueta de valor	N
Residuo agroindustrial	1	Escamas de pescado	24
	2	Olote	24
	3	Brácteas de maíz	24
Colorante	1	Azul 1	36
	2	Rojo 40	36

Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

La Tabla 5.74. muestra los estadísticos descriptivos: media y desviación estándar de la diferencia de color de los residuos agroindustriales al interactuar con los colorantes FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40.

Tabla 5.74.

Descriptivos de la diferencia de color de los residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes

	N	Media	Desviación estándar	Error estándar	Mínimo	Máximo
Escamas de pescado	24	43.283	30.7055	6.2677	8.4	88.9
Olote	24	22.958	15.7560	3.2162	.8	55.2
Brácteas de maíz	24	23.508	17.4689	3.5658	1.2	57.6
Total	72	29.917	23.9862	2.8268	.8	88.9

Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

La Tabla 5.75. muestra las pruebas de efectos inter-sujetos considerando los residuos agroindustriales (tratamientos) al interactuar con los colorantes (bloques).

Tabla 5.75.

Pruebas de efectos inter-sujetos de los residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes

Variable dependiente: Diferencia de color

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Cuadrático promedio	F	Sig.
Modelo	72561.076 ^a	4	18140.269	37.691	.000
Residuo agroindustrial	6435.403	2	3217.701	6.686	.002
Colorante	1685.772	1	1685.772	3.503	.066
Error	32727.696	68	481.290		
Total	105288.772	72			

a. R al cuadrado = .689 (R al cuadrado ajustada = .671)

Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

La Tabla 5.76. muestra las diferencias de medias de la diferencia de color (ΔE^{*ab}) comparando los residuos agroindustriales entre sí como pares al interactuar con los dos colorantes, se acompaña del valor p (Sig.) para cada una de estas combinaciones.

Tabla 5.76.

Comparaciones múltiples de los residuos agroindustriales según la Diferencia Mínima Significativa (DMS) al interactuar con los dos colorantes

Variable dependiente: Diferencia de color

(I) Residuo agroindustrial	(J) Residuo agroindustrial	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
Escamas de pescado	Olote	20.325*	6.3330	.002	7.687	32.962
	Brácteas de maíz	19.775*	6.3330	.003	7.137	32.412
Olote	Escamas de pescado	-20.325*	6.3330	.002	-32.962	-7.687
	Brácteas de maíz	-.550	6.3330	.931	-13.187	12.087
Brácteas de maíz	Escamas de pescado	-19.775*	6.3330	.003	-32.412	-7.137
	Olote	.550	6.3330	.931	-12.087	13.187

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática(Error) = 481.290.

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Nota: Generada por el programa IBM SPSS Statistics 22.0.

Decisión:

F observado (F_o), se obtiene de la prueba.

F crítico (F_c), se obtiene de tablas de distribución F.

$F_c = F_{\alpha}(v_1, v_2)$, donde:

α : nivel de significación (Error Tipo I, es la probabilidad de rechazar H_0 , siendo H_0 cierta).

v_1 : grados de libertad del numerador (tratamientos: residuos agroindustriales).

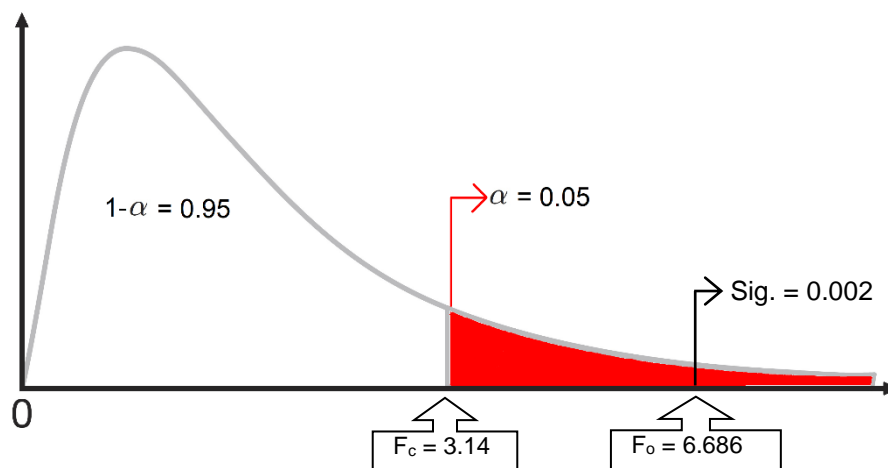
v_2 : grados de libertad del denominador (el error).

La Tabla 5.77. (véase al final del presente capítulo) muestra los valores críticos para la distribución F, por lo tanto, el valor de $F_c = F_{0.05}(2,68) = 3.14$ (fue necesario interpolar).

La Figura 5.27. representa, en la distribución F, cada uno de los valores requeridos que permitió tomar la decisión con respecto a las hipótesis planteadas, para los residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes.

Figura 5.27.

Distribución F indicando F_c , F_o , α y Sig. para residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes



Nota: Elaboración propia.

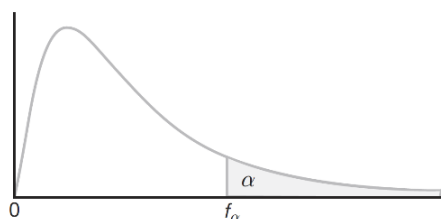
Como $F_o > F_c$, es decir $6.686 > 3.14$, se rechazó la hipótesis nula (H_0), por lo que se aceptó la hipótesis alternativa (H_1). En términos del valor p de la prueba, la decisión quedó así: siendo $\alpha > \text{Sig.}$ (valor p), es decir $0.05 > 0.002$, se rechazó la hipótesis nula (H_0), por lo que se aceptó la hipótesis alternativa (H_1).

Conclusión:

A un nivel de significación del 0.05, sí existe diferencia significativa entre los promedios de la diferencia de color de los residuos agroindustriales al interactuar con los dos colorantes.

Tabla 5.77.

Valores críticos de la distribución F



		$f_{0.05}(v_1, v_2)$								
		v_1								
v_2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	

Reproducida de la tabla 18 de *Biometrika Tables for Statisticians*, Vol. I, con autorización de E.S. Pearson y Biometrika Trustees.

Nota: Walpole et al. (2012).

CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN

Este capítulo muestra la discusión respectiva de los datos generados durante la investigación en la caracterización de los bioadsorbentes en cuanto a humedad; los ensayos de bioadsorción en lecho fijo en cuanto a volúmenes de sobrenadante y filtrados, así como las coordenadas del espacio de color para estándares y filtrados; cálculo de la diferencia de color (ΔE^*ab) entre estándares y filtrados como variable dependiente del tamaño de partícula de los adsorbentes y pH de la solución de adsorbatos; el ANOVA aplicado a los tres diseños experimentales: diseño factorial 2^k , diseño completamente al azar y diseño de bloques completamente al azar, y para finalizar, un contraste de la metodología y resultados de otras investigaciones relacionadas al tema.

6.1. Caracterización de los bioadsorbentes

La Tabla 6.1. muestra la discusión sobre los datos del análisis de humedad para cada residuo agroindustrial, tanto frescos como secos.

Tabla 6.1.

Discusión sobre la humedad de los residuos agroindustriales

Residuo agroindustrial	Humedad
Escamas de pescado	<ul style="list-style-type: none"> • Tomando los valores promedio, el secado provocó una reducción del contenido de humedad, en base húmeda, del 44.847 %, alcanzando un valor de 11.043 %, el cual es similar al reportado por PACIFIC AGRICULTURAL EXPORT CO., LTD. (2019), estableciendo que la humedad máxima de escama de tilapia negra o roja seca, en base húmeda, es del 12 %. • De igual manera se obtuvo un valor promedio de 12.413 % en base seca, el cual es menor al reportado por Quintero y Zapata (2017), estableciendo que la humedad en base seca para las escamas de tilapia roja es de 15.18 % \pm 0.27 %.
Olote	<ul style="list-style-type: none"> • Tomando los valores promedio, el secado provocó una reducción del contenido de humedad, en base húmeda, del 73.448 %, alcanzando un valor de 6.601 %, el cual está por debajo del reportado por FEED THE FUTURE (s.f.), considerando el olote como parte de la misma planta, establece que al reducir la humedad del maíz a niveles menores del 14 %, los mohos no crecerán.
Brácteas de maíz	<ul style="list-style-type: none"> • Tomando los valores promedio, el secado provocó una reducción del contenido de humedad, en base húmeda, del 64.538 %, alcanzando un valor de 8.450 %, el cual está por debajo del reportado por FEED THE FUTURE (s.f.), considerando las brácteas como parte de la misma planta, puede establecerse que al reducir la humedad del maíz a niveles menores del 14 %, los mohos no crecerán.

Nota: Elaboración propia.

6.2. Ensayos de bioadsorción

La Tabla 6.2. muestra la discusión sobre la caracterización de los ensayos según datos de los sobrenadantes y filtrados, así como las coordenadas del espacio de color de los estándares y filtrados para cada residuo agroindustrial.

Tabla 6.2.

Discusión de los ensayos de bioadsorción

Residuo agroindustrial \ Parámetros de los ensayos	Caracterización de los ensayos según sobrenadantes y filtrados	Coordenadas del espacio de color de estándares y filtrados
Escamas de pescado	<ul style="list-style-type: none"> • Para tamaño de partícula menor a 1 mm, los tiempos promedio de consumo de sobrenadante fueron muy altos (media de 144.71 min) en comparación con el tamaño de partícula $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$, obteniéndose una media de 1.48 min. • Además, pudo observarse una disminución del volumen de filtrado para tamaño de partícula menor a 1 mm (media de 23.68 ml) en comparación con el tamaño de partícula $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$, obteniéndose una media de 32.73 ml. 	<ul style="list-style-type: none"> • Según los datos obtenidos, para la coordenada L^* (luminosidad) se observó que los filtrados fueron más pálidos que sus correspondientes estándares para ambos colorantes, siendo el efecto más pronunciado con tamaño de partícula menor a 1 mm. • Para la coordenada b^* (dirección del amarillo o azul) en el caso del colorante FD&C Azul No. 1, los filtrados fueron menos azules que sus correspondientes estándares, siendo el efecto más pronunciado con tamaño de partícula menor a 1 mm. • Para la coordenada a^* (dirección del rojo o verde) en el caso del colorante FD&C Rojo No. 40, los filtrados fueron menos rojos que sus correspondientes estándares, para un tamaño de partícula menor a 1 mm y levemente más rojo para el caso de tamaño de partícula $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$.
Olote	<ul style="list-style-type: none"> • Para tamaño de partícula menor a 1 mm, los tiempos promedio de consumo de sobrenadante fueron muy altos (media de 615.39 min) en comparación con el tamaño de partícula $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$, obteniéndose una media de 5.30 min. 	<ul style="list-style-type: none"> • Según los datos obtenidos, para la coordenada L^* (luminosidad) se observó que los filtrados fueron más pálidos que sus correspondientes estándares para ambos colorantes, siendo el efecto más pronunciado con tamaño de partícula menor a 1 mm y pH ácido.

