

**PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA
DE BIODEGRADACIÓN ANAEROBIA
DEL LABORATORIO DE BIOTECNOLOGIA DE LA
UNIVERSIDAD DEL CAUCA**



Paola Marcela Certuche Muñoz

Daniel Eduardo Melo Ruiz

Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control
Ingeniería en Automática Industrial
Popayán, 2015**

**PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA
DE BIODEGRADACIÓN ANAEROBIA
DEL LABORATORIO DE BIOTECNOLOGIA DE LA
UNIVERSIDAD DEL CAUCA**



Documento Final de Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero en Automática Industrial

Paola Marcela Certuche Muñoz

Daniel Eduardo Melo Ruiz

Director: Mg. Juan Fernando Flórez Marulanda

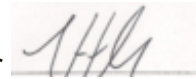
Universidad del Cauca

**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control
Ingeniería en Automática Industrial
Popayán, 2015**

Nota de aceptación

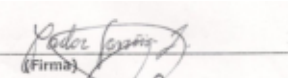
Aprobado

Director



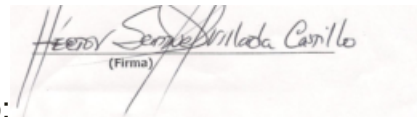
Mg. Ing. Juan Fernando Flórez

Jurado coordinador


(Firma)

Ph.D. Ing. Carlos Gaviria López

Jurado:


(Firma)

Ph.D. Ing. Héctor Samuel Villada

Popayán, 4 de marzo 2015

AGRADECIMIENTOS

De manera especial manifestamos agradecimiento a nuestro director de trabajo de grado Mag. Ing. Juan Fernando Flórez Marulanda por su paciencia, orientación, dedicación y compromiso.

Al Dr. Ing. Héctor Samuel Villada, director del grupo de investigación CYTBIA, por su visión interdisciplinaria nos permitió ingresar al campo de materiales biodegradables y trabajar en la línea investigativa de biotecnología.

Agradecemos a algunas personas nos ayudaron en este proceso: en la parte inicial de documentación, David, laboratorista de Biotecnología y John Palechor, ingeniero investigador de CYTBIA, desinteresadamente nos ayudaron a identificar los componentes de la célula de biodegradación primera y con su ayuda fue posible empezar con la documentación de la célula; agradecemos al Ing. Ricardo Camacho, por su tiempo y colaboración en el levantamiento de modelos. Así mismo, agradecemos a personas de otras dependencias, que nos colaboraron: el químico Omar Portilla orientó sobre la disposición final de residuos químicos; la Esp. Catalina Zarama nos orientó sobre seguridad industrial en laboratorios.

Agradecemos a nuestras familias, por su acompañamiento y apoyo incondicional.

DEDICATORIA

A MARÍA MARLENE mi madre, querida compañera en esta travesía de vivir, fortaleza en tiempos difíciles, inspiradora de sueños y luz en mi camino.

A HELGA MAITÉ mi hermana mayor, mi cálida compañía, lazo a tierra, apoyo e inagotable fuente de alegría.

A MÓNICA BRIGITH mi hermana menor, mi compañía, apoyo y cariño fraterno.

A DIOS, gracias por esta y cada una de las bendiciones que ha tenido para mi familia y para mí.

Paola Marcela Certuche Muñoz

“Todo fruto, toda flor,

Fueron secreto un día.

Semilla enterrada en la necesidad.

Secreto de tu vida, florece a partir de hoy.

Sé voz, color y canto.

Sé en toda dirección.

Alumbra al mundo con tu vida.

Que desde ahora nadie

Se pierda más de ti.”

Leonor Bravo, poeta ecuatoriana.

TABLA DE CONTENIDO

Página

RESUMEN.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	4
1.1 CONTAMINACIÓN AMBIENTAL CAUSADA POR PRODUCTOS PLÁSTICOS.....	4
1.1.1 Residuos sólidos urbanos.....	4
1.1.2 Residuos plásticos.....	4
1.1.3 Tiempo de degradación del plástico.....	6
1.1.4 Alternativas para el control de residuos plásticos.....	6
1.2 ORGANISMOS RELACIONADOS CON BIODEGRADACIÓN.....	7
1.3 NORMAS DE BIODEGRADACIÓN.....	8
1.3.1 ASTM.....	8
1.3.2 ISO.....	8
1.3.3 CEN.....	8
1.4 BIODEGRADACION Y TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE BIODEGRADACIÓN.....	9
1.4.1 Polímeros biodegradables.....	9
1.4.2 Técnicas de medición de biodegradación de polímeros biodegradables.....	10
1.5 INVESTIGACIONES EN MATERIALES BIODEGRADABLES.....	11
1.6 PROCESO DE BIODEGRADACIÓN DE POLÍMEROS BIODEGRADABLES.....	13
1.6.1 Degradación Aerobia.....	13
1.6.2 Degradación Anaerobia.....	14
1.7 EQUIPOS DE BIODEGRADACION AUTOMATIZADOS COMERCIALES 15	
1.7.1 Equipos de biodegradación aerobia comerciales.....	15
1.7.2 Equipos Comerciales automatizados de biodegradación anaerobia..	16
1.8 DESCRIPCIÓN PROCESO DE BIODEGRADACIÓN ANAEROBIO TERMÓFILO EN ALTAS CONCENTRACIONES DE SÓLIDOS.....	17
1.8.1 Preparación de inóculo.....	17

Formulación de FORSU	17
Caracterización de FORSU	18
Acondicionamiento de Inóculo	18
Caracterización de inóculo	18
1.8.2 Ensayo BATACS	19
Caracterización de materiales de prueba	19
Ensayo BATACS	19
1.8.3 Variables del proceso BATACS	20
Variables intrínsecas	20
Variables extrínsecas	20
Variables monitoreadas	21
Variables derivadas	22
1.9 DESCRIPCIÓN DE LA CÉLULA DE BIODEGRADACIÓN ANAEROBIA	23
1.9.1 Unidad de preparación de inóculo	23
1.9.2 Unidad de biodegradación	26
1.9.3 Unidad de caracterización	31
2 INGENIERÍA CONCEPTUAL	35
2.1 CADENA DE VALOR DEL PROCESO BATACS	35
2.2 DIAGRAMA DE FLUJO EN BLOQUES	36
2.3 MODELOS DE PROCESO BATACS	38
2.3.1 Modelo de Proceso del Ensayo BATACS	39
2.3.2 Modelo Físico del proceso BATACS	40
2.3.3 Modelo de Control Procedimental	42
2.4 DIAGNÓSTICO DEL PROCESO BATACS	46
2.4.1 Inspección visual y verificación de funcionamiento de la celda del proceso BATACS	46
2.4.2 Nivel de dificultad en la realización de operaciones y nivel de automatización del proceso BATACS	49
2.4.3 Nivel de automatización de la célula de biodegradación anaerobia	51
2.4.4 Análisis de los modelos ISA S.88	52
2.4.5 Captura de necesidades del cliente	52
2.4.6 Valoración de pertinencia del proceso BATACS acorde con las necesidades	54
2.5 REQUERIMIENTOS DE LA NUEVA CÉLULA Y PROCESO BATACS	55

2.5.1	Requerimientos generales	55
2.5.2	Requerimientos de automatización	57
2.5.3	Requerimientos hardware	58
3	INGENIERIA BASICA.....	61
3.1	PROPUESTA DE AUTOMATIZACION BATACS	61
3.1.1	Cumplimiento de requerimientos de la nueva célula y proceso	61
3.2	NUEVOS MODELOS DE PROCESO.....	67
3.2.1	Modelos del ensayo de Biodegradación Anaerobia	68
3.2.2	Modelos de pruebas de caracterización.....	75
3.2.3	Cadena de valor.....	83
3.3	ESPECIFICACIÓN DE VARIABLES DE PROCESO.....	84
3.4	MONITOREO Y REPORTES DEL ENSAYO BATACS Y PRUEBAS	84
3.5	DIAGRAMAS DE FLUJO DE PROCESO Y P&ID	86
4	INGENIERÍA DETALLADA.....	87
4.1	DISTRIBUCIÓN DE LA NUEVA CÉLULA DE PROCESO DE BIODEGRADACIÓN ANAEROBIA.....	87
4.2	DIAGRAMA DE RECORRIDO.....	88
4.3	ESPECIFICACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS	91
4.3.1	Equipos unidad preparación de FORSU	91
4.4	COSTEO DEL ENSAYO BATACS Y PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN 92	
4.5	DIAGNÓSTICO PROCESO BATACS Y CÉLULA NUEVOS	94
4.5.1	Tipo de automatización y grado de dificultad del proceso BATACS nuevo 94	
4.5.1	Análisis de los modelos ISA S.88.....	94
4.6	PATRIMONIO TECNOLÓGICO.....	96
5	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	98
5.1	CONCLUSIONES	98
5.2	RECOMENDACIONES.....	100
5.3	TRABAJOS FUTUROS	101
	BIBLIOGRAFÍA.....	102

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Definiciones de material biodegradable según ASTM, CEN e ISO	9
Cuadro 2. Entradas y salidas del proceso BATACS y operaciones de caracterización.....	36
Cuadro 3. Modelo de Proceso del Proceso BATACS	39
Cuadro 4. Modelo físico del Proceso BATACS.....	41
Cuadro 5. Modelo de control de procedimiento del proceso BATACS	43
Cuadro 6. Fase calibrar pHmetro.....	44
Cuadro 7. Fase Controlar pH.....	44
Cuadro 8. Fase controlar temperatura	44
Cuadro 9. Fase determinar materia seca o sólidos totales y sólidos volátiles	45
Cuadro 10. Fase determinar contenido de humedad.....	45
Cuadro 11. Fase determinar cantidad de carbono orgánico total	45
Cuadro 12. Fase determinar Nitrógeno Total.....	45
Cuadro 13. Reconocimiento de elementos de la celda de biodegradación anaerobia.....	48
Cuadro 14. Grado de dificultad en la realización de operaciones y nivel de automatización del proceso BATACS.....	50
Cuadro 15. Pruebas del protocolo BATACS basado en ISO 15985:2014: ensayo de biodegradación y tres pruebas de caracterización, especificando técnica y normas utilizadas.....	56
Cuadro 16. Descripción de nuevas pruebas de caracterización de la célula de proceso BATACS, basado en ISO 15985:2014, especificando técnica y normas utilizadas.....	56
Cuadro 17. Descripción de rangos de medición de las variables en la etapa Preparación de Inóculo.....	56
Cuadro 18. Descripción de rangos de medición de las variables en la etapa de Ensayo de Biodegradación	57
Cuadro 19. Equipos para acondicionar materia prima	62
Cuadro 20. Equipos de triturado, secado y pesado	62
Cuadro 21. Equipos de biodigestión seleccionados	63
Cuadro 22. Equipos de medición de temperatura, pH y gases (metano y dióxido de carbono).....	64
Cuadro 23. Equipos para ensayo de biodegradación de la nueva célula de proceso	64
Cuadro 24. Módulos equipo existentes en el Laboratorio de Biotecnología para realizar pruebas de caracterización	65
Cuadro 25. Equipos de respaldo de energía eléctrica	67
Cuadro 26. Equipos de respaldo de energía eléctrica	67
Cuadro 27. Modelo de Proceso del Proceso BATACS nuevo	68
Cuadro 28. Modelo físico del Proceso BATACS.....	70
Cuadro 29. Modelo físico nuevo de la unidad de caracterización.....	71
Cuadro 30. Modelo de control de procedimiento del proceso BATACS nuevo.....	72
Cuadro 31. Modelo de receta de control del ensayo BATACS.	74

Cuadro 32. Modelo de proceso de la prueba densidad	76
Cuadro 33. Modelo físico prueba de densidad	76
Cuadro 34. Modelo de control procedimental de la prueba de densidad.....	76
Cuadro 35. Modelo de receta de control de la prueba densidad	76
Cuadro 36. Modelo de proceso de las pruebas humedad, sólidos totales y sólidos volátiles.....	77
Cuadro 37. Modelo físico de las pruebas humedad, sólidos totales y sólidos volátiles.....	77
Cuadro 38. Modelo de control procedimental pruebas: humedad, sólidos totales y volátiles.....	78
Cuadro 39. Modelo de receta de control de las pruebas humedad y sólidos totales	78
Cuadro 40. Modelo de receta de control de la prueba sólidos volátiles	79
Cuadro 41. Modelo de proceso de la prueba alcalinidad.....	80
Cuadro 42. Modelo físico de la prueba alcalinidad	80
Cuadro 43. Modelo de control procedimental de la prueba alcalinidad	81
Cuadro 44. Modelo de receta de control de la prueba alcalinidad	81
Cuadro 45. Modelo de proceso de las pruebas de pH.....	82
Cuadro 46. Modelo físico de la prueba pH.....	82
Cuadro 47. Modelo de control procedimental de la prueba de pH.....	82
Cuadro 48. Modelo de receta de control de la prueba pH	83
Cuadro 49. Equipos Unidad de preparación de FORSU.....	91
Cuadro 50. Resumen de inversiones fijas en equipos	93
Cuadro 51. Costo consumo energía eléctrica ensayo BATACS con pruebas de caracterización.....	93
Cuadro 52. Tecnología básica del laboratorio de Biodegradación Anaerobia	96
Cuadro 53. Tecnología periférica.....	97

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Unidad de preparación de inóculo	24
Figura 2. Elementos de medición, control y de registro de la unidad de preparación de inóculo a) Sensor de pH metro OAKTON ARCON pH 5 b) Termómetro de vidrio c) Sensor de metano HITOX IR 600 d) Termostato TS090S e) Tamiz (filtro de tela) f) Barómetro de precisión Fisher PRAZIS 15:01 g) Computador DELL Laptop Inspiron 1525	25
Figura 3. Módulos equipo para formulación de FORSU y mezclado de FORSU a) Balanza industrial JAVAR CW 15 b) Licuadora industrial JAVAR HBB250R de 15 litros c) Tanque de almacenamiento FORSU	25
Figura 4. PFD unidad de preparación de inóculo.....	26
Figura 5. PFD unidad de biodegradación anaerobia	28
Figura 6. Descripción de niveles de agua en acumuladores.....	29
Figura 7. Unidad de biodegradación anaerobia	30
Figura 8. a) Tanque baño María, b) Tapa de vidrio, c) Bioreactor con tapa hermética, d) Acumulador de gas	30
Figura 9. Placas circuitales	30
Figura 10. a) Balanza analítica b) Molino analítico	31
Figura 11. Equipos utilizados en la prueba de determinación de nitrógeno total a) Aparato de digestión - destilación Kjeldahl, b) Matraz Kjeldahl c) Adaptador para matraz Kjeldahl, d) adaptador puente de destilación e) Condensador de Graham f) Erlenmeyer g) Equipo de calentamiento de tres unidades h) Bureta i) Pipetas j) Vidrio reloj.....	32
Figura 12. Equipos utilizados para las pruebas de Sólidos Fijos y Volátiles: a) Horno pequeño, b) Crisol con tapa y pinzas, c) Desecador mediano con desecante, d) Mufla de sobremesa.....	33
Figura 13. Medidor de humedad precisa	33
Figura 14. PFD unidad caracterización.....	34
Figura 15. Cadena de valor del proceso BATACS obtenida del protocolo implementado por Camacho y Aley	35
Figura 16. Diagrama de flujo en bloques del proceso BATACS por etapas.....	37
Figura 17. Diagrama de flujo en bloques del proceso BATACS por operaciones..	38
Figura 18. Estado de disponibilidad de equipos de la célula de biodegradación anaerobia del laboratorio de Biotecnología en forma general y por unidades	46
Figura 19. Estado de disponibilidad de los elementos de la unidad de preparación de inóculo	47
Figura 20. Estado de disponibilidad de los elementos de la unidad de preparación de ensayo	47
Figura 21. Otros elementos encontrados a) Tarjetas circuitales, b) Válvulas manuales, c) Celdas de carga	49
Figura 22. Nivel de automatización del proceso BATACS en general y por etapas	49

Figura 23. Dificultad de las tareas realizadas por el laboratorista en el proceso BATACS, en general y por fases de las etapas de proceso	50
Figura 24. Cadena de valor propuesta para la nueva célula del proceso de biodegradación anaerobia del Laboratorio de Biotecnología de la Universidad del Cauca	84
Figura 25. Diagrama de flujo de información para registro y reportes	85
Figura 26. Plano de distribución de la nueva célula de proceso BATACS.....	89
Figura 27. Diagrama de recorrido de la nueva célula de proceso BATACS.	90
Figura 28. Tipo de automatización ensayo BATACS nuevo	94
Figura 29. Grado de dificultad ensayo BATACS	94
Figura 30. Tipo de automatización preparación de FORSU	95
Figura 31. Grado de dificultad preparación de FORSU	95
Figura 32. Tipo de automatización preparación de inóculo.....	95
Figura 33. Grado de dificultad preparación de inóculo	95
Figura 34. Tipo de automatización ensayo de biodegradación.....	96
Figura 35. Grado de dificultad ensayo de biodegradación.....	96

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Corrección de volumen obtenido a condiciones estándares de temperatura y presión	22
Ecuación 2. Conversión de los volúmenes de gas medidos durante el ensayo a volúmenes de gas a condiciones estándares de temperatura y presión.....	22
Ecuación 3. Cantidad de carbono gaseoso producido en cada ensayo	22
Ecuación 4. Porcentaje de biodegradación.....	23

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Formulación de FORSU proveniente del restaurante Díaz y galería barrio Bolívar.....	17
Tabla 2. Listado de formatos en Excel de registro de información propuestos.....	85

RESUMEN

Este trabajo presenta una propuesta de automatización de la célula de laboratorio de biodegradación anaerobia del Centro de Desarrollo Tecnológico que se establecerá como resultado del proyecto del Sistema General de Regalías “Investigación y desarrollo en empaques biodegradables” (PEDCTiCAUCA, 2012) ejecutado por el grupo de investigación CYTBIA durante 2014-2019, desde el cual se validará la biodegradabilidad de cuatro paquetes tecnológicos desarrollados en el proyecto y a futuro, a productos de organizaciones externas.

Inicia con el diagnóstico de la célula de proceso previa, utilizada por Camacho y Aley en 2012, en un estudio de biodegradación anaerobia, basado en la norma ASTM D5511-02 (Camacho & Aley, 2012), siendo ésta batch, de manufactura rígida, uni producto y de ruta única, con nivel de automatización 0; presentando un proceso altamente dependiente del laboratorista, 73% manual, con un grado de dificultad de fases de proceso, alto 49% y documentación no estandarizada.

Se desarrollan las ingenierías: conceptual, básica y detallada del ensayo de biodegradación anaerobia termófila en alta concentración de sólidos (BATACS) con el estándar ISO 15985 (ISO, 2014a) y 6 pruebas de caracterización; el principal aporte consiste en ofrecer flexibilidad a la célula, al separar el ensayo de las pruebas; se realizan los modelos de proceso, físico, de control procedimental y de recetas basados en ISA S.88, y diagramas PFD (13) y P&ID (7); la etapa de preparación de inóculo es semicontinua, mientras que el ensayo BATACS y las pruebas son tipo batch. En la biodegradación anaerobia el pH y la temperatura son variables críticas, se garantiza el control de éstas, garantizando un ambiente microbiano apto. Acorde con la cultura organizacional del laboratorista, se seleccionan equipos nivel 0 de automatización y escenario Stand Alone, garantizando exactitud y precisión de resultados; se reduce el grado de dificultad de fases, siendo bajo en 79%. La implementación de la propuesta requiere de inversiones en equipos aproximadas a \$178´.048.552,0 pesos m/cte. Se presenta el diagrama de distribución y de recorrido.

Se desarrollan aspectos como: cadena de valor, estación de almacenamiento de reactivos y residuos, implementos y equipos de seguridad industrial, de respaldo energético y procedimiento de manejo de residuos orgánicos y químicos.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 CONTAMINACIÓN AMBIENTAL CAUSADA POR PRODUCTOS PLÁSTICOS

1.1.1 Residuos sólidos urbanos.

En el siglo XX, cuando la población mundial creció y se tornó urbana, la producción de residuos aumentó diez veces. Hoy en día cerca del 50% de la población vive en ciudades, la tendencia del mundo se orienta hacia la urbanización y se observa que la cantidad de residuos sólidos urbanos (RSU) está creciendo aún más rápido que la tasa de urbanización. Hace diez años habían 2900 millones de residentes urbanos que generaban aproximadamente 0,64kg/hab/día de RSU (680 millones de toneladas (Mt) por año). Para el año 2012 éstas cantidades aumentaron a cerca de 3 mil millones de residentes, generando 1,2 kg/hab/día (1,3 mil Mt por año). Para el año 2025 se estima que esto aumente a 4,3 mil millones de residentes urbanos que generarán cerca de 1,42 kg/hab/día de RSU, lo que equivale a 2,2 mil Mt (Hoorweg& Bhada-Tata, 2012).

En el año 2013, la revista Nature publicó un artículo (Hoorweg, Bhada-Tata, & Kennedy, 2013) donde advierte que (al extenderse las actuales tendencias socioeconómicas) hacia el año 2100 las tasas de generación de residuos sólidos superarán los 11 Mt por día, más de tres veces las actuales. Los investigadores señalan que si no se reduce el crecimiento de la población y las tasas de consumo, el planeta tendrá que soportar una carga de residuos cada vez mayor y podría convertirse en una situación insostenible.

Los RSU están compuestos por: vidrio, papel, cartón, material orgánico, textiles, metales, madera, escombros y plásticos. A nivel mundial, se observan variaciones en cuanto a las proporciones de dichos materiales (Gomez& Gil, 1997). Con respecto al plástico, los países de México, Francia y Estados Unidos aportan en peso a los RSU con el 6%, 7% y 8% respectivamente, mientras que Colombia el 5%. Los valores de generación entre los países son muy variables, debido a aspectos culturales, patrones de consumo y grado de desarrollo de cada uno (Uribe, 2006).