	<ul style="list-style-type: none"> • Además, pudo observarse una disminución del volumen de filtrado para tamaño de partícula menor a 1 mm (media de 20.43 ml) en comparación con el tamaño de partícula $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$, obteniéndose una media de 28.33 ml. 	<ul style="list-style-type: none"> • Para la coordenada b^* (dirección del amarillo o azul) en el caso del colorante FD&C Azul No. 1, los filtrados fueron menos azules que sus correspondientes estándares, siendo el efecto más pronunciado con tamaño de partícula menor a 1 mm. • Para la coordenada a^* (dirección del rojo o verde) en el caso del colorante FD&C Rojo No. 40, el filtrado fue menos rojo que su correspondiente estándar para un tamaño de partícula menor a 1 mm y pH ácido, y levemente más rojo para los demás casos.
Brácteas de maíz	<ul style="list-style-type: none"> • Para tamaño de partícula menor a 1 mm, los tiempos promedio de consumo de sobrenadante fueron muy altos (media de 453.59 min) en comparación con el tamaño de partícula $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$, obteniéndose una media de 3.95 min. • Además, pudo observarse una disminución del volumen de filtrado para tamaño de partícula menor a 1 mm (media de 21.33 ml) en comparación con el tamaño de partícula $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$, obteniéndose una media de 29.65 ml. 	<ul style="list-style-type: none"> • Según los datos obtenidos, para la coordenada L^* (luminosidad) se observó que los filtrados fueron más pálidos que sus correspondientes estándares para ambos colorantes, siendo el efecto más pronunciado con tamaño de partícula menor a 1 mm y pH ácido. • Para la coordenada b^* (dirección del amarillo o azul) en el caso del colorante FD&C Azul No. 1, los filtrados fueron menos azules que sus correspondientes estándares, siendo el efecto más pronunciado con tamaño de partícula menor a 1 mm. • Para la coordenada a^* (dirección del rojo o verde) en el caso del colorante FD&C Rojo No. 40, el filtrado fue menos rojo que su correspondiente estándar para un tamaño de partícula menor a 1 mm y pH ácido, y levemente más rojo para los otros casos.

Nota: Elaboración propia.

6.3. Cálculo de la diferencia de color (ΔE^*ab)

La Tabla 6.3. muestra la discusión de la diferencia de color entre estándares y filtrados tomando en cuenta cada residuo agroindustrial.

Tabla 6.3.*Discusión de la diferencia de color (ΔE^*ab) entre estándares y filtrados*

Residuo agroindustrial	Diferencia de color (ΔE^*ab) entre estándares y filtrados
Escamas de pescado	<ul style="list-style-type: none"> Según los datos obtenidos y para ambos colorantes, la diferencia de color fue más pronunciada para tamaños de partícula menor a 1 mm y la influencia del pH fue mínima.
Olote	<ul style="list-style-type: none"> Para ambos colorantes, la diferencia de color fue más pronunciada para tamaños de partícula menor a 1 mm y con aparente influencia del pH ácido.
Brácteas de maíz	<ul style="list-style-type: none"> Para colorante FD&C Azul No. 1, la diferencia de color fue más pronunciada para tamaños de partícula menor a 1 mm y con aparente influencia del pH ácido. Para colorante FD&C Rojo No. 40, la diferencia de color fue más pronunciada para tamaños de partícula menor a 1 mm y la influencia del pH fue mínima.

Nota: Elaboración propia.

6.4. Análisis de Varianza (ANOVA)

6.4.1. Diseño factorial 2^k

La Tabla 6.4. muestra la discusión de los resultados del diseño factorial 2^k con los factores: tamaño de partícula y pH aplicado a escamas de pescado para cada tipo de colorante.

Tabla 6.4.*Discusión sobre el diseño factorial 2^k aplicado a escamas de pescado*

Factores \ Colorantes	FD&C Azul No. 1	FD&C Rojo No. 40
Tamaño de partícula: <ul style="list-style-type: none"> T < 1 mm 1 mm < T < 3 mm 	<ul style="list-style-type: none"> Hay evidencias estadísticas de que las medias de la diferencia de color entre el estándar y filtrado con ambos valores de tamaño de partícula fueron diferentes, por lo que puede observarse que este factor ejerció influencia en la diferencia de color de las muestras. Según diagrama de cajas, puede apreciarse que los datos obtenidos fueron muy similares para cada valor de la variable, indicando una baja dispersión, por lo que con valor bajo (T < 1 mm) se generó una mayor diferencia de color (52.865 en promedio). 	<ul style="list-style-type: none"> Hay evidencias estadísticas de que las medias de la diferencia de color entre el estándar y filtrado con ambos valores de tamaño de partícula fueron diferentes, por lo que puede observarse que este factor ejerció influencia en la diferencia de color de las muestras. Según diagrama de cajas, puede apreciarse una menor dispersión de los datos para valor bajo (T < 1 mm) y generó una mayor diferencia de color (88.083 en promedio).

<p>pH:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 3 unidades • 8 unidades 	<ul style="list-style-type: none"> • Hay evidencias estadísticas de que las medias de la diferencia de color entre el estándar y filtrado con ambos valores de pH fueron iguales, por lo que puede observarse que este factor no ejerció influencia en la diferencia de color de las muestras. • Según diagrama de cajas, puede apreciarse que los datos obtenidos fueron muy similares en cuanto a la dispersión para ambos valores de la variable, por lo que con valor bajo (3 unidades) y valor alto (8 unidades) no se generó una diferencia de color significativa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hay evidencias estadísticas de que las medias de la diferencia de color entre el estándar y filtrado con ambos valores de pH fueron iguales, por lo que puede observarse que este factor no ejerció influencia en la diferencia de color de las muestras. • Según diagrama de cajas, puede apreciarse que los datos obtenidos fueron muy similares en cuanto a la dispersión para ambos valores de la variable, por lo que con valor bajo (3 unidades) y valor alto (8 unidades) no se generó una diferencia de color significativa.
<p>Interacción entre tamaño de partícula y pH</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ambos factores, tamaño de partícula y pH, interactuaron entre sí ejerciendo influencia en los valores de las medias de la diferencia de color de las muestras. • Según gráfico de perfil, puede observarse que las gráficas de las medias marginales se intersectan, esto es un indicador de la interacción entre ambos factores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ambos factores, tamaño de partícula y pH, no interactuaron entre sí por lo que no ejercieron influencia significativa en las medias de la diferencia de color de las muestras. • Según gráfico de perfil, puede observarse que las gráficas de las medias marginales no se intersectan, esto es un indicador de la no interacción entre ambos factores.

Nota: Elaboración propia.

La Tabla 6.5. muestra la discusión de los resultados del diseño factorial 2^k con los factores: tamaño de partícula y pH aplicado a olote para cada tipo de colorante.

Tabla 6.5.

Discusión sobre el diseño factorial 2^k aplicado a olote

Factores \ Colorantes	FD&C Azul No. 1	FD&C Rojo No. 40
<p>Tamaño de partícula:</p> <ul style="list-style-type: none"> • T < 1 mm • 1 mm < T < 3 mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Hay evidencias estadísticas de que las medias de la diferencia de color entre el estándar y filtrado con ambos valores de tamaño de partícula fueron diferentes, por lo que puede observarse que este factor ejerció influencia en la diferencia de color de las muestras. • Según diagrama de cajas, puede apreciarse una mayor dispersión de los datos para valor bajo (T < 1 mm) y generó una mayor diferencia de color (43.133 en promedio). 	<ul style="list-style-type: none"> • Hay evidencias estadísticas de que las medias de la diferencia de color entre el estándar y filtrado con ambos valores de tamaño de partícula fueron diferentes, por lo que puede observarse que este factor ejerció influencia en la diferencia de color de las muestras. • Según diagrama de cajas, puede apreciarse una mayor dispersión de los datos para valor bajo (T < 1 mm) y generó una mayor diferencia de color (22.917 en promedio).
<p>pH:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 3 unidades • 8 unidades 	<ul style="list-style-type: none"> • Hay evidencias estadísticas de que las medias de la diferencia de color entre el estándar y filtrado con ambos valores de pH fueron diferentes, por lo que puede observarse que este factor ejerció influencia en la diferencia de color de las muestras. • Según diagrama de cajas, puede apreciarse una mayor dispersión de los datos para valor bajo (3 unidades) y generó una mayor diferencia de color (38.683 en promedio). 	<ul style="list-style-type: none"> • Hay evidencias estadísticas de que las medias de la diferencia de color entre el estándar y filtrado con ambos valores de pH fueron diferentes, por lo que puede observarse que este factor ejerció influencia en la diferencia de color de las muestras. • Según diagrama de cajas, puede apreciarse una mayor dispersión de los datos para valor bajo (3 unidades) y generó una mayor diferencia de color (16.750 en promedio).
<p>Interacción entre tamaño de partícula y pH</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ambos factores, tamaño de partícula y pH, interactuaron entre sí ejerciendo influencia en los valores de las medias de la diferencia de color de las muestras. • Según gráfico de perfil, puede observarse que las gráficas de las medias marginales tienden a intersectarse, esto es un indicador de la interacción entre ambos factores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ambos factores, tamaño de partícula y pH, no interactuaron entre sí por lo que no ejercieron influencia significativa en las medias de la diferencia de color de las muestras. • Según gráfico de perfil, puede observarse que las gráficas de las medias marginales no se intersectan, esto es un indicador de la no interacción entre ambos factores.

Nota: Elaboración propia.

La Tabla 6.6. muestra la discusión de los resultados del diseño factorial 2^k con los factores: tamaño de partícula y pH aplicado a brácteas de maíz para cada tipo de colorante.

Tabla 6.6.

Discusión sobre el diseño factorial 2^k aplicado a brácteas de maíz

Factores \ Colorantes	FD&C Azul No. 1	FD&C Rojo No. 40
<p>Tamaño de partícula:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $T < 1$ mm • $1 \text{ mm} < T < 3$ mm 	<ul style="list-style-type: none"> • Hay evidencias estadísticas de que las medias de la diferencia de color entre el estándar y filtrado con ambos valores de tamaño de partícula fueron diferentes, por lo que puede observarse que este factor ejerció influencia en la diferencia de color de las muestras. • Según diagrama de cajas, puede apreciarse una mayor dispersión de los datos para valor bajo ($T < 1$ mm) y generó una mayor diferencia de color (49.867 en promedio). 	<ul style="list-style-type: none"> • Hay evidencias estadísticas de que las medias de la diferencia de color entre el estándar y filtrado con ambos valores de tamaño de partícula fueron diferentes, por lo que puede observarse que este factor ejerció influencia en la diferencia de color de las muestras. • Según diagrama de cajas, puede apreciarse que los datos obtenidos fueron muy similares para cada valor de la variable, indicando una baja dispersión, por lo que con valor bajo ($T < 1$ mm) se generó una mayor diferencia de color (16.783 en promedio).
<p>pH:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 3 unidades • 8 unidades 	<ul style="list-style-type: none"> • Hay evidencias estadísticas de que las medias de la diferencia de color entre el estándar y filtrado con ambos valores de pH fueron diferentes, por lo que puede observarse que este factor ejerció influencia en la diferencia de color de las muestras. • Según diagrama de cajas, puede apreciarse una mayor dispersión de los datos para valor bajo (3 unidades) y generó una mayor diferencia de color (40.617 en promedio). 	<ul style="list-style-type: none"> • Hay evidencias estadísticas de que las medias de la diferencia de color entre el estándar y filtrado con ambos valores de pH fueron iguales, por lo que puede observarse que este factor no ejerció influencia en la diferencia de color de las muestras. • Según diagrama de cajas, puede apreciarse que los datos obtenidos fueron muy similares en cuanto a la dispersión para ambos valores de la variable, por lo que con valor bajo (3 unidades) y valor alto (8 unidades) no se generó una diferencia de color significativa.

<p>Interacción entre tamaño de partícula y pH</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ambos factores, tamaño de partícula y pH, interactuaron entre sí ejerciendo influencia en los valores de las medias de la diferencia de color de las muestras. • Según gráfico de perfil, puede observarse que las gráficas de las medias marginales tienden a intersectarse, esto es un indicador de la interacción entre ambos factores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ambos factores, tamaño de partícula y pH, no interactuaron entre sí por lo que no ejercieron influencia significativa en las medias de la diferencia de color de las muestras. • Según gráfico de perfil, puede observarse que las gráficas de las medias marginales no se intersectan, esto es un indicador de la no interacción entre ambos factores.
---	---	--

Nota: Elaboración propia.

6.4.2. Diseño completamente al azar

La Tabla 6.7. muestra la discusión de los resultados del diseño completamente al azar de las diferencias de color de los residuos agroindustriales para cada uno de los colorantes.

Tabla 6.7.

Discusión sobre el diseño completamente al azar

Tipo de residuo \ Tipo de colorante	FD&C Azul No. 1	FD&C Rojo No. 40
<ul style="list-style-type: none"> • Escamas de pescado • Olote • Brácteas de maíz 	<ul style="list-style-type: none"> • Las diferencias de los promedios de la diferencia de color (ΔE^*ab) entre el estándar y filtrado no fueron estadísticamente significativas para este colorante, considerándose que fueron iguales en los tres residuos agroindustriales. • Para cada par de residuos en estudio, el intervalo de confianza entre el límite inferior y el límite superior incluyó al valor cero (ya que los valores pasaron de un número negativo a un número positivo). 	<ul style="list-style-type: none"> • Las diferencias de los promedios de la diferencia de color (ΔE^*ab) entre el estándar y filtrado fueron estadísticamente significativas para este colorante, siendo estas diferencias más notables entre las escamas de pescado y olote, así como entre las escamas de pescado y brácteas de maíz. Puede notarse que, para estas comparaciones, el intervalo de confianza no incluyó al cero, es decir, los promedios no fueron iguales. • En base a lo anterior, puede determinarse que el mejor residuo agroindustrial como adsorbente para este colorante fue las escamas de pescado (50.692 en promedio); en segundo lugar el olote (13.700 en promedio) y, por último, las brácteas de maíz (10.842 en promedio).

Nota: Elaboración propia.

6.4.3. Diseño de bloques completamente al azar

La Tabla 6.8. muestra la discusión de los resultados del diseño de bloques completamente al azar sobre las diferencias de color de los residuos agroindustriales, al interactuar con los dos colorantes.

Tabla 6.8.

Discusión sobre el diseño de bloques completamente al azar

<p>Tipo de residuo \ Tipo de colorante</p>	<ul style="list-style-type: none"> • FD&C Azul No. 1 • FD&C Rojo No. 40
<ul style="list-style-type: none"> • Escamas de pescado • Olote • Brácteas de maíz 	<ul style="list-style-type: none"> • Las diferencias de los promedios de la diferencia de color (ΔE^*ab) entre el estándar y filtrado fueron estadísticamente significativas tomando en cuenta ambos colorantes, siendo estas diferencias más notables entre las escamas de pescado y olote, así como entre las escamas de pescado y brácteas de maíz. Puede notarse que, para estas comparaciones, el intervalo de confianza no incluyó al cero, es decir, los promedios no son iguales. • En base a lo anterior, puede determinarse que el mejor residuo agroindustrial por su alta capacidad adsorbente fue las escamas de pescado (43.283 en promedio); en segundo lugar, las brácteas de maíz (23.508 en promedio) y, por último, el olote (22.958 en promedio), presentando estos últimos una capacidad adsorbente media muy similar.

Nota: Elaboración propia.

6.5. Comparación con otras investigaciones.

En la Tabla 6.9., puede apreciarse la discusión en cuanto a metodología y resultados de investigaciones anteriores en contraste con el presente trabajo de investigación.

Tabla 6.9.

Discusión en comparación a otras investigaciones

Anteriores investigaciones	Presente investigación
<ul style="list-style-type: none"> • Autor: Jaramillo et al. (2013). • Título: Diseño Box-Behnken para la optimización de la adsorción del colorante azul ácido sobre residuos de flores. • Metodología: residuos de tallos de margarita, rosa y clavel fueron utilizados como adsorbentes; se sometieron a lavado, secado en horno, molido y tamizado. <p>La remoción del azul ácido 9 (AA9) se llevó a cabo bajo sistema discontinuo,</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Metodología: escamas de pescado, olote y brácteas de maíz también se sometieron a pretratamientos, pero el secado fue solar. <p>Se ensayaron dos colorantes (FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40) en sistema continuo de lecho fijo bajo la acción de la fuerza de gravedad. Se mantuvieron fijas las variables: concentración de colorante (50 ppm), volumen de adsorbente en columna (20 ml), volumen de solución colorante en columna (40 ml) y temperatura ambiente.</p>

<p>manteniendo fijas las variables: pH (pH = 2), tamaño de partícula (menor de 500 μm y mayor de 300 μm), agitación (125 rpm) y temperatura ambiente (25 $^{\circ}\text{C}$).</p> <p>La absorbancia fue medida en un espectrofotómetro UV-Vis, para determinar el porcentaje de remoción del colorante.</p> <p>Se realizó un diseño factorial completo 2³, donde se evaluaron los factores: dosificación de adsorbente (2, 5 y 8 g/L), concentración de colorante (5.0, 10.0 y 15.0 mg/L) y tiempo de contacto (30, 75 y 120 min).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resultados: con una optimización del proceso a través de un diseño de superficie Box-Behnken, se logró alcanzar una máxima remoción del 98.5 % de AA9 en tallos de flores a una dosificación de 7.82 g/L, concentración de colorante de 11.67 mg/L y un tiempo de contacto de 104 min. 	<p>Para evaluar la luminosidad del color y la capacidad adsorbente, se calculó la diferencia de color estándar-filtrado (ΔE^*ab), utilizando coordenadas del espacio de color CIELAB mediante una aplicación de teléfono móvil.</p> <p>Se aplicó diseño factorial 2², con los factores: tamaño de partícula (menor a 1 mm y en el rango de mayor a 1 mm pero menor a 3 mm) y pH (3 y 8) realizado para cada colorante y por cada residuo agroindustrial; diseño completamente al azar para cada colorante y diseño de bloques completamente al azar, siendo los bloques cada colorante y los tratamientos cada uno de los residuos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resultados: se ensayaron los residuos por separado y no como una mezcla de biomasa. Para los tres residuos agroindustriales, el tamaño de partícula menor a 1 mm, ejerció influencia en las medias de la diferencia de color para los dos colorantes. El pH, a valor bajo de 3 unidades, sí ejerció influencia para olote y ambos colorantes, así como para brácteas de maíz y colorante FD&C Azul No. 1. El mejor residuo agroindustrial como adsorbente fue las escamas de pescado, luego las brácteas de maíz y, por último, el olote.
<ul style="list-style-type: none"> • Autores: González y Ladino (2018). • Título: Determinación de la eficiencia de bioadsorción del colorante rojo allura #40, utilizando tusa de maíz, cáscara de banano y cascarilla de arroz; aplicado a aguas sintéticas. • Metodología: la preparación de los materiales adsorbentes implicó enjuagues, secado en horno, lavados con agua destilada y disolución de peróxido de hidrógeno (0.1 %) hasta obtener un material libre de materia orgánica, así como secado final en horno, molido y tamizado. <p>Se implementó tanto el método discontinuo como en columna bajo la acción de la fuerza de gravedad. Se mantuvo constante la temperatura ambiente, tiempo de contacto (2 h), concentración del colorante (10 mg/L), dosis del bioadsorbente (1 g) y volumen de la solución (25 mL).</p> <p>Se utilizó la técnica espectrofotométrica para la determinación del porcentaje de remoción.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Metodología: escamas de pescado, olote y brácteas de maíz también se sometieron a pretratamientos, realizando solo una etapa de enjuagues y sin peróxido de hidrógeno (agente oxidante) para evitar posibles efectos en la capacidad adsorbente y mantener la baja inversión en su acondicionamiento, el secado fue solar. <p>Se ensayaron dos colorantes (FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40) en sistema continuo de lecho fijo bajo la acción de la fuerza de gravedad. Se mantuvieron fijas las variables: concentración de colorante (50 ppm), volumen de adsorbente en columna (20 ml), volumen de solución colorante en columna (40 ml) y temperatura ambiente.</p> <p>Para evaluar la luminosidad del color y la capacidad adsorbente, se calculó la diferencia de color estándar-filtrado (ΔE^*ab), utilizando coordenadas del espacio de color CIELAB mediante una aplicación de teléfono móvil.</p> <p>Se aplicó diseño factorial 2², con los factores: tamaño de partícula (menor a 1 mm</p>