1.1.2 Residuos plásticos

El plástico es un material relativamente nuevo que se empezó a producir a nivel industrial en 1907 (Pretting & Boote, 2010). En 1950, la producción mundial de plásticos fue de 1,5 millones de toneladas (Mt) hacia el año 2008 pasó a 245 Mt, de los cuales, 64 Mt se produjeron sólo en Europa (Comisión Europea, 2010). La producción durante los últimos diez años ha sido equivalente a la de todo el siglo XX (KPMG International, 2010). Se calcula (en el supuesto de que se mantenga la situación actual) que en el 2020 se comercializarán en la Unión Europea 66,5 Mt

(Comisión Europea, loc cit p.163, 2010) de plástico y que la producción mundial de plásticos podría triplicarse de aquí a 2050 (Wurpel G., Van den Akker J., Pors J., 2011).

Una vez en medio marino, los desechos plásticos pueden durar centenares de años (Wurpel G., Van den Akker J., Pors J., loc cit, p.13). Se calcula que las placas de residuos en los océanos Atlántico y Pacífico pesan alrededor de 100 Mt, de las que aproximadamente el 80% son plásticos. Diez millones de toneladas de basura, principalmente plásticos, van a parar cada año a los océanos y mares de todo el mundo, convirtiéndolos en el mayor vertedero de plásticos del planeta, dañando el medio litoral, marino, así como la vida acuática (PNUMA, 2009).

El mayor impacto ambiental generado por los residuos plásticos en el mundo consiste en la contaminación de océanos y mares; se ha encontrado grandes cantidades de residuos plásticos invadiendo hábitats marinos desde los polos hasta el Ecuador, desde costas inhabitadas hasta costas altamente pobladas y áreas profundas del océano (Barnes, D & Barlaz, 2009) El 80% de los residuos que se extienden por el océano llega de zonas terrestres a través de ríos, aguas residuales, playas y costas, mientras que el 20% restante está asociado a residuos de barcos y otras plataformas marítimas (Fundación Compromiso y Transparencia, 2014).

Existe una zona en el centro del océano Pacífico del Norte, denominada "la isla de la basura", por estar cubierta de alrededor de 100 Mt de plásticos flotantes, con profundidad de diez metros, se encuentra localizada entre las coordenadas 135° a 155°O y 35° a 42°N, entre Japón y California (About, 2014). Este lugar fue descubierto en 1997 por el capitán de barco estadounidense Charles Moore, quien detectó residuos plásticos en esas alejadas rutas de navegación (Globalgarbage.org, 2009). El Centro Nacional de Estudios Espaciales Francés asevera que mide alrededor de 22.200 km de circunferencia y que su superficie asciende a 3,4 millones de km². Por su extensa área también se le ha denominado "el Séptimo Continente" (Acorema, 2010) sin embargo, la *National Oceanic and Atmospheric Administration*, afirma que no es el único, existen otros "parches de basura" en numerosas zonas del Pacífico y el resto del océano (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, 2014). A pesar de conocerse este problema ambiental, ningún país u organismo ha tomado cartas en el asunto por tratarse de un problema que ocurre en aguas internacionales (Globalgarbage.org, 2009).

El plástico no es inerte, el plástico convencional contiene un gran número, y a veces en gran proporción, de aditivos químicos que pueden ser disruptores endocrinos, carcinogénicos o provocar reacciones tóxicas. Los contaminantes orgánicos persistentes (COP) como plaguicidas, el diclodifeniltricloro etano y los policloro bifenilos (Mato et al., 2001) presentes en las aguas circundantes pueden

adherirse a fragmentos de plástico potencialmente nocivos (Rios, Moore, & Jones, 2007) y entrar a la cadena alimenticia a través de la fauna marina que ingiere esos plásticos causando el efecto “caballo de Troya” (Rios, Jones, Moore, & U, 2010). Estos COP no se descomponen fácilmente de manera natural, sino que se acumulan en tejidos corporales, donde pueden tener efectos cancerígenos, mutagénicos, entre otros (Comisión Europea, loc. cit., p. 117).

Las partículas pequeñas y finas denominadas “microplásticos”, resultado de décadas de fotodegradación y abrasión mecánica, son especialmente preocupantes. La concentración en el agua de estas partículas, llegan incluso a las zonas más remotas y en cantidades a veces superior a la del plancton. Si estos microplásticos y los aditivos químicos que contienen, son ingeridos en grandes cantidades por la fauna marina, pueden tener un gran potencial de contaminación de la cadena alimentaria a través de la interacción predador-presa (Comisión Europea, loc. cit., p. 114).

1.1.3 Tiempo de degradación del plástico

El plástico es un material inorgánico que tiene alta durabilidad, puede tardar entre cien y mil años para degradarse dependiendo del tipo. La preocupación ambiental por los residuos plásticos es creciente y gira en torno a cuatro elementos fundamentales: (1) degradación lenta, (2) producción de diferentes productos plásticos y residuos crecientes, (3) principal materia prima del plástico, el petróleo, no es renovable y (4) algunos químicos utilizados en su producción son tóxicos (González & Manhini, 2003).

1.1.4 Alternativas para el control de residuos plásticos

En los últimos años se ha buscado formas de controlar los desechos plásticos. Una de las vías es el reciclaje, pero no es suficiente; ni siquiera en Europa se ha llegado a reciclar el 50% de los residuos plásticos que se producen anualmente, a pesar de enormes esfuerzos de: autoridades, industrias y una población sumamente consciente de los problemas del medio ambiente. No obstante, para la industria química, el reciclaje basado en la descomposición química de los polímeros desechados puede ser una buena alternativa, pero esto es aún incipiente, y depende de los precios oscilantes de las materias primas originales (Castellón, 2010).

De acuerdo con Castellón (Castellón, 2010), a escala mundial se ha planteado tres posibilidades para controlar los residuos plásticos: a) Generar plásticos reutilizables con materiales duraderos, b) Crear materiales plásticos oxobiodegradables y c) Desarrollar plásticos biodegradables.

Las bolsas reutilizables se ofrecen como opción, éstas tienen más resistencia que las tradicionales, con ellas se reduce el consumo hasta en 15 veces. Existe diversidad de formatos y modelos en polietileno de alta y baja densidad, pensados para infinidad de sectores de comercio e industria (AENOR, 2014).

Los materiales plásticos oxo biodegradables (OBD) se caracterizan por contener aditivos, que presentan sales metálicas (hierro, magnesio, níquel, cobalto) que provocan fragmentación del polímero al entrar en contacto con luz solar, calor, humedad y oxígeno, que descompone el plástico en fragmentos cada vez más pequeños hasta ser consumidos por microorganismos (Castellón, 2010). Existen dos clases de materiales biodegradables: los bioplásticos, que se derivan de materias primas renovables y los plásticos fabricados a partir de productos petroquímicos con aditivos biodegradables que mejoran la biodegradación (BAST, 2013). En la actualidad, los materiales biodegradables son ampliamente utilizados como materia prima de: bolsas de empaque y embalaje de productos doméstico, médico, industrial y agrícolas (Tiphaine, 2008).

1.2 ORGANISMOS RELACIONADOS CON BIODEGRADACIÓN

Organismos como la *ASTM*, *CEN* e *ISO* han desarrollado estándares en biodegradación aceptados en el mundo.

American Section of the International Association for Testing Materials (ASTM International, 2002), desarrolla normas, reconocidas a nivel mundial. Cuenta con más de 30.000 miembros de 140 países, con conocimientos técnicos especializados en la creación de más de 12.000 normas en metales, pinturas, plásticos, textiles, petróleo, construcción, energía, medio ambiente, productos médicos y electrónicos. Tiene las mejores normas en plásticos, pintura, ruedas, caucho y metales. Las actividades de normalización son realizadas en “comités técnicos”, el comité técnico D20 está encargado de las normas de materiales plásticos y el subcomité D20.96 trata sobre biodegradación.

El *Comité Europeo de Normalización (CEN)*(CEN, 2014), es reconocido por la Unión Europea y por la Asociación Europea de Libre Comercio como responsable de la elaboración y definición de normas voluntarias en el ámbito europeo no pertenecientes al sector eléctrico. Reúne los organismos nacionales de normalización de 33 países europeos. Proporciona normas europeas y documentos técnicos para productos, materiales, servicios y procesos. Apoya actividades de normalización de: tecnología aeroespacial, productos químicos, construcción, productos de consumo, energía, medio ambiente, salud, TIC, maquinaria, materiales, vida inteligente, transporte y envasado, defensa y seguridad. El comité técnico TC 249 aborda los plásticos y biodegradación.

International Organization for Standardization (ISO)(ISO, 2014b), es el mayor desarrollador y editor de normas internacionales. Es una red de institutos de normas nacionales de 163 países. Cuenta con más de 19.500 normas internacionales; incluye normas de: agricultura y construcción, ingeniería mecánica, fabricación y distribución, transporte, dispositivos médicos, medio ambiente, seguridad, TIC, normas de buenas prácticas y servicios. El comité técnico ISO/TC 61, subcomité SC 5 denominado propiedades físico-químicas del plástico, trata normas de biodegradación.

Algunos países tienen normatividad propia sobre biodegradación, entre ellas se encuentran las normas *JIB*, *DIN* y *OCDE*.

1.3 NORMAS DE BIODEGRADACIÓN

1.3.1 ASTM

El subcomité D20.96 de la *ASTM*, desarrolla normas de materiales plásticos; es responsable de 25 normas: desde la terminología de biodegradación, hasta la definición de métodos para las pruebas de plástico biodegradable, en condiciones anaerobias, aerobias y en ambientes marinos. Una familia de normas está dirigida al deterioro de las propiedades físicas de los plásticos en varias condiciones ambientales: compostaje simulado (D5509, D5512), vertedero simulado (D5525), actividad microbiana aerobia (D5247) y condiciones de plástico flotante (D5437); un segundo grupo, estudia la generación de CO₂ en entornos aeróbicos: lodos (D5209), lodos activados (D5271) y compostaje controlado (D5338); un tercer grupo, aborda la generación de CH₄ y el CO₂ en ambientes anaeróbicos (D5210), biodegradación anaerobia (D5511) y vertedero acelerado (D5526). ASTM D6400 hace distinción entre plásticos degradables y biodegradables. ASTM D6954 trata materiales poliméricos oxobiodegradables (ASTM International, 2002).

1.3.2 ISO

El Comité Técnico ISO/TC 61 subcomité SC 5 de la *ISO*, establece criterios para la evaluación de plásticos biodegradables europeos: biodegradación aerobia bajo condiciones controladas (ISO 14855), biodegradación aerobia en ambientes acuosos (ISO 14852), biodegradación anaerobia en un ambiente alta concentración de sólidos (ISO 15985), prueba de compostaje aerobia controlada para cualquier material (ISO 14855), prueba de compostaje aerobia controlada para materiales poliméricos (ISO 14852)(ISO, 2014b).