<p>Se tuvieron en cuenta las variables: pH (2 y 4), material adsorbente (tusa de maíz, cáscara de banano y cascarilla de arroz) y tamaño de partícula (0.335, 0.5, 0.8, 1 y 2 mm).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resultados: para la tusa de maíz, el mejor porcentaje de remoción fue del 99.911 % a un pH de 2 y un tamaño de partícula de 0.335 mm, mientras que a un pH de 4 y al mismo tamaño de partícula la remoción fue 95.824 % en prueba batch, demostrando que en medios más ácidos la capacidad de adsorción es mayor. Para la prueba en columna se replicaron las condiciones óptimas de la prueba batch con la tusa de maíz, en donde se obtuvo un porcentaje de remoción de 99.657 %. El material adsorbente con mayor eficiencia promedio de remoción fue la tusa de maíz, seguido por la cáscara de banano, y por último, la cascarilla de arroz. 	<p>y en el rango de mayor a 1 mm pero menor a 3 mm) y pH (3 y 8) realizado para cada colorante y por cada residuo agroindustrial; diseño completamente al azar para cada colorante y diseño de bloques completamente al azar, siendo los bloques cada colorante y los tratamientos cada uno de los residuos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resultados: para los tres residuos agroindustriales, el tamaño de partícula menor a 1 mm, ejerció influencia en las medias de la diferencia de color para los dos colorantes. El pH, a valor bajo de 3 unidades, sí ejerció influencia para olote y ambos colorantes. El mejor residuo agroindustrial como adsorbente fue las escamas de pescado (origen animal), luego las brácteas de maíz y olote (origen vegetal).
<ul style="list-style-type: none"> • Autores: Moreno et al. (2012). • Título: Diseño estadístico para la remoción eficiente del colorante rojo 40 sobre tusa de maíz. • Metodología: el pretratamiento incluyó enjuague, molienda, tamizado, lavado con agua desionizada hasta remover la materia orgánica y secado en horno. <p>La adsorción se realizó en un sistema discontinuo. Los parámetros fijos para este estudio fueron: la agitación (125 rpm), volumen (25 mL), temperatura ambiente (25 °C) y tamaño de partícula (menor de 0.75 mm).</p> <p>El método de cuantificación del colorante fue la espectrofotometría Ultravioleta-Visible, siendo la variable respuesta el porcentaje de remoción del rojo 40.</p> <p>Las variables estudiadas en el diseño factorial 2⁴ fueron: la concentración inicial de colorante (10, 22.5 y 35 mg/L), dosificación del adsorbente (1, 2.4 y 3.8 g/L), tiempo de contacto (2, 4 y 6 h) y pH (2, 3 y 4).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resultados: las mejores condiciones se alcanzaron a un pH ácido (pH = 2), dosificación del adsorbente (3.8 g/L), concentración de colorante (10 mg/L) y tiempo de contacto (2 h). El pH fue la variable más significativa y una remoción máxima del 99 % fue alcanzada con el modelo estadístico obtenido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Metodología: escamas de pescado, olote y brácteas de maíz también se sometieron a pretratamientos, no se realizó lavado con agua desionizada para evitar posibles efectos en la capacidad adsorbente y mantener la baja inversión en su acondicionamiento, el secado fue solar. <p>Se ensayaron dos colorantes (FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40) en sistema continuo de lecho fijo bajo la acción de la fuerza de gravedad. Se mantuvieron fijas las variables: concentración de colorante (50 ppm), volumen de adsorbente en columna (20 ml), volumen de solución colorante en columna (40 ml) y temperatura ambiente.</p> <p>Para evaluar la luminosidad del color y la capacidad adsorbente, se calculó la diferencia de color estándar-filtrado (ΔE^*_{ab}), utilizando coordenadas del espacio de color CIELAB mediante una aplicación de teléfono móvil.</p> <p>Se aplicó diseño factorial 2², con los factores: tamaño de partícula (menor a 1 mm y en el rango de mayor a 1 mm pero menor a 3 mm) y pH (3 y 8) realizado para cada colorante y por cada residuo agroindustrial; diseño completamente al azar para cada colorante y diseño de bloques completamente al azar, siendo los bloques cada colorante y los tratamientos cada uno de los residuos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resultados: para los tres residuos agroindustriales, el tamaño de partícula

	<p>menor a 1 mm, ejerció influencia en las medias de la diferencia de color para los dos colorantes. El pH, a valor bajo de 3 unidades, sí ejerció influencia para olote y ambos colorantes.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Autores: Hormaza et al. (2014). • Título: Remoción de azul brillante mediante columnas empacadas usando tuza de maíz. • Metodología: la tuza de maíz se sometió a molienda, tamizado, lavado con agua destilada y peróxido de hidrógeno (5 %) con el fin de obtener el residuo libre de materia orgánica y secado artificial. <p>Los experimentos fueron realizados en una columna de vidrio (2.6 cm de diámetro interno y 48 cm de altura) a flujo continuo ascendente controlado con una bomba peristáltica. Se dejó constante la velocidad de entrada (20 mL/min) y la concentración del colorante (100 mg/L).</p> <p>La concentración de azul brillante (AB) en cada una de las muestras recolectadas fue cuantificada por medio de espectroscopia de UV-Vis.</p> <p>Las variables evaluadas fueron: pH de la solución (2, 6 y 9), tamaño de partícula del adsorbente (0.3 mm < x < 0.5 mm y 0.5 mm < x < 0.7 mm) y altura del lecho empacado (10, 15 y 20 cm). Los resultados experimentales se ajustaron al concepto de curva de ruptura según los modelos de Thomas, Adams-Bohart, Yoon-Nelson y BDST, analizando como variable principal el efecto del tamaño del lecho mediante regresión no lineal, para obtener las características principales y determinar las mejores condiciones de operación del sistema.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resultados: el proceso de adsorción en continuo se ve favorecido a pH ácido (pH=2), tamaño de partícula (0.3 mm < x < 0.5 mm) y una mayor altura de la columna (20 cm). 	<ul style="list-style-type: none"> • Metodología: escamas de pescado, olote y brácteas de maíz también se sometieron a pretratamientos, realizando lavado sin peróxido de hidrógeno (agente oxidante) para evitar posibles efectos en la capacidad adsorbente y mantener la baja inversión en su acondicionamiento, el secado fue solar. <p>Se ensayaron dos colorantes (FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40) en sistema continuo de lecho fijo descendente (bajo la acción de la fuerza de gravedad) utilizando trozos de manguera plástica como columnas (1/2 pulg de diámetro interno y 40 cm de altura). Se mantuvieron fijas las variables: concentración de colorante (50 ppm), volumen de adsorbente en columna (20 ml), volumen de solución colorante en columna (40 ml) y temperatura ambiente.</p> <p>Para evaluar la luminosidad del color y la capacidad adsorbente, se calculó la diferencia de color estándar-filtrado (ΔE^*_{ab}), utilizando coordenadas del espacio de color CIELAB mediante una aplicación de teléfono móvil.</p> <p>Se aplicó diseño factorial 2², con los factores: tamaño de partícula (menor a 1 mm y en el rango de mayor a 1 mm pero menor a 3 mm) y pH (3 y 8) realizado para cada colorante y por cada residuo agroindustrial; diseño completamente al azar para cada colorante y diseño de bloques completamente al azar, siendo los bloques cada colorante y los tratamientos cada uno de los residuos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resultados: el pH, a valor bajo de 3 unidades, sí ejerció influencia para olote y ambos colorantes. Para los tres residuos agroindustriales, el tamaño de partícula menor a 1 mm, ejerció influencia en las medias de la diferencia de color para los dos colorantes.
<ul style="list-style-type: none"> • Autores: Bonilla et al. (2015). • Título: Remoción de pigmentos de efluentes a través de un biofiltro de gravedad de lecho fijo de exoesqueletos de especies marinas. • Metodología: las escamas de pescado se sometieron a lavado, secado solar durante entre 6 a 10 días y trituración a diámetros 	<ul style="list-style-type: none"> • Metodología: escamas de pescado, olote y brácteas de maíz también se sometieron a pretratamientos, donde el secado solar tuvo una duración de 7 días. No se realizó lavado del material previo a las pruebas para no interferir en las características nativas de los adsorbentes. <p>Se ensayaron dos colorantes</p>

<p>menores a 1.18 mm. El proceso de lavado de las escamas se realizó con agua para que soltara su color natural y quedara libre de cualquier colorante no deseado.</p> <p>Se elaboró un biofiltro de lecho fijo, el efluente pasó por el efecto de acción de la gravedad, se ensayaron los compuestos orgánicos: sangre (pigmento animal) y clorofila (pigmento vegetal) así como el compuesto inorgánico azul de metileno.</p> <p>Para el caso del azul de metileno, se cuantificaron los parámetros oxígeno disuelto (mg/L), conductividad (mS/cm), temperatura (°C), salinidad (%), pH y turbidez (NTU) del efluente, antes y después de la biofiltración.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resultados: el biofiltro construido fue capaz de remover el pigmento orgánico vegetal en una única etapa, refiltrado posterior fue necesario para el efluente con pigmento orgánico animal. Al probar con el compuesto inorgánico, el resultado fue más efectivo, dando una filtración más rápida en una sola etapa, se observó que la solución con el pigmento estaba más turbia y la solución tratada no, pues se asemejó más al agua del grifo. 	<p>(FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40) en sistema continuo de lecho fijo bajo la acción de la fuerza de gravedad. Se mantuvieron fijas las variables: concentración de colorante (50 ppm), volumen de adsorbente en columna (20 ml), volumen de solución colorante en columna (40 ml) y temperatura ambiente.</p> <p>Para evaluar la luminosidad del color y la capacidad adsorbente, se calculó la diferencia de color estándar-filtrado (ΔE^*ab), utilizando coordenadas del espacio de color CIELAB mediante una aplicación de teléfono móvil.</p> <p>Se aplicó diseño factorial 2^2, con los factores: tamaño de partícula (menor a 1 mm y en el rango de mayor a 1 mm pero menor a 3 mm) y pH (3 y 8) realizado para cada colorante y por cada residuo agroindustrial; diseño completamente al azar para cada colorante y diseño de bloques completamente al azar, siendo los bloques cada colorante y los tratamientos cada uno de los residuos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resultados: el mejor residuo agroindustrial como adsorbente fue las escamas de pescado (origen animal) en contraste con las brácteas de maíz y olote (origen vegetal), utilizando soluciones de colorantes artificiales.
<ul style="list-style-type: none"> • Autores: Carriazo et al. (2010). • Título: Propiedades adsorptivas de un carbón activado y determinación de la ecuación de Langmuir empleando materiales de bajo costo. • Metodología: la cáscara de coco fue carbonizada en una mufla, el residuo fue triturado en mortero, tamizado en malla N.º 60-ASTM y activado con solución de ácido nítrico aproximadamente a 3.5 M durante 4 horas a temperatura ambiente, luego se sometió a enjuagues con agua destilada y secado en estufa. <p>Se elaboraron columnas de vidrio (6 mm de diámetro interno y 15 cm de altura) y selladas en la parte inferior con un tapón-filtro de lana de vidrio. Una escala colorimétrica fue preparada a partir de diferentes concentraciones de solución del refresco de uva para lograr una determinación aproximada, por comparación del color, de la concentración de las soluciones luego de los ensayos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Metodología: escamas de pescado, olote y brácteas de maíz también se sometieron a pretratamientos, pero no se obtuvo carbón activado a partir de ellos, utilizándose la biomasa nativa para mantener la baja inversión en su acondicionamiento, el secado fue solar. <p>Se ensayaron dos colorantes (FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40) en sistema continuo de lecho fijo descendente (bajo la acción de la fuerza de gravedad) utilizando trozos de manguera plástica como columnas (1/2 pulg de diámetro interno y 40 cm de altura). Se mantuvieron fijas las variables: concentración de colorante (50 ppm), volumen de adsorbente en columna (20 ml), volumen de solución colorante en columna (40 ml) y temperatura ambiente.</p> <p>Para evaluar la luminosidad del color y la capacidad adsorbente, se calculó la diferencia de color estándar-filtrado (ΔE^*ab), utilizando coordenadas del espacio de color CIELAB mediante una aplicación de teléfono móvil.</p>

<p>Para el primer ensayo, cada tubo se empacó con carbón activado a diferentes alturas, se hicieron pasar (por efecto de gravedad) 1.5 mL de solución a 2×10^4 ppm de refresco por el interior de cada columna, se comparó el color de la solución resultante utilizando la escala de colores para determinar la concentración remanente aproximada. El segundo ensayo se desarrolló variando la concentración de la solución del mismo refresco, pero manteniendo constante la altura de carbón activado (1 cm).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resultados: pudo establecerse que la velocidad de adsorción es proporcional al área disponible del adsorbente, así también la velocidad de adsorción es proporcional a la concentración de solución, verificándose experimentalmente la ecuación clásica de Langmuir para fenómenos de adsorción física. 	<p>Se aplicó diseño factorial 2^2, con los factores: tamaño de partícula (menor a 1 mm y en el rango de mayor a 1 mm pero menor a 3 mm) y pH (3 y 8) realizado para cada colorante y por cada residuo agroindustrial; diseño completamente al azar para cada colorante y diseño de bloques completamente al azar, siendo los bloques cada colorante y los tratamientos cada uno de los residuos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resultados: para los tres residuos agroindustriales, el tamaño de partícula menor a 1 mm, ejerció influencia en las medias de la diferencia de color para los dos colorantes. No se pudieron construir gráficas como las isothermas de Langmuir, debido a que no se desarrolló un procedimiento en el cual la diferencia de color se relacionara con la concentración estimada de colorante residual en los filtrados.
--	--

Nota: Elaboración propia con datos tomados de las fuentes ya mencionadas.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES GENERALES

Tomando en cuenta el desarrollo de este proyecto y los resultados obtenidos, se presentan las siguientes conclusiones:

La presencia de colorantes en las aguas, sobre todo a altas concentraciones y sin un manejo adecuado, puede tener repercusión en el medio ambiente, es por ello que el uso de residuos de origen agroindustrial no solo permite su valorización o aprovechamiento, sino que constituye una opción económica y práctica en la remoción de colorantes, en relación a los adsorbentes convencionales como el carbón activado.

Los residuos agroindustriales frescos de origen vegetal (olote y brácteas de maíz) presentaron mayor contenido de humedad que el residuo agroindustrial fresco de origen animal (escamas de pescado) debido a su diferente estructura y composición química, por ser materiales perecederos es crucial la eliminación del mayor contenido de agua presente, ya como productos secos alcanzaron valores cercanos al 10 % de humedad en base húmeda, pudiendo establecerse que el secado solar aplicado fue adecuado, retrasando el deterioro y promoviendo así su conservación.

A pesar de la limitación para el uso de un colorímetro o espectrofotómetro en la generación de los datos de color (coordenadas del espacio de color, curvas de reflectancia espectral, etc.) se obtuvieron valores de las coordenadas del espacio de color CIELAB para estándares de colorantes y filtrados con muy buena precisión, utilizando la aplicación para teléfono móvil "Colorimeter", resaltando su facilidad de uso y rapidez, constituyendo una opción viable para este tipo de investigaciones.

En los ensayos de adsorción en lecho fijo, para los tres residuos agroindustriales se observó que, entre más pequeño es el tamaño de partícula mayor es el tiempo necesario para el consumo del sobrenadante y menor es el volumen de filtrado obtenido. El tiempo de consumo del sobrenadante para escamas de pescado fue relativamente corto y el volumen de filtrado levemente mayor en comparación al olote y brácteas de maíz. Un lecho con mayor espacio entre partículas ocupado por aire, es menos compacto permitiendo así menor interacción y un mayor caudal de líquido a través del mismo, pero además ejerce influencia la estructura y composición química, así como el contenido de humedad previo al ensayo.

Para los tres residuos agroindustriales, se observaron filtrados más pálidos que sus correspondientes estándares, a un tamaño de partícula menor a 1 mm. Para el colorante FD&C Azul No. 1 en los tres residuos agroindustriales, la coordenada b^* (dirección del amarillo o azul) de los filtrados, indicó que fueron menos azules que sus correspondientes estándares, siendo el efecto más pronunciado con tamaño de partícula menor a 1 mm. Para el colorante FD&C Rojo No. 40, la coordenada a^* (dirección del rojo o verde) de los filtrados, no indicó claramente que fueran menos rojos que sus correspondientes estándares, para un tamaño de partícula menor a 1 mm.

Para los tres residuos agroindustriales, el tamaño de partícula ejerció influencia en las medias de la diferencia de color entre estándares y filtrados para los colorantes FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40, siendo superior para el tamaño de partícula menor a 1 mm (valor más bajo).

En cuanto a la variable pH, se comprobó que, para escamas de pescado y ambos colorantes, así como para brácteas de maíz y colorante FD&C Rojo No. 40 no ejerció influencia en las medias de la diferencia de color de las muestras; pero en el caso del olote y ambos colorantes, así como para brácteas de maíz y colorante FD&C Azul No. 1 sí ejerció influencia sobre todo a valor bajo ($\text{pH} = 3$).

Se comprobó estadísticamente que, para los tres residuos agroindustriales, el tamaño de partícula y pH interactuaron entre sí ejerciendo influencia en los valores de las medias de la diferencia de color de las muestras para el colorante FD&C Azul No. 1, pero no hubo interacción de los factores para el colorante FD&C Rojo No. 40.

Para el colorante FD&C Azul No. 1, las medias de la diferencia de color entre estándares y filtrados no fue significativa en los tres residuos agroindustriales; en cambio, para el colorante FD&C Rojo No. 40 se comprobó que las medias fueron significativas para los pares: escamas de pescado-olote y escamas de pescado-brácteas de maíz, siendo las escamas de pescado el mejor residuo agroindustrial como adsorbente para este último colorante. Puede inferirse que la diferencia pudo estar relacionada con la estructura química de los colorantes y su afinidad con los adsorbentes, siendo el FD&C Azul No. 1 perteneciente a la familia de los triarilmetanos y el FD&C Rojo No. 40 perteneciente a la familia de los azocompuestos.

Al contrastar los tres residuos agroindustriales y los dos colorantes en estudio, se observaron diferencias significativas entre las medias de la diferencia de color estándar-filtrado, por lo que se determinó que el mejor residuo agroindustrial como adsorbente fue las escamas de pescado (ΔE^*_{ab} , promedio = 43.283); en segundo lugar, las brácteas de maíz (ΔE^*_{ab} , promedio = 23.508) y, por último, el olote (ΔE^*_{ab} , promedio = 22.958), demostrándose que la capacidad bioadsorbente es similar para los residuos derivados del maíz.