1.3.3 CEN

El comité técnico TC 249 estableció el estándar EN 13432. La norma proporciona a la Comisión Europea normas y reglamentos técnicos sobre envases y residuos. Fija requisitos y procedimientos para determinar la compostabilidad de materiales

de embalaje plástico basados en cuatro áreas principales: biodegradabilidad, desintegración durante el tratamiento biológico, efectos en el proceso de tratamiento biológico y efectos sobre la calidad del compost resultante.

CEN 13432 es la norma europea más estricta para biodegradabilidad. Se puede aplicar a otros materiales de empaque además de polímeros e incorpora los ensayos: ISO 14855, ISO 15985 y ASTM D5338.

En el Anexo 1 “Comparación de normas de biodegradación planteadas por ASTM, ISO y CEN” se presenta un cuadro comparativo con las normas de biodegradación más relevantes.

1.4 BIODEGRADACION Y TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE BIODEGRADACIÓN

1.4.1 Polímeros biodegradables

Por el alto grado de contaminación que los plásticos han ocasionado al planeta y la reducción de fuentes de petróleo, el desarrollo de materiales biodegradables ha tomado gran importancia (Villada H. S., 2007). Según Steven Mojo (Mojo, 2008), director del *Biodegradable Products Institute* (<http://www.bpiworld.org>), de Nueva York, “polímero biodegradable” es un término que ingresa a un léxico especializado sin tener una clara definición. Con el fin de normalizar este concepto, organismos internacionales como *ISO*, *ASTM* y *CEN* han desarrollado estándares (Rudnic E. , 2008), ver cuadro 1.

Cuadro 1. Definiciones de material biodegradable según ASTM, CEN e ISO

ESTÁNDAR	DEFINICIÓN POLIMERO BIODEGRADABLE
ISO y CEN	Es biodegradable “aquel material cuya degradación se produce por la acción natural de microorganismos como bacterias, algas u hongos” (Rudnic E. , 2008)
CEN	EN 13432: Un material puede ser llamado biodegradable sí “es capaz de degradarse bajo condiciones medio ambientales específicas dentro de determinado espacio de tiempo y el proceso de degradación real, producto de la actividad microbiana puede ser medido por métodos estandarizados” (EN, 2000).
ASTM e ISO	ASTM D6400 - ISO/DIS 1708: Un material biodegradable es aquel que “durante el proceso de degradación bajo acción microbiana, genera como producto final, dióxido de carbono, agua, compuestos inorgánicos y biomasa, con una velocidad similar a la de compuestos orgánicos, sin dejar residuos visibles o tóxicos” (ASTM, 2003).
ASTM	ASTM D5488-94d: es biodegradable “el material que en su proceso de biodegradación permite la mineralización de la materia orgánica en dióxido de carbono, metano, agua y biomasa; la norma asume que cumpla con un índice de biodegradación de un 60% en menos de 180 días” (ASTM, 2002).
CEN	EN 14046: un material puede ser catalogado como “biodegradable”, si manifiesta un nivel de biodegradación mayor a 90%, en 180 días, bajo compostaje controlado, evaluado mediante métodos respirométricos (EN, 2003).

Fuente: ASTM, ISO, CEN y Rudnick .

1.4.2 Técnicas de medición de biodegradación de polímeros biodegradables

Existen técnicas que posibilitan cuantificación de parámetros asociados a la biodegradación (Van Der Zee, 2005), a continuación se describen técnicas normalizadas en medio aerobio y anaerobio:

Técnicas Aerobias

ASTM D6340-98: prueba para determinar la biodegradación aerobia de materiales plásticos en medio acuoso o compost.

ISO 14851: 1999/EN 14851: 2004: determinación de biodegradabilidad aerobia final de materiales plásticos en medio acuoso: a través de la medición de la demanda de oxígeno en un respirómetro cerrado, y a través del análisis del dióxido de carbono ISO 14852: 1999/EN 14852: 2004.

D5338-11/ISO 14855: prueba para determinar la biodegradación aerobia de materiales plásticos, bajo condiciones controladas de compostaje, incorporando temperaturas termófilas.

ASTM D5951 -96/EN 14855-1: 2012/ISO 14855-1: 2012: prueba que determina la biodegradabilidad aerobia final de materiales plásticos en condiciones de compostaje controladas: mediante el análisis del dióxido de carbono (Método general), y técnica de medición gravimétrica de dióxido de carbono desprendido en una prueba a escala de laboratorio EN 14855-2: 2009/ISO 14855-2: 2007.

ASTM D5988 – 12: prueba para determinar la biodegradación aerobia de materiales plásticos en el suelo.

EN/ISO 17556: 2013: prueba que determina biodegradabilidad aerobia final de materiales plásticos en el suelo, mediante medición de la demanda de oxígeno en un respirómetro o por cantidad de dióxido de carbono desprendido.

ASTM D5338 – 11: prueba que determina el grado y la velocidad de biodegradación aerobia de los materiales plásticos en un entorno de compostaje controlado en condiciones de laboratorio.

Técnicas Anaerobias

ASTM D5210-92: prueba para determinar la biodegradación anaerobia de materiales plásticos en la presencia de lodos de depuración municipales.

ASTM D5526-12: prueba estándar para determinar la biodegradación anaerobia de materiales plásticos en condiciones de vertedero acelerado.

ISO 13975: 2012: prueba para determinar la biodegradación anaerobia final de materiales plásticos en sistemas de digestión lechados controlados: método de medición de la producción de biogás.

ISO 14853: 2005: prueba para determinar la biodegradación anaerobia final de materiales plásticos en un sistema acuoso, mediante medición de la producción de biogás.

ISO 15985: 2014: determinación de biodegradación anaerobia última y desintegración bajo alto contenido de sólidos - Método de análisis de biogás liberados.

ASTMD5511 – 02: prueba que determina el grado y velocidad de biodegradación anaerobia de materiales plásticos, en alto contenido de sólidos (más de 30% de sólidos totales) en condiciones estáticas, sin agitación. Las sustancias de ensayo se exponen a un inóculo que se deriva de compost a partir de FORSU.

1.5 INVESTIGACIONES EN MATERIALES BIODEGRADABLES

El desarrollo de materiales biodegradables fue iniciado por intereses comerciales de grandes compañías. *Cargillen USA* fue una de las pioneras, desarrolló polímeros de ácido poliláctico (PLA), iniciando investigaciones en 1987 y obtuvo su producción en planta en 1992. Hacia 2005, junto a *Dow Chemical*, obtienen ácido láctico a partir de azúcar obtenida por fermentación de maíz con ciertos microorganismos; también descubren un proceso de fermentación, que convierte azúcar en PHA (polihidroxialcanoato), utilizando la bacteria *Ralstonia eutropha*, éste biopolímero posee características de biodegradación del 80% en siete semanas (Tinoco, 2005). En los ochenta, la inglesa *Imperial Chemical Industries* genera el copolímero “Biopol” (PHBV), utilizado como material de productos biomédicos (Lafferty, Korsatko, & Korsatko, 1998). en 1990, en Reino Unido, *Zeneca* comercializa Biopol, para la industria de envases, a US \$20/kg, en 1996 vendió todas las patentes y marcas registradas a Monsanto (ICIS Chemical Business, 1996). En 2001 *Metabolix*, compró Biopol (Monsanto, 2001); en 2006, *Metabolix* junto a *ADM* fundan *Telles* en Iowa, EEUU, con capacidad de 50 Mt de PHA; en 2010 *Metabolix* cierra la planta *Telles*, en 2012 *ADM* termina *Telles JV* (DongGuan, 2012).

Empresas de diversas partes del mundo desarrollan y comercializan empaques biodegradables: la española *Sphere*, fabrica empaques biodegradables con materiales de procedencia vegetal. Es pionera en producción de bioplásticos elaborados con fécula de papa, biodegradables en 180 días, cumplen con la norma EN 13432 (Traxco, 2009).

La alemana *BASF* generó un compuesto biodegradable PLA que se obtiene del maíz, con propiedades mecánicas e impermeables que permiten un amplio espectro de aplicaciones, entre las que se destaca el embalaje (BAST, 2013). La japonesa *Kaneka* y la estadounidense *P&G Chemical* se unieron para producir *Nodax*, un PHA especializado, usado para producir fibras de plástico y recipientes moldeados como platos y vasos (Demarco, 2005). En el año 2013, en Brasil se firmó un acuerdo para que *Tetra Pak* utilice en todos sus empaques un polietileno de baja densidad, elaborado por el fabricante *Braskem*. Desde abril del 2014, *Tetra Pak* fabrica sus empaques con 82% de materia prima extraída de recursos renovables, cerca de 13 mil millones de empaques. *Braskem* utiliza etanol derivado de caña de azúcar para la producción de etileno que posteriormente se convierte en polietileno de baja densidad; las propiedades de dicho material son similares a las producidas a partir de recursos fósiles (Tetra Pak, 2013).

Otras empresas han incorporado productos comerciales diferentes con materiales biodegradables: la estadounidense *Tepha* desarrolla dispositivos médicos para ingeniería de tejidos; utilizan tres biopolímeros: Poli-R-3-hidroxi octanoato-co-R-3-hidroxi hexanoato (poly (3-HO-co-3HH)), poli-4-hidroxi butirato (poli-(4HB)) y poli-R-3-hidroxi butirato-co-4-hidroxi butirato (poly (3HB-co-4HB))(Williams & Martin, 1996). En 2014, en España, el Instituto Tecnológico del Plástico Aimplas, realiza el proyecto “Naturtruck”; donde generan PLA, de almidón de maíz, para piezas del interior de cabinas de camiones *Renault*; participan seis Pymes (dos españolas y cuatro europeas) y los centros tecnológicos CTAG de Galicia e IWNIRZ de Polonia (Aimplas, 2014).

En diversas partes del mundo, se han llevado a cabo proyectos investigativos de materiales biodegradables, para obtener películas biodegradables y embalaje:

En 2010, la Pontificia Universidad Católica del Perú ejecutó el proyecto “Desarrollo de envases y embalajes biodegradables y compostables para la mejora de la competitividad agroindustrial”, donde producen plástico biodegradable a partir de papa (Torres, 2010); en 2011 en Brasil, se desarrolló un proyecto para producir películas plásticas biodegradables de almidón de yuca, para la producción de un envase activo, capaz de inhibir el crecimiento de hongos y que cambia de color cuando un alimento comienza a descomponerse. También se prueba en cirugías cardíacas, para revestir implantes venosos y otorgarles resistencia en la fase inicial y para liberar de fármacos (DaSilveira, 2011). En 2012, la Universidad del País Vasco, desarrolla nueva tecnología de PLA; modifican químicamente el ácido y le añade una mezcla de polímeros biodegradable (poliactidas y policaprolactonas), dando origen a un polímero biodegradable biocompatible con materiales de prótesis, yesos y férulas (Razon.es, 2012).

En Colombia se han desarrollado proyectos investigativos de materiales biodegradables: en 2005, la Universidad San Buenaventura, ejecuta un proyecto donde elaboran películas biodegradables a partir de dos fórmulas: (1) mediante

cantidad constante de petróleo y variante de almidón MBRA 383 de yuca y (2) cantidades de almidón de yuca MBRA 383 y de petróleo variables, para conseguir una fórmula eficaz, el resultado es una película 100% biodegradable (Duran, 2005). En 2007, la Escuela de Ingeniería de Antioquia, elabora un polímero biodegradable de yuca, implementando la metodología Taguchi; se obtiene seis muestras poliméricas con características adecuadas, de acuerdo a la medición de sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y de biodegradación (Meneses, Corrales, & Valencia, 2007). El Grupo de Investigación Ciencia y Tecnología de Biomoléculas de Interés Agroindustrial de la Universidad del Cauca. CYTBIA, desarrolla empaques biodegradables a partir del polímero obtenido por la extrusión de la mezcla de almidón termoplástico de yuca de origen nativo, ácido poliláctico y policaprolactona (Camacho M & Aley, 2012, pág. 15); en el año 2014 a través de CYTBIA, la Universidad del Cauca recibió la patente “Obtención de empaques y películas biodegradables a partir de almidón de yuca” (Universidad del Cauca, 2014).

1.6 PROCESO DE BIODEGRADACIÓN DE POLÍMEROS BIODEGRADABLES

La biodegradación consiste en la degradación de un material por parte de microorganismos (Baljit & Sharma, 2008); puede producirse en medio aerobio y anaerobio como se expone a continuación:

1.6.1 Degradación Aerobia

La degradación aerobia consiste en la asimilación de la materia orgánica por parte de microorganismos en presencia de oxígeno y nutrientes, se produce en tres fases secuenciales desde las primeras descomposiciones microbianas de la materia orgánica hasta la estabilización del producto con la producción de H₂O y CO₂. Estas fases son las siguientes (ambientum.com, 2014):

Fase mesófila: los microorganismos asimilan elementos nutritivos de la materia orgánica, utilizando una parte de los compuestos orgánicos como fuente de energía y otra para formar nueva masa de microorganismos. Se produce un rápido aumento de la temperatura hasta alcanzar un pico alrededor de 75°C. El aumento de temperatura representa la retención de calor producido por la explosión del crecimiento microbiano que degrada los sustratos simples contenidos en la materia orgánica, estimulando el crecimiento de la microflora mesófila.

Fase termófila: se producen reacciones de auto oxidación de microorganismos cuando comienza a faltar la materia orgánica usada como alimento en la fase mesófila. En fases sucesivas de asimilación, una parte de los microorganismos se transforman en agua y dióxido de carbono, de modo que su masa orgánica disminuye y tiende a cero. La etapa inicia por encima de 40°C, reduciendo el crecimiento de la microflora mesófila y a su vez potencian la actividad de microorganismos termófilos contenidos en la materia orgánica, hasta llegar a la metabolización completa de los sustratos simples, quedando materiales resistentes que se degradan a ritmos mucho más lentos.

Fase de enfriamiento y maduración: a medida que se reduce la actividad microbiana se pierde energía térmica en el sistema. El material se enfría, llegando a la estabilización del mismo o maduración.

1.6.2 Degradación Anaerobia

La degradación anaerobia se da por la acción de diversas especies de microorganismos capaces de degradar la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Los tres procesos de degradación anaerobios utilizados con más frecuencia son: anaerobio (metanogénesis), anóxico (reducción de nitratos) y reducción de sulfatos. En la degradación anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano y dióxido de carbono, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico (ONU, 2013).

La temperatura está implicada en los balances energéticos que posibilitan la práctica de las técnicas anaerobias (AHRING, 1994). Los microorganismos anaerobios pueden desarrollarse en un amplio rango de temperaturas, que oscila entre los -5°C y los 80°C, se clasifican en tres grupos para su crecimiento (BAYLEY & OLLIS, 1986): a) psicrófilas: temperatura -5°C, con un óptimo a 15°C, b) mesófilas: 15°C <temperatura < 45°C, con un óptimo a 35°C y c) termófilas: 50°C <temperatura < 80°C, con un óptimo a 55°C.

Itävaara y otros (Itävaara, Karjomaa, & Selin, 2002), determinan la biodegradación anaerobia de PLA en dos temperaturas y medios distintos: a 37°C siguiendo el estándar ASTM 5210 (medio líquido a temperatura mesófila) y a 52°C, con el estándar ASTM 5511-02 (altas concentraciones de sólidos y temperatura termófila). Se concluye que la biodegradación a temperatura termófila es más rápida que la mesófila, alcanzando un porcentaje de mineralización del 60% en 40 días a 52°C y en 100 días a 37°C.

Requisito: la degradación anaerobia, requiere de un inóculo metanogénico, obtenido a partir de material orgánico. Un inóculo estable y con buena actividad bacteriana influye en la calidad energética del gas recuperado al ofrecer proporciones de metano superiores al 50% (Bouallagui, 2005).

Etapas de la degradación anaerobia metanogénica

La digestión anaerobia actúa mediante bacterias presentes en cuatro etapas secuenciales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Veeken, 2000).

Fase hidrólisis: realizada por microorganismos hidrolíticos, que hidrolizan partículas y moléculas complejas (proteínas, carbohidratos y lípidos); mediante sus enzimas extracelulares fraccionan el material de moléculas complejas como proteínas, lípidos y carbohidratos hasta unidades más pequeñas: aminoácidos, ácidos grasos y azúcares. Esta etapa puede llegar a ser limitante para la velocidad del proceso ya que depende de la composición del sustrato, pH y también de factores ambientales como temperatura y humedad.

Fase acidogénica (fermentativa): compuestos solubles y compuestos resultantes de la hidrólisis (aminoácidos, ácidos grasos y azúcares), son fermentados por bacterias acidogénicas, desfragmentando estos compuestos en alcoholes, ácidos orgánicos, hidrógeno y CO₂.

Fase acetogénica: bacterias de esta índole, oxidan los productos resultantes de la etapa anterior produciendo ácido acético, ácido metanoico, hidrógeno, dióxido de carbono y otros compuestos más reducidos: ácido propiónico, butírico, valérico, láctico y alcoholes como etanol.

Fase metanogénica: los compuestos resultantes en la etapa anterior son utilizados por las bacterias metanogénicas que poseen varias coenzimas especiales que participan en la formación del metano a partir de ácido acético, hidrogeno y CO₂.

En el proceso de digestión anaerobia metanogénica, los productos resultantes de las primeras etapas dan a lugar a los siguientes sin una producción significativa de compuestos intermedios y finalmente la conversión anaerobia del sustrato orgánico en biogás compuesto principalmente por CH₄, CO₂ y otros como sulfuro de hidrógeno y amoníaco (Eastman, 1981).

1.7 EQUIPOS DE BIODEGRADACION AUTOMATIZADOS COMERCIALES

1.7.1 Equipos de biodegradación aerobia comerciales

La empresa *Umic Science*, comercializa equipos para realizar diferentes pruebas de biodegradación aerobia, que satisface normas *ISO* y *CEN*, entre ellos están: *Umic Lab 1, Método - ISO 14852* y *Umic Lab 2* (Umic-science.com, 2011) . *Umic Lab 1* determina la biodegradabilidad de polímeros en entornos naturales según la norma ISO 14855. Predice la biodegradación de los residuos de envases de plástico en un entorno real, simulado en laboratorio; utiliza como parte de las

normas: EN 13432: 2000, EN 14046: 2003, ISO 14855: 1999, EN ISO 14855: 2004. *Método - ISO 14852*; realiza muestras por duplicado de biodegradación aerobia en medio acuoso aplicando ISO 14852; en máximo seis meses, cuando alcanza un nivel constante de CO₂. Funciona de manera autónoma con intervención limitada. Presenta alto grado de exactitud y poca variabilidad, por lo tanto, los dispositivos pueden ser utilizados por centros de investigación, laboratorios de ensayo y certificación de ensayos de biodegradabilidad. El equipo *Umic Lab 2*, permite determinar automática y autónomamente la desintegración de los envases de plástico en una planta de compostaje, en mediciones de laboratorio. Basado en normas EN 13432: 2000 y EN 14045: 2003; realiza una medición instantánea automática o manual de: concentración de oxígeno, temperatura, humedad relativa del aire y flujo de aire. *SAIDA MODA 6* (Saida group, 2014) es un equipo japonés que determina degradación aeróbica basada en ISO 14855-2 “biodegradabilidad aeróbica de plástico bajo condición de compost”, para pruebas en 6 bioreactores, la medición de gas se hace por bureta de gas. En el Anexo 2, se presenta un cuadro comparativo de los componentes principales de los equipos comerciales *Umic Lab 1*, *ISO 14852*, *Umic Lab2* y *SAIDA MODA 6*.

1.7.2 Equipos Comerciales automatizados de biodegradación anaerobia

Existen prototipos comerciales desarrollados para cuantificar biodegradación anaerobia, entre ellos: *Umic Lab3 on line*, *Ampts II* y *Biogas Batch Fermentation System*, en el Anexo 2 se presenta un cuadro comparativo de los componentes principales de estos equipos.

UMIC LAB3 on-line (Umic-science.com, 2011): evalúa la evolución de la digestión anaerobia de materia inoculada y mide la producción total de gas durante un proceso de biometanización; la presión producida en el interior del reactor, se detecta con una frecuencia de medición parametrizada por el investigador. En respuesta a una presión superior al nivel predeterminado, una válvula eléctrica abre la salida automáticamente y el gas se libera con el fin de ser analizado. Las válvulas de presión y el número de aberturas de la válvula se graban en el disco duro de un ordenador a una frecuencia preestablecida para realizar el análisis. El equipo se puede conectar a usuarios de intranet a través de una conexión Ethernet.

AMPTS II (Bioprocesscontrol, 2011): la empresa *Bioprocess Control* lanzó al mercado en el año 2011 el “*AMPTS II*”, un instrumento analítico eficiente para llevar a cabo en tiempo real pruebas de biodegradabilidad anaerobia; ofrece: muestreo, análisis, registro y generación de informes totalmente automatizado; es un instrumento preciso y exacto.

Biogas Batch Fermentation System (Ritter, 2014), de la empresa alemana Ritter, tiene por incubadora un horno *Binder FD 115* de temperatura ajustable hasta 300°C, puede incubar hasta 16 bioreactores de 1L, tiene un software *RIGAMO* que gestiona la información y genera reportes en formato Excel.