CAPÍTULO 8: RECOMENDACIONES

Tomando en cuenta el desarrollo de este proyecto y los resultados obtenidos, se presentan las siguientes recomendaciones:

Almacenar los residuos agroindustriales secos, debido a su comportamiento higroscópico, protegidos de la luz y de la humedad ambiental, con lo cual se mantiene disminuida su actividad enzimática y microbiana, para que no ejerzan influencia en los posteriores ensayos de adsorción.

Evaluar el efecto de la decoloración de los residuos agroindustriales derivados del maíz (olote y brácteas) con peróxido de hidrógeno como agente oxidante, constituyendo un pretratamiento a los ensayos de adsorción, y disminuir así la influencia que ejerce la disolución de sus pigmentos, sobre todo con valores bajos de tamaño de partícula y pH, y tiempos prolongados de contacto con las soluciones colorantes.

Ensayar, a nivel de laboratorio, la bioadsorción de estos colorantes utilizando otras configuraciones, como por ejemplo la adsorción en vasos agitados, en la cual se promueve un íntimo contacto sólido/líquido debido a su mayor dispersión, comparando así las diferencias de color tomando en cuenta variables tales como el pH de las soluciones de colorantes, temperatura del sistema, tiempo de contacto, velocidad de agitación, etc.

Utilizar otros tipos de colorantes, naturales o artificiales, como la clorofila, carotenoides, azul de metileno, FD&C Amarillo No. 5, etc., para contrastar su comportamiento frente a la biomasa adsorbente bajo las condiciones experimentales establecidas en esta investigación.

Garantizar condiciones ambientales uniformes y controladas para una medición precisa de las coordenadas del espacio de color, definiendo el tipo de iluminante, ángulo de iluminación, distancia de la muestra con el lente de la cámara, así como la exclusión de la iluminación exterior, esto se consigue mediante el uso de una cabina de luz.

Considerar técnicas espectrofotométricas que permitan registrar la concentración residual o porcentaje de remoción de colorantes en los filtrados, así como la construcción de las isothermas de adsorción de los ensayos, para comprender mejor el fenómeno y evaluar la capacidad máxima de adsorción de los residuos en estudio.

Expandir el alcance de la investigación, considerando aguas coloridas derivadas de industrias textiles, alimentarias o farmacéuticas, en lugar de las aguas sintéticas, para evaluar la eficacia de los residuos agroindustriales en contextos determinados.

BIBLIOGRAFÍA

Aditives & Colors (Ed.) (2018). *Manual explicativo de los colorantes artificiales*.
<https://bit.ly/3uDeqIS>

Alonso, J. (Ed.) (2019). *Taller sobre el color y su medición*. <https://bit.ly/3fT5dXq>

ACQUATECNOLOGIA® S.A.C. (Ed.) (2021). *Carbón Activado Granular*.
<https://bit.ly/34Ak4ki>

Aucancela, E. (2018). *Estudio de la correlación hidráulica y la remoción de contaminantes en agua residual sintética mediante un lecho filtrante de Musa paradisiaca* [Trabajo de Titulación, Universidad Nacional de Chimborazo]. <https://bit.ly/3g2MHMc>

Barrios-Ziolo, L., Gaviria-Restrepo, L., Agudelo, E., y Cardona-Gallo, S. (2015). Tecnologías para la remoción de colorantes y pigmentos presentes en aguas residuales. Una revisión. *DYNA*, 82(191), 118-126. <http://doi.org/10.15446/dyna.v82n191.42924>

Bonilla, R., Campos, M., Concepción, K., Díaz, C., Herrera, H., López, L., y Mojica, S. (2015). Remoción de pigmentos de efluentes a través de un biofiltro de gravedad de lecho fijo de exoesqueletos de especies marinas. *Revista de Iniciación Científica*, 1(2), 73-79. <https://bit.ly/3vGtOVV>

Bujdud, J. (1999). *Medición práctica del color* [Tesis de Máster, Universidad de Guanajuato]. <https://bit.ly/2RS4zSc>

Carriazo, J., Saavedra, M., y Molina, M. (2010). Propiedades adsorptivas de un carbón activado y determinación de la ecuación de Langmuir empleando materiales de bajo costo. *Educación Química*, 21(3), 224-229. [http://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30087-9](http://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30087-9)

Castro, C., Castro, C., y Lovato, Z. (2017). *Uso de subproductos agroindustriales en la formulación de sustrato para la producción de plantines de tomate, en el municipio de San Vicente* [Tesis, Universidad de El Salvador]. <https://bit.ly/3yL7BYO>

CENTA (Ed.) (2018). *Cultivo de maíz (Zea mays L.)*. <https://bit.ly/3p62spZ>

CIE (Ed.) (2021). *About the CIE*. <https://bit.ly/2SO203I>

Contreras, R. (2007). *El origen del color en la naturaleza. Una introducción a la química del color*. Publicaciones Vicerrectorado Académico

Coronado, J. (2007). Escalas de medición. *Paradigmas*, 2(2), 104-125.
<https://bit.ly/3siUrPU>

Datacolor (Ed.) (s.f.). Gestión del color. En Datacolor, *El metamerismo* (p. 13).
<https://bit.ly/3gKrh7J>

Datacolor (Ed.) (s.f.). Principios de la gestión del color. En Datacolor, *El triplete* (pp. 1-2).
<https://bit.ly/3yPB5Vr>

Datacolor (Ed.) (s.f.). Principios de la gestión del color. En Datacolor, *La luz. Las fuentes de luz* (pp. 4-5). <https://bit.ly/3p8c1o9>

Datacolor (Ed.) (2021). *Precise Color Measurements With Our Spectro 1000 Spectrophotometer*. <https://bit.ly/3yTlnIP>

Datacolor (Ed.) (2019). Gestión del color. En Datacolor, *Técnica de medición en la Colorimetría* (pp. 1-3). <https://bit.ly/3g1IacP>

Encyclopædia Britannica, Inc. (Ed.) (2021). *Silica gel*. <https://bit.ly/34A1AQR>

Escarola (Ed.) (2015). *Mazorca*. <https://bit.ly/34A1Mj3>

FEED THE FUTURE (s.f.). *Guía de entrenamiento enfocado a agricultura minifundista en el altiplano occidental de Guatemala*. <https://bit.ly/3dhehF2>

Figuroa, D., Moreno, A., y Hormaza, A. (2015). Equilibrio, termodinámica y modelos cinéticos en la adsorción de Rojo 40 sobre tuza de maíz. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(26), 105-120. <https://doi.org/10.22395/rium.v14n26a7>

Fundación Colorearte (Ed.) (s.f.). *Guía: teoría del color*. <https://bit.ly/3wRBzc1>

Gareca, F. (Ed.) (2011). *Percepción del color*. <https://bit.ly/3fFJymO>

- Gareca, F. (Ed.) (2015). *Percepción y teoría del color*. <https://bit.ly/2RRmkkB>
- García, M. (2016). *El color como recurso expresivo: Análisis de las series de televisión Mad Men y Breaking Bad* [Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid]. <https://bit.ly/3p7OLGY>
- González, W., y Ladino, D. (2018). *Determinación de la eficiencia de bioadsorción del colorante rojo allura #40, utilizando tusa de maíz, cáscara de banano y cascarilla de arroz; aplicado a aguas sintéticas* [Proyecto de investigación, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <https://bit.ly/2TsBm0l>
- Grupo Filtrantes (Ed.) (2018). *Alúmina activada*. <https://bit.ly/3ySE53p>
- Guacho, E. (2014). *Caracterización agro-morfológica del maíz (Zea mays L.) de la localidad San José de Chazo* [Tesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <https://bit.ly/34CjHpf>
- Hernández, K. (2012). *Remoción de colorante azul 1 de soluciones acuosas con una arcilla modificada con cloruro de hierro* [Tesis profesional, Instituto Tecnológico de Toluca]. <https://bit.ly/3fAxgvl>
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill / Interamericana Editores. <https://bit.ly/3iLtnWQ>
- Hormaza, A., Villada, Y., y Orrego, L. (2014). Remoción de azul brillante mediante columnas empacadas usando tusa de maíz. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 5(1), 57-68. <https://bit.ly/2VW21nO>
- Inglezakis, V., y Pouloupoulos, S. (2006). *Adsorption, Ion Exchange and Catalysis. Design of Operations and Environmental Applications*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52783-7.X5000-9>
- Jaramillo, A., Echavarría, A., y Hormaza, A. (2013). Diseño Box-Behnken para la optimización de la adsorción del colorante azul ácido sobre residuos de flores. *Ingeniería y Ciencia*, 9(18), 75-91. <https://bit.ly/3shl2vK>

Konica Minolta Sensing, Inc. (Ed.) (2007). *Precise Color Communication*.
<https://bit.ly/3ibTmGD>

Lado B (Ed.) (2012). *Investigadora mexicana produce biocombustible a partir del olote*.
<https://bit.ly/3c77xJs>

Letona, M. (2014). *Implementación de un método de cuantificación de los colorantes artificiales FD&C amarillo No.5 (tartrazina), FD&C rojo No.3 (eritrosina), FD&C rojo No.40 (rojo allura), FD&C amarillo No.6 (amarillo ocaso), FD&C azul No.1 (azul brillante) en el área de fisicoquímico de alimentos del Laboratorio Nacional de Salud (LNS) [Informe de Tesis, Universidad de San Carlos de Guatemala]*. <https://bit.ly/3uBI7K3>

López, L. (2017). *Diseño de un sistema de visión por ordenador para la caracterización del color del tomate (Solanum lycopersicum L.)* [Trabajo fin de Máster, Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://bit.ly/3fZDHHN>

Lumega (Ed.) (2017). *Un mundo de iluminación: ¿Qué es la temperatura del color?*
<https://bit.ly/3i3pD2F>

Marcano, D. (Ed.) (2018). *Introducción a la Química de los Colorantes*.
<https://bit.ly/3fD27bh>

Mariñas, O. (2018). *Fundamentos teóricos del arte visual* [Monografía, Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle]. <https://bit.ly/3yVb6Mj>

MARN (Ed.) (2013). *Informe de la calidad del agua de los ríos El Salvador / 2012-2013*.
<https://bit.ly/3yOxPtw>

Mathias-Rettig, K., y Ah-Hen, K. (2014). El color en los alimentos un criterio de calidad medible. *Agro Sur*, 42(2), 57-66. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2014.v42n2-07>

MercadoLibre S.R.L. (Ed.) (2021). *Carbón Activado Vegetal En Polvo Fino X 20 Kg 40litros Aprox*. <https://bit.ly/3yRQZ1H>

Mihelcic, J., y Zimmerman, J. (2012). *Ingeniería ambiental: fundamentos, sustentabilidad, diseño*. Alfaomega Grupo Editor.