1.8 DESCRIPCIÓN PROCESO DE BIODEGRADACIÓN ANAEROBIO TERMÓFILO EN ALTAS CONCENTRACIONES DE SÓLIDOS

En el Laboratorio de Biotecnología de la Universidad del Cauca, se realizan ensayos de biodegradación aerobia y anaerobia. En 2012 una investigación realizada por Camacho y Aley (Camacho & Aley, 2012), examina la biodegradación de polímeros biodegradables aplicando la norma ASTM 5511-02; establece un protocolo del proceso de Biodegradación Anaerobio Termófilo en Altas Concentraciones de Sólidos (BATACS), que consiste en dos grandes etapas: preparación de inóculo y ensayo de biodegradación.

1.8.1 Preparación de inóculo

Se prepara un inóculo anaeróbico metanogénico estable, a partir de una mezcla de FORSU (fracción orgánica de residuos sólidos urbanos) depositada por 55 días en un digester anaerobio a 55°C, siguiendo las operaciones: formulación, caracterización, adecuación de FORSU y caracterización de inóculo.

Formulación de FORSU

En el protocolo de Camacho y Aley (Camacho & Aley, 2012), se prepara el inóculo a partir de FORSU proveniente de la galería del barrio Bolívar de la ciudad de Popayán, pesados con Balanza JAVAR CW 15, en las proporciones formuladas para 40Kg, ver tabla 1.

Tabla 1. Formulación de FORSU proveniente del restaurante Díaz y galería barrio Bolívar

Componente	Proporción	Formulación para 40 (Kg)
Materia Orgánica Total	50,00%	20
Cáscara de papa	13,33%	2,66
Cáscara papa criolla	13,33%	2,66
Desechos de zanahoria	13,33%	2,66
Desechos de lechuga	13,33%	2,66
Cáscara de naranja, mandarina, otros	13,33%	2,66
Cáscara de plátano	13,33%	2,66
Cáscara de arveja	13,33%	2,66
Desechos de yuca	6,70%	1,34
Agua	35%	14
Rumen líquido de bovino	15%	6

Fuente: Camacho y Aley, 2012.

Caracterización de FORSU

Se toman pedazos de FORSU hasta completar 10gr y se trituran con molino analítico, luego, se caracterizan, haciendo pruebas por triplicado, mediante valoración de: a) Humedad ver Anexo 3.3.1 b) Materia seca o sólidos totales ver Anexo A 3.3.2 b) Sólidos volátiles, ver Anexo A 3.3.3 c) Carbono orgánico oxidable total, ver Anexo A 3.3.4, y d) Nitrógeno total ($\text{NH}^{+4} - \text{N}$), ver Anexo A 3.3.5, si los parámetros están en los rangos adecuados, pueden ser utilizados para preparar el inóculo.

Acondicionamiento de Inóculo

En el estudio de Camacho y Aley (Camacho M & Aley M, 2012, p41), se mezcla los FORSU, con agua libre de cloro y rumen (estómago bovino líquido y fresco), en las proporciones indicadas, ver tabla 1, utilizando una licuadora industrial JAVAR hasta un tamaño de partícula menor a 3 mm. La mezcla se pone en un biodigestor de 40L, donde se homogeniza manualmente con el agitador del mismo, por una hora; se mide el pH de la mezcla con pH metro OAKTON ARCON pH 5 y se ajusta a 6,5 añadiendo a la mezcla carbonato de calcio y bicarbonato de sodio proporción 2:1. Se cierra el biodigestor colocando la tapa; se ajusta la temperatura interna a 55°C manipulando la potencia de una resistencia eléctrica ubicada en el tanque baño María donde reposa el biodigestor, girando un botón graduado de 0 a 90°C, este valor se corrobora introduciendo un termómetro de vidrio al interior del biodigestor por un orificio de la tapa; una vez fijada la temperatura empieza la degradación anaerobia de la mezcla. Durante 55 días se registra los volúmenes de gas, con un sensor de CH_4 HITOX-IR 600, a diario debe homogenizarse la mezcla una hora por la mañana otra hora por la tarde. Durante la etapa acidogénica se registra a diario el pH de la mezcla, extrayendo una pequeña muestra de material con una sonda plástica introducida al biodigestor; se abren las válvulas y se introduce una sonda plástica para extraer muestra de inóculo se cierran y se mide el pH con el sensor OAKTON ARCON pH 5 Hacia el quinto día, se presenta un leve descenso del pH, se ajusta a valores superiores a 6.5 y menor a 7.5. A partir del día 11 el pH se mide cada 5 días. Hacia el día 55, o proporción de metano de 55% (Yagi, *et al.*, 2009), se detiene la digestión y se extrae el exceso de líquido mediante tamiz hasta el 20% sólidos totales. Por último, el inóculo se lleva a post fermentación durante 7 días a 55 °C.

Caracterización de inóculo

En el protocolo de Camacho y Aley (Camacho M & Aley M, 2012, p.43), una vez obtenido el inóculo, se caracteriza: tomando 10gr, la mitad se diluye en agua destilada proporción 5:1 – agua: inóculo, se mide el pH y se efectúa por triplicado la prueba de: nitrógeno total ver Anexo A 3.3.4. Se verifica la aptitud del inóculo con respecto a los parámetros establecidos por la ASTM D5511-02, ver sección 1.8.3, variable “calidad de inóculo”.

1.8.2 Ensayo BATACS

En el protocolo de Camacho y Aley (Camacho & Aley, 2012), esta etapa tuvo una duración de 30 días y consta de las operaciones: caracterización de materiales de prueba y realización del ensayo de biodegradación:

Caracterización de materiales de prueba

En el protocolo de Camacho y Aley (Camacho M & Aley M, 2012, p.44), se emplean tres tipos de materiales de prueba: referencia en blanco (bioreactor vacío), referencia positiva (celulosa), referencia negativa (LDPE) y muestra de ensayo (polímero biodegradable), ver Anexo 3.2.1. Cada material de prueba se caracteriza valorando: a) Materia seca o sólidos totales ver Anexo 3.3.1; b) Sólidos volátiles, ver Anexo 3.3.2.,c) Carbono orgánico total, ver Anexo 3.3.3. y d) Nitrógeno total ($\text{NH}^{+4} - \text{N}$), ver Anexo 3.3.4.

Ensayo BATACS

Se adecuan los materiales de prueba así: se pesan por triplicado con una balanza analítica Radwag XA 110/X: 2,5 g de referencia positiva (celulosa), 5 g de referencia negativa (polietileno LDPE) y 5 g de muestra de ensayo, extrayendo trozos de las láminas de los materiales; se tritura la celulosa en un molino analítico; con una tijera se corta en trozos rectangulares de 5mm de lado el LDPE, mientras que parte del material de ensayo se pulveriza en un molino analítico y parte se corta en trozos rectangulares de 5mm de lado. Se emplean 12 bioreactores de vidrio, de 800 ml; se deposita 500 gr de inóculo en cada bioreactor antes pesados en la balanza analítica; tres de ellos se cargan sólo con inóculo (blanco); los nueve restantes son cargados con tres réplicas de cada material de prueba más 500gr de inóculo; el material contenido en los bioreactores se mezcla por 3 minutos con una cuchara. Los bioreactores se acoplan a su soporte y se tapan.

Se adiciona agua al tanque baño María, donde yacen los bioreactores, se fija la temperatura del agua en $52^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, manipulando la potencia en una resistencia eléctrica del tanque unida a un termostato, para controlar la temperatura en los bioreactores e iniciar el proceso BATACS. El proceso genera gas, que se almacena en un sistema patronado de acumulación de gases, donde cada bioreactor tiene asociado un acumulador de gas, se mide periódicamente la producción de gas con el sensor de metano. En los primeros 10 días, el volumen de gas se mide a diario; luego cada cinco días. Cuando los acumuladores alcanzan su nivel máximo, se activa un mecanismo de succión del sensor de CH_4 y se efectúa la medición del porcentaje de CH_4 .

La degradación se extiende por 15 días, hasta que el blanco no genera más gas o la celulosa alcanza 70% de degradación; luego se detiene la incubación y se registra fecha y hora; se dejan los bioreactores a temperatura ambiente por 8 horas; se realiza una medición final del volumen de gas producido; se registra el pH final del inóculo.

En el momento que se realizan las mediciones de gas, se registra la temperatura del laboratorio con un termómetro de vidrio, así como también la presión atmosférica y del agua con manómetro.

Cálculo, reporte y análisis estadístico

Se convierten los volúmenes de gas medidos a volúmenes de gas a condiciones estándar de temperatura y presión y se efectúa la debida corrección por humedad, ver ecuaciones 1 y 2. Luego, se calcula la cantidad de carbono gaseoso producido, ver ecuación 3 y finalmente se determina el porcentaje de biodegradación, ver ecuación 4, su error estándar, ver ecuación 5 e intervalo de confianza, ver ecuación 6.

Nota 1: Si no se observa un índice de biodegradación satisfactorio (mínimo 70% para el filtro de celulosa en 15 días con error menor al 20%) el ensayo debe repetirse con inóculo fresco.

Nota 2: Antes de iniciar el proceso deben estar calibrados los sensores, ver Anexo A 3.4.

1.8.3 Variables del proceso BATACS

La BATACS es un proceso complejo, que depende de variables intrínsecas y extrínsecas (Wojtowicz, 2010, pág. 55); sin embargo, en el proceso se controlan, manipulan, monitorean y calculan variables, como se describe a continuación:

Variables intrínsecas

Se refiere a características del material que afectan el proceso: la forma física influye, a mayor espesor mayor tiempo de degradación (Wojtowicz, 2010); la estructura del material incide así como la capacidad de formar estructuras cristalinas (Chandra & Rustigi, 1998); polímeros de alto peso molecular no pueden ser degradados (Lucas, Bienaime, Belloy, Queneudec, Silvestre, & Nava-Saucedo, 2008).

Variables extrínsecas

Se refiere condiciones medioambientales donde ocurre el proceso BATACS:

Radiación solar: la luz solar produce un efecto inhibitor sobre las bacterias (Microbiolog & Grupo, n.d.), es una variable aislada.

Tóxicos e inhibidores del proceso: los subproductos generan tóxicos (amoníaco, sulfuro, iones de metales ligeros) que limitan el crecimiento microbiano; una vez llegada a la etapa de maduración hacen decrecer la producción de metano hasta ponerle fin (González, Rustrián, Houbron, & Zamora, 2008).

Calidad del inóculo: de acuerdo al ASTM D5511-02 debe garantizarse: pH entre 7,5 y 8,5, nitrógeno 0,5 a 2 g/Kg BH y sólidos totales >20% (ASTM, 2010); la calidad del inóculo en el protocolo de Camacho y Aley (Camacho M & Aley M, 2012) se verifica y si no se satisface las condiciones no se puede utilizar ese inóculo para el ensayo, la calidad del inóculo es una variable crítica.

Humedad: la degradación biológica mejora si la humedad está entre 50% y 70% (González, Rustrián, Houbron, & Zamora, 2008), en el protocolo de Camacho y Aley (Camacho M & Aley M, 2012) se garantiza la humedad del inóculo en la formulación en 35% de agua.