Montesinos, R. (2003). *Especificación cromática de gamas de colores usadas en la industria del calzado* [Trabajo de Investigación, Universidad de Alicante].

<https://bit.ly/3uyLeTj>

Moreno, A., Figueroa, D. y Hormaza, A. (2012). Diseño estadístico para la remoción eficiente del colorante rojo 40 sobre tusa de maíz. *Producción + Limpia*, 7(2), 9-19.

<https://bit.ly/3I5yoL2>

Navarrete, R. (Ed.) (s.f.). *El color normalizado*. <https://bit.ly/34NSoIZ>

Navarro, E. (Ed.) (2005). *El color*. <https://bit.ly/3vAEBB4>

Núñez, M. (2007). Las variables: estructura y función en la hipótesis. *Investigación Educativa*, 11(20), 163- 179. <https://bit.ly/3mc0Mff>

Ortigoza, J., López, C., y González, J. (Ed.) (2019). *Guía técnica cultivo de maíz*.

<https://bit.ly/2SLzGP6>

Ortiz, F. (2002). *Procesamiento morfológico de imágenes en color. Aplicación a la reconstrucción geodésica* [Tesis de Doctorado, Universidad de Alicante].

<https://bit.ly/3p8CcLp>

PACIFIC AGRICULTURAL EXPORT CO., LTD. (Ed.) (2019). *Dried fish scale (black tilapia; red tilapia, mud carp)*. <https://bit.ly/3p6xZrE>

PCE Instruments (Ed.) (s.f.). *Colorímetro PCE-CSM 2 y PCE-CSM 4*. <https://bit.ly/3uyk6ni>

Pesok, J. (Ed.) (2017). *El color su percepción y su medición*. <https://bit.ly/3vKSIUI>

Prado-Martínez, M., Anzaldo-Hernández, J., Becerra-Aguilar, B., Palacios-Juárez, H., Vargas-Radillo, J., y Rentería-Urquiza, M. (2012). Caracterización de hojas de mazorca de maíz y de bagazo de caña para la elaboración de una pulpa celulósica mixta. *Madera y Bosques*, 18(3), 37-51. <https://doi.org/10.21829/myb.2012.183357>

Quevedo, J. (2017). *Determinación de la capacidad de bioadsorción de plomo aprovechando las propiedades del exoesqueleto del camarón* [Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana]. <https://bit.ly/3p7jaFn>

Quintero, J., y Zapata, J. (2017). Optimización de la Extracción del Colágeno Soluble en Ácido de Subproductos de Tilapia Roja (*Oreochromis spp*) mediante un Diseño de Superficie de Respuesta. *Información Tecnológica*, 28(1), 109-120.

<http://doi.org/10.4067/S0718-07642017000100011>

Quispe, J. (2017). *Bioadsorción con escamas de pescado para la remoción de plomo en aguas fortificadas del río San Juan-Pasco, 2017* [Tesis, Universidad César Vallejo].

<https://bit.ly/34xG4Mv>

Ramos, C. (2018). *Obtención y caracterización de colágeno a partir de las escamas de pescados rojo y pardo* [Trabajo de titulación, Universidad Central del Ecuador].

<https://bit.ly/3uNfABH>

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA (Ed.) (2021). *Tusa*. <https://bit.ly/2S3ikx8>

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA (Ed.) (2021). *Tuza*. <https://bit.ly/3i5tCvF>

Research Lab Tools (Ed.) (2015). *Lab tools apps*. <https://bit.ly/3fYCdxr>

Rincón, L. (Ed.) (2017). *Estadística descriptiva*. <https://bit.ly/3g3wpDS>

Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., y Nigam, P. (2001). Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, 77(2001), 247-255. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00080-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00080-8)

Roca, A. (2019). *Estudio comparativo del poder biosorbente de la cáscara de naranja y hojas de Neem para la remoción de colorantes en soluciones acuosas* [Tesis, Universidad de Guayaquil]. <https://bit.ly/3yS3j1W>

Rosas, J. (2012). *Aplicación de residuos agrícolas para el tratamiento de agua contaminada con colorantes* [Tesis de Máster, Universidad Autónoma de Nuevo León]. <https://bit.ly/3uCw4fF>

Salcedo, S. (2009). *Caracterización de la actividad decolorante de cepas de basidiomicetos nativas sobre colorantes sintéticos* [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León]. <https://bit.ly/2R7HqdS>

Serra, J., Torres, A., y Delcampo, A. (Ed.) (s.f.). *Cómo describir un color en notación Munsell y NCS (Natural Color System)*. <https://bit.ly/3wJKIZq>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (Ed.) (2017). *El totomoxtle; mucho más que forraje: materia prima hasta para la elaboración de artesanías*. <https://bit.ly/3yRB3fl>

Sharma, S. (2015). *Green Chemistry for Dyes Removal from Wastewater: Research Trends and Applications*. Scrivener Publishing LLC. <https://doi.org/10.1002/9781118721001>

SINCO (Ed.) (s.f.). *FD&C AZUL No. 1*. <https://bit.ly/3i6DSnf>

SINCO (Ed.) (s.f.). *FD&C ROJO No. 40*. <https://bit.ly/3uEtoyj>

Téllez, A. (2010). *Solubilización y estabilidad de las microemulsiones del colorante natural Neocandenatona* [Tesis de Máster, Instituto Politécnico Nacional]. <https://bit.ly/3fUfoLk>

Tien, C. (2019). *Introduction to Adsorption*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-00297-2>

Torres, N., y Gaibor, K. (2015). *Estudio de la aplicación del olote o tusa de maíz para la reducción del color en aguas residuales de la hilandería Guijarro Cantón Guano* [Tesis, Universidad Nacional de Chimborazo]. <https://bit.ly/2To2a1K>

Valladares-Cisneros, M., Valerio, C., de la Cruz, P., y Melgoza, R. (2017). Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 16(31), 55-73. <https://doi.org/10.22395/rium.v16n31a3>

Vásquez, M., Martínez, L., y González, H. (2016). *Caracterización agronómica básica de las principales variedades de maíz criollo que se cultivan en cinco municipios del departamento de Cuscatlán* [Tesis, Universidad de El Salvador]. <https://bit.ly/3i3SCn3>

Walpole, R., Myers, R., Myers, S., y Ye, K. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

X-Rite (Ed.) (2002). *Guía para Entender la Comunicación del Color*.
<https://bit.ly/3wOVCrE>

X-Rite (Ed.) (2016). *A Guide to Understanding Color*. <https://bit.ly/2Rac1rn>

Yslas, K. (2018). *Estudio del efecto de la luz solar y del peróxido de hidrógeno en la degradación de un colorante usando un catalizador de cobre y cobalto* [Tesis, Universidad Autónoma del Estado de México]. <https://bit.ly/3fDROni>

Zambrano, L. (2018). *Remoción de colorantes sintéticos de las aguas residuales de la industria alimentaria usando como material adsorbente biomasa de arroz* [Tesis de Máster, Instituto Politécnico de Leiria]. <https://bit.ly/3p5HLdM>

ANEXOS

Anexo 1. Levantamiento fotográfico de evidencias

1.1. Adquisición de las materias primas



1.2. Pesaje de las materias primas



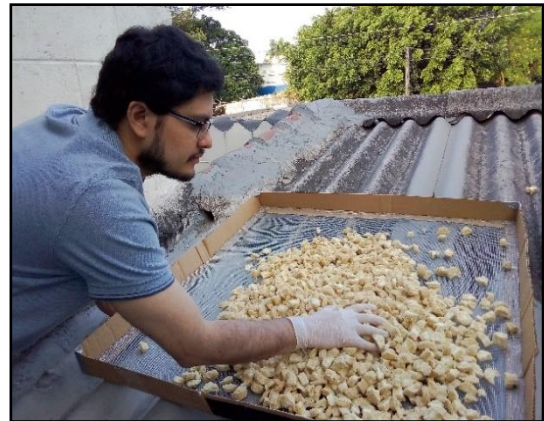
1.3. Reducción de tamaño de las materias primas



1.4. Enjuague de las materias primas



1.5. Secado solar de las materias primas



1.6. Pesaje de los productos secos



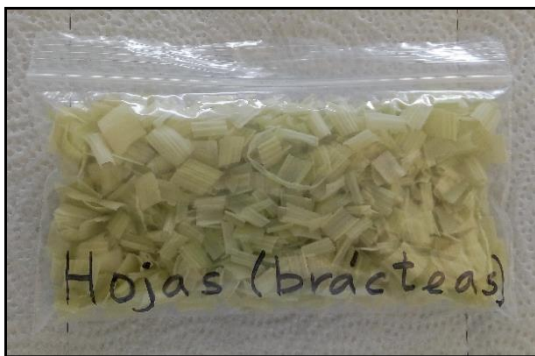
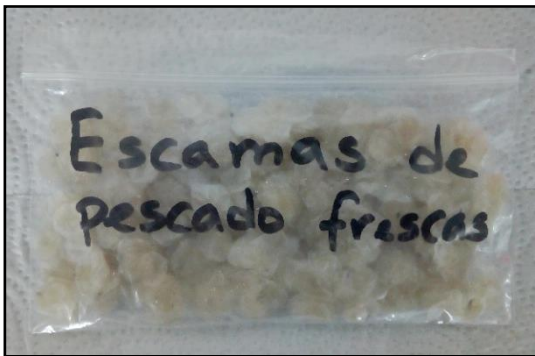
1.7. Reducción de tamaño de los productos secos



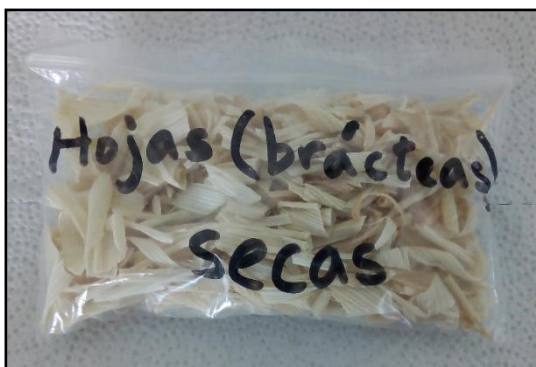
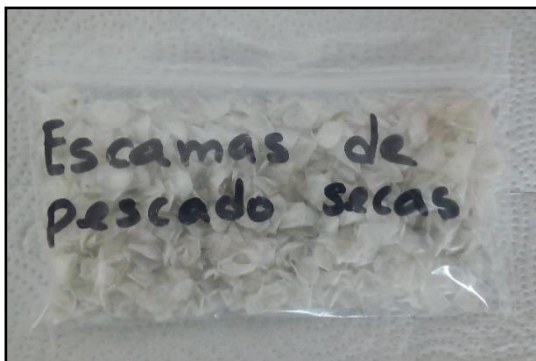
1.8. Tamizado de los productos secos



1.9. Análisis de humedad de las materias primas



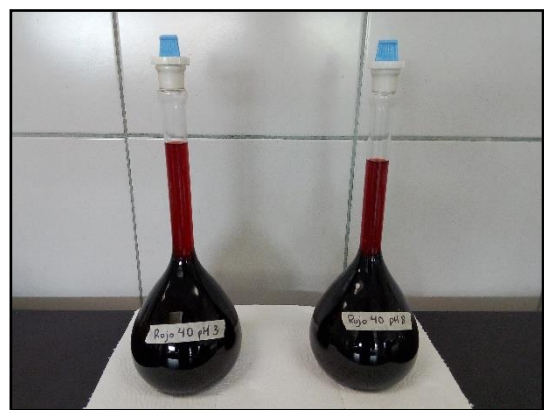
1.10. Análisis de humedad de los productos secos



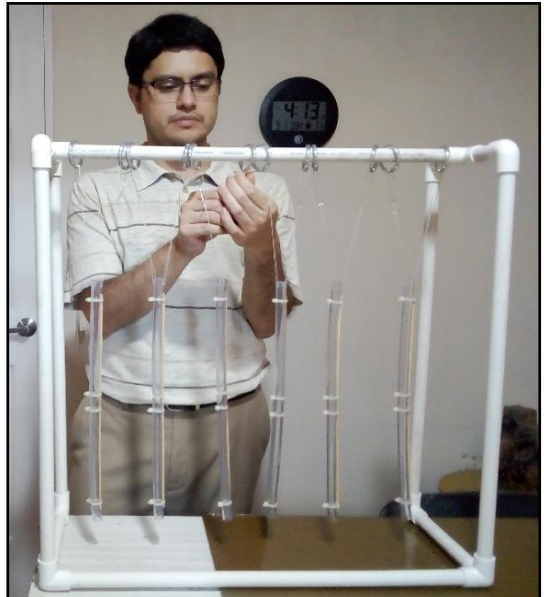
1.11. Preparación de las soluciones de ácido clorhídrico (HCl) 0.1 N e hidróxido de sodio (NaOH) 0.1 N



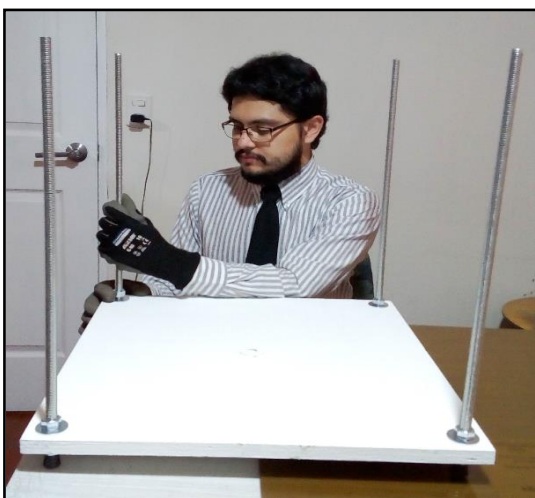
1.12. Preparación de las soluciones sintéticas de colorantes FD&C Azul No. 1 y FD&C Rojo No. 40



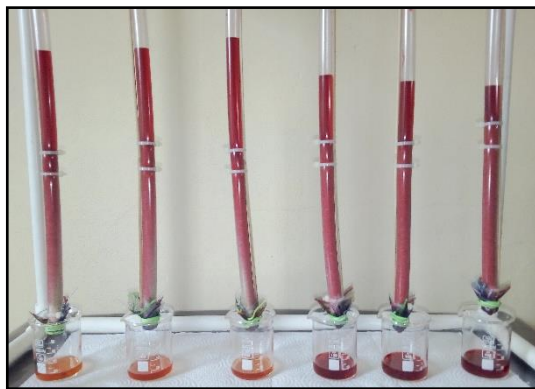
1.13. Construcción del módulo para adsorción en lecho fijo



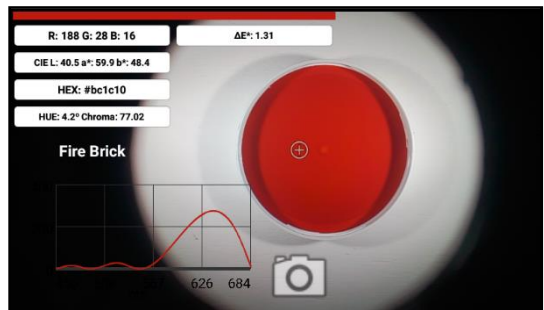
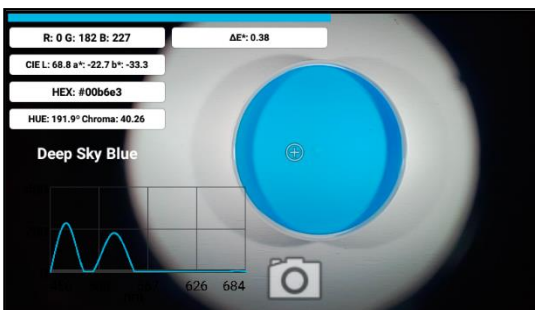
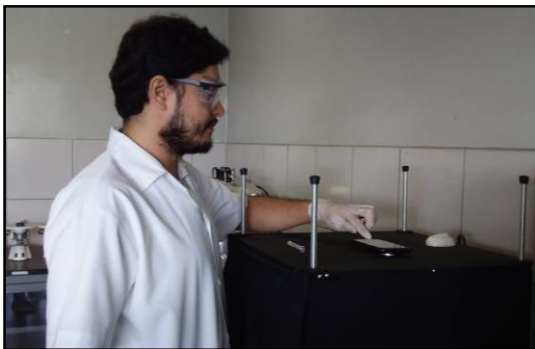
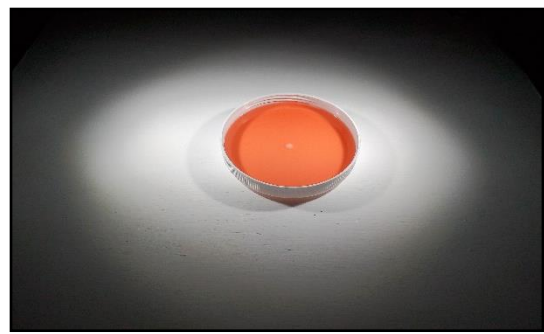
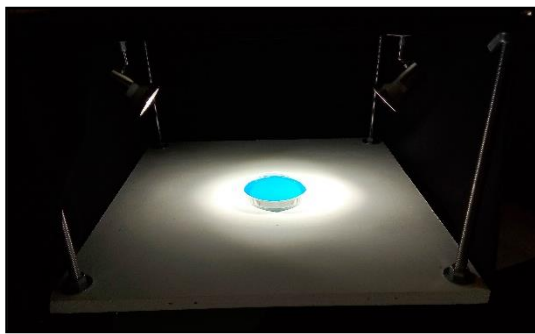
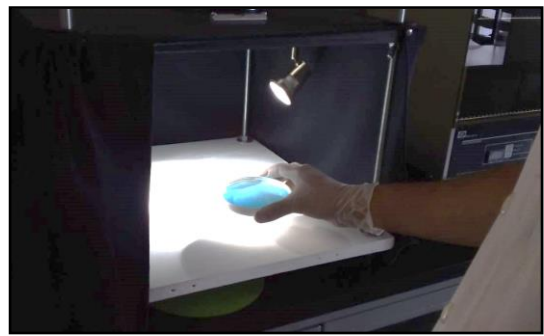
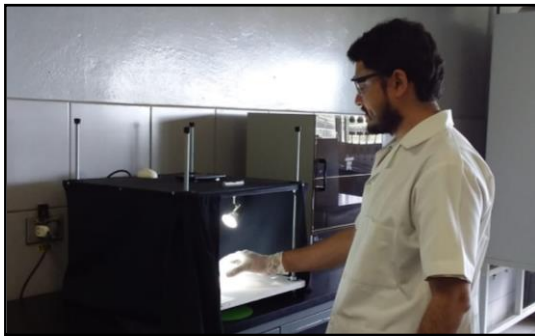
1.14. Construcción de la cabina de luz



1.15. Obtención de los filtrados



1.16. Obtención de las coordenadas del espacio de color de los filtrados



1.17. Residuos agroindustriales con $T < 1$ mm luego de la adsorción de los colorantes



1.18. Residuos agroindustriales con $1\text{ mm} < T < 3\text{ mm}$ luego de la adsorción de los colorantes