Temperatura: establece la velocidad y aumento exponencial de la población microbiana; en el protocolo de Camacho y Aley (Camacho M & Aley M, 2012, p.48) para la obtención de inóculo se controla en 55°C y en el ensayo de biodegradación en 52°C ± 2°C, manipulando la potencia eléctrica de resistencias eléctricas ubicadas en las chaquetas térmicas.

pH: debe garantizarse en etapa acidogénica (7.2-7.4) acetogénica (7.0-7.2) y metanogénica (6.5 y 7.5) (Microbiolog& Grupo, n.d.); en el protocolo de Camacho y Aley (Camacho M & Aley M, 2012, p.48) se controla en 6.5 y luego del quinto día a valores superiores a 6.5, agregando carbonato de calcio y/o bicarbonato de sodio; en el ensayo sólo se controla en el agua de los acumuladores en 2.

Variables monitoreadas

En los FORSU, inóculo y material de muestras, se monitorean las variables: a) Porcentaje de humedad, b) Sólidos totales, c) Sólidos volátiles, d) Cantidad de carbono orgánico total y oxidable, y e) Nitrógeno total.

Temperatura ambiente: se tiene en cuenta para la conversión de volúmenes de gas medidos durante el ensayo a volúmenes de gas a condiciones estándares de temperatura y presión (Camacho M & Aley, 2012).

Presión atmosférica y presión del agua a temperatura ambiente: se tiene en cuenta en la conversión de volúmenes de gas medidos durante el ensayo a volúmenes de gas a condiciones estándares de temperatura y presión.

Porcentaje de biodegradación: es la variable objetivo del ensayo, ver ecuación 3.

Variables derivadas

Son variables necesarias para obtener resultados del ensayo:

Conversión de cantidades obtenidas a condiciones estándares de temperatura y presión: se deben convertir los volúmenes de gas medidos durante el ensayo a volúmenes de gas a condiciones estándares de temperatura y presión y efectuar la debida corrección por humedad, ya que una cierta fracción de vapor de agua se genera durante todo el experimento. Se emplean las siguientes ecuaciones (Yagi, 2009).

Ecuación 1. Corrección de volumen obtenido a condiciones estándares de temperatura y presión

$$V_{tc} = \left(\frac{P_{atm} - P_w}{P_{atm}} \right) * V_t$$

Ecuación 2. Conversión de los volúmenes de gas medidos durante el ensayo a volúmenes de gas a condiciones estándares de temperatura y presión

$$V_{t(esp)} = \left(\frac{273}{T_r} \right) * \left(\frac{P_{atm}}{1013} \right) * V_{tc}$$

Dónde: V_{tc} = Volumen total corregido en litros; P_{atm} = Presión atmosférica en el laboratorio a temperatura ambiente del laboratorio en hPa; P_w = Presión del agua a temperatura ambiente del laboratorio en hPa; V_t = Volumen total de gas producido durante el experimento en litros; $V_{t(esp)}$ = Volumen de gas corregido a condiciones de temperatura y presión estándar en litros; T_r = Temperatura ambiente del laboratorio en grados Kelvin (K)

Cantidad de carbono gaseoso producido en cada ensayo: cada mol de los materiales de prueba presenta determinado peso, cada mol de carbono produce un mol de metano o dióxido de carbono. Cada mol de gas producido ocupa 22,4 L en condiciones estándar de temperatura y presión (273 K, 1atm). Por tanto se calcula la cantidad de carbono gaseoso producido en cada ensayo, así: ver ecuación 3:

Ecuación 3. Cantidad de carbono gaseoso producido en cada ensayo

$$C_g = \frac{V_{t(esp)}}{22.4} * 12$$

Porcentaje de biodegradación: es la variable objetivo del ensayo, se calcula así, ver ecuación 4:

Ecuación 4. Porcentaje de biodegradación

$$\% \text{Biodegradación} = \frac{C_g - C_{gb}}{C_t} * 100$$

Dónde: C_g = Carbono gaseoso de la muestra; C_{gb} = Carbono gaseoso en el blanco; C_t =Carbono total en la muestra.

También se calcula el error estándar e intervalo de confianza del porcentaje de biodegradación, ver Anexo A.3.6.

1.9 DESCRIPCION DE LA CÉLULA DE BIODEGRADACION ANAEROBIA

La célula de proceso de Biodegradación Anaerobia del Laboratorio de Biotecnología de la Universidad del Cauca, está conformada por tres unidades: preparación de inóculo, biodegradación y caracterización.

1.9.1 Unidad de preparación de inóculo

Está compuesta por diez módulos equipo: tanque de almacenamiento para FORSU, pesado de FORSU, mezclado de FORSU, equipo de biodigestión, calentamiento, acumulación de gas, control de pH, control de sólidos, medición de gas y un equipo para registro y cálculos.

El módulo equipo de biodigestión consta de una tina de aluminio de 40L cerrada herméticamente por una tapa en acero inoxidable, tiene un sistema de agitación manual; el módulo equipo de calentamiento consta de un recipiente baño maría de aluminio, un termostato y resistencia eléctrica. La tapa que cierra el biodigestor contiene 4 puertos, ver figura 1 y figura 4. La figura 4 representa un diagrama PFD desarrollado a partir de información consignada en la sección 1.8 donde se realiza la descripción del proceso y se utilizará como referente para la descripción de la célula.

Puerto 1: permite medir temperatura y controlar pH del inóculo. Cuenta con un “Sistema de toma de muestras” compuesto por una tubería de dos válvulas tipo mariposa (V1 y V2) que habilita el ingreso de instrumentos y evita el paso de aire (cierre hermético); se abren las válvulas secuencialmente, se introduce una sonda plástica para extraer muestra de inóculo y se mide el pH con el sensor OAKTON ARCON pH 5, ver figura 2a; para medición de temperatura se introduce un termómetro de vidrio, ver figura 2b.

Puerto 2: permite homogenizar la mezcla en el interior del bioreactor; incorpora un “Sistema de agitación manual”, conformado por una palanca externa unida a un eje metálico con agitador de aspas; la palanca comunica un movimiento para mezclar, homogenizar y asegurar una buena actividad microbiótica en el proceso.

Puerto 3: permite acumular y medir gas; presenta una tubería que une una sonda plástica a una conexión tubular denominado “Sistema de recolección de gases”, que distribuye el flujo de gas por apertura o cierre de 4 válvulas (V3, V4, V5, V6), ver figuras 1 y 4; por el cierre de V3 y V4 y apertura de V5 y V6 y el accionamiento de una bomba de succión, ver figura 1, el agua asciende desde un cilindro invertido inmerso dentro de un tanque, denominado “Sistema de acumulación de gases” el accionamiento de recolección inicia cuando se abre V3 y cierra V5, el peso de una columna de agua absorbe el gas producido en la digestión dentro del biodigestor, ver figura 4, finalmente al abrir V4, el gas se almacena en una bolsa de destroza invertida denominada “Toma de muestras de gas” donde un sensor de metano referencia HITOX IR 600, ver figura 2.c, se conecta y realiza la succión del gas retenido para medir CH₄.

Puerto 4: acceso para controlar la temperatura del inóculo; a través del puerto ingresa el sensor de temperatura de un termostato, ver figura 2.d, se utiliza como sistema de control manteniendo la temperatura en un valor definido, mediante un interruptor de accionamiento on/off.

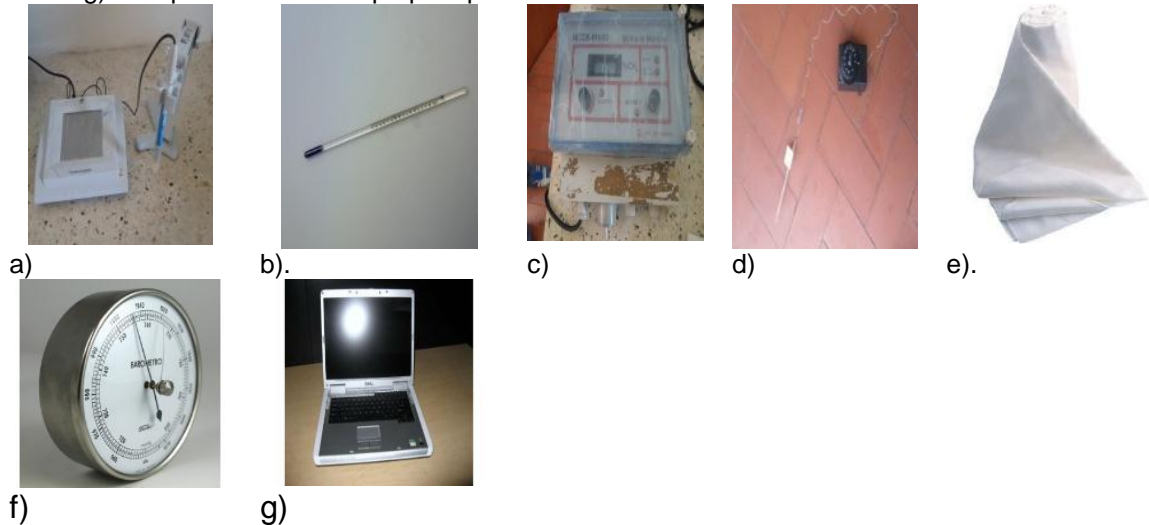
Existen otros módulos equipo que se utilizan en la formulación de FORSU: un tanque de almacenamiento, ver figura 3c, una balanza JAVAR CW 15, ver figura 3a, una licuadora JAVAR HBB250R, ver figura 3b y un tamiz (filtro de tela), ver figura 2e

Figura 1. Unidad de preparación de inóculo



Fuente:(Camacho & Aley, 2012).

Figura 2. Elementos de medición, control y de registro de la unidad de preparación de inoculo a) Sensor de pH metro OAKTON ARCON pH 5 b) Termómetro de vidrio c) Sensor de metano HITOX IR 600 d) Termostato TS090S e) Tamiz (filtro de tela) f) Barómetro de precisión Fisher PRAZIS 15:01 g) Computador DELL Laptop Inspiron 1525



Fuente: propia, agosto de 2014.

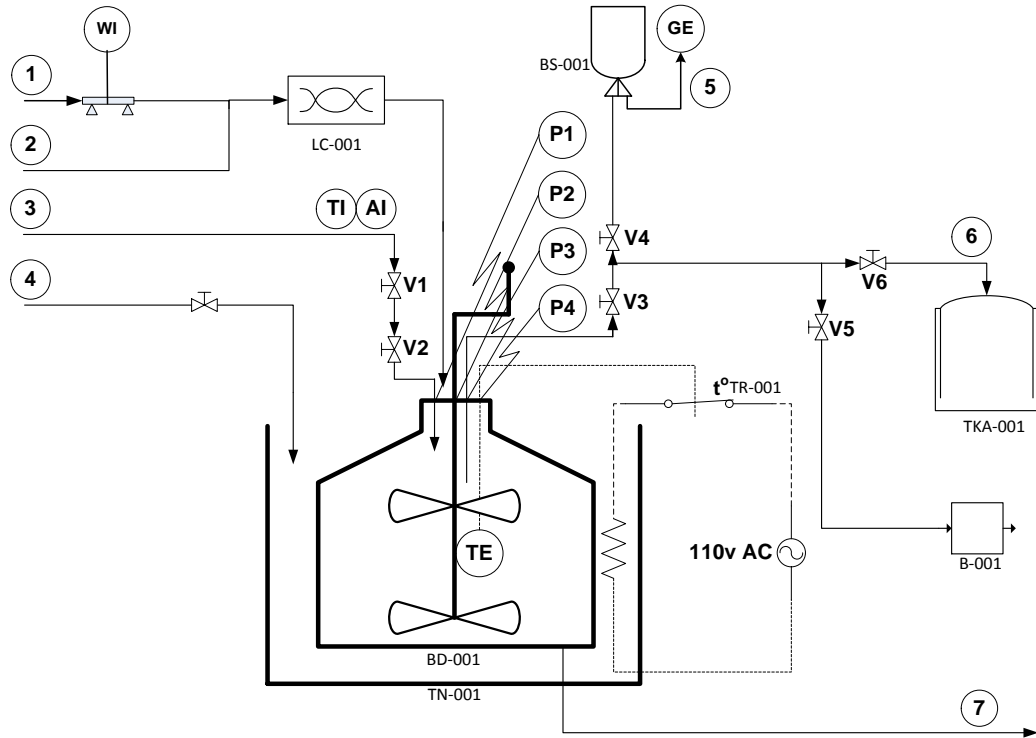
Figura 3. Módulos equipo para formulación de FORSU y mezclado de FORSU a) Balanza industrial JAVAR CW 15 b) Licuadora industrial JAVAR HBB250R de 15 litros c) Tanque de almacenamiento FORSU



Fuente: propia, agosto de 2014.

El PFD de preparación de inóculo, ver figura 4, describe el ingreso de materias primas e insumos al biodigestor y su transformación hasta la obtención de inóculo y residuos; FORSU, en las proporciones indicadas, ver tabla 2, y agua sin cloro, se mezclan en la licuadora industrial JAVAR, que se depositan en un biodigestor y se mezcla con rumen bovino; el pH se controla suministrando bicarbonato de sodio de forma manual; la mezcla permanece por 55 días a 55 °C para obtener como salida inóculo y como residuo exceso de líquido; el proceso genera biogás, el flujo de gas se distribuye a través del “Sistema de recolección de gases”, pasando por el “Sistema de acumulación de gases”, la bomba de succión empuja agua de un tanque hasta el acumulador de gases y transfiere el gas hasta una bolsa de destroza, se mide el volumen con un sensor de metano.

Figura 4. PFD unidad de preparación de inoculo



Numero o etiqueta	Flujo	Descripción	Temperatura
1	FORSU	Entrada	Ambiente
2	Agua sin cloro y rumen bobino	Entrada	Ambiente
3	Bicarbonato, inoculo	Control de pH	55 ±2 °C
4	H ₂ O	Entrada de agua a la tina baño maría	Ambiente
5	CH ₄ y CO ₂	Toma de muestras de gas	
6	CH ₄ y CO ₂	Flujo gas hacia acumulador	
7	Inoculo		
P1	Bicarbonato de inoculo	Puerto 1-Sistema de toma de muestras	
P2		Puerto 2-Sistema de agitación manual	
P3	CH ₄ y CO ₂	Puerto 3-Sistema de recolección de gases	
P4	Corriente eléctrica	Puerto 4-Sistema de control de temperatura	
BD-001	Inoculo	Biodigestor	55 ±2 °C
TN-001	Agua	Tina baño maría	55 ±2 °C
LC_001	FORSU, Agua sin cloro y rumen bobino	Licuidadora industrial	
TR-001	Corriente eléctrica	Termostato	55 ±2 °C
B-001	Agua	Bomba de succión	Ambiente
BS-001	Gas	Bolsa-toma de muestras de gas	Ambiente
TKA-001	Gas	Tanque acumulador-Sistema de acumulación de gases	Ambiente

Fuente: propia, septiembre de 2014.

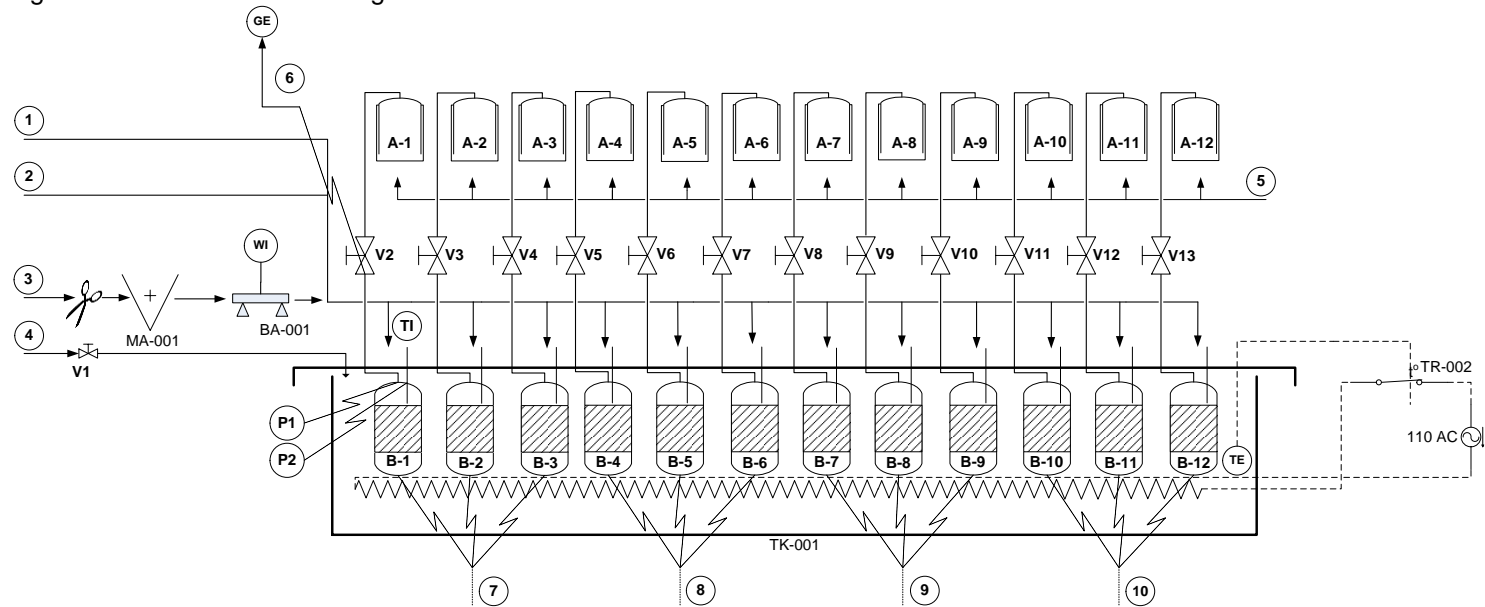
1.9.2 Unidad de biodegradación

La unidad de biodegradación anaerobia, se compone de once módulos equipo: 12 bioreactores con tapa hermética, 12 acumuladores de gas, equipo de calentamiento, equipo de medición de gas metano, equipo de control de pH, pesado, trituración, corte, calentamiento, presión, y módulo equipo de registro y cálculo (computador).

A partir de la descripción de proceso descrita en la sección 1.8, se elabora un diagrama de flujo de proceso PFD, ver figura 5, para un mejor reconocimiento de la planta y del proceso.

La figura 5, describe el flujo de materiales involucrados en la degradación de inóculo con materiales de prueba hasta la generación de gas metano y residuos: como entradas, se toman muestras por triplicado de celulosa, LDPE y muestra de ensayo, parte de ellos se corta manualmente con tijera, y se pesa en balanza analítica, ver figura 8.a, y otra parte se pulveriza en molino analítico, ver figura 8.b; el inóculo se pesa de manera independiente y se diluye en agua destilada; se ubica el inóculo pesado en los 12 bioreactores denotados por la letra (B) y se adiciona por triplicado las muestras de celulosa, LDPE y muestra de ensayo en cada bioreactor; éstas réplicas permanecen por treinta días a 52 ± 2 °C, para su biodegradación;. La unidad de biodegradación presenta una válvula de acción manual, V1 que suministra agua al tanque de calentamiento tipo baño maría. La parte inferior del diagrama describe la salida de material degradado por triplicado de los bioreactores. El proceso genera biogás (metano y dióxido de carbono) que se almacena de forma independiente en cada acumulador de gas denotado (A), el gas llega a este punto mediante la conexión de sondas plásticas procedentes del puerto P1 de la tapa de cada bioreactor. Para la medición de gas, las válvulas V2,..., V13 permiten el flujo gaseoso producido en la digestión hacia un sensor de CH₄ que se conecta a cada una de las válvulas.

Figura 5. PFD unidad de biodegradación anaerobia



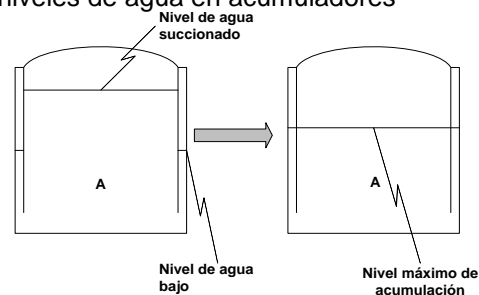
Numero o etiqueta	Flujo	Descripción	Temperatura
1	Agua destilada	Entrada a bioreactores	Ambiente
2	Inoculo	Entrada a bioreactores	Ambiente
3	Muestras por triplicado	Celulosa, Biopolímero, LDPE, Blanco	55 ±2 °C
4	H ₂ O	Entrada de agua a tanque baño maría	Ambiente
5	Acido, Base	Ajuste de pH en el agua para los acumuladores	Ambiente
6	CH ₄ y CO ₂	Toma de muestras de gas	
7	Inoculo y residuos	Muestra en blanco	Ambiente
8	Inoculo y residuos	Celulosa degradada	Ambiente
9	Inoculo y residuos	Biopolímero de prueba degradado	Ambiente
10	Inoculo y residuos	LDPE	Ambiente
TK-001	H ₂ O	Tanque baño maría	55 ±2 °C
MA-001	Muestras de ensayo	Molino analítico	55 ±2 °C
BA-001	Muestras de ensayo pulverizadas e Inoculo	Balanza analítica	55 ±2 °C
TR-002	Corriente eléctrica	Termostato	55 ±2 °C
A-1...A-12	CH ₄ y CO ₂	Acumuladores	
B-1...B12	Inoculo y muestras de ensayo	Bioreactores	55 ±2 °C

Fuente: propia, septiembre de 2014.

La unidad de biodegradación, se describe como una estructura metálica, ver figura 7, conformada por un tanque de acero inoxidable rectangular, de dimensiones (2.3 m de largo) por (27.5 cm de ancho), espesor (2.5 cm), ver figura 8.a, que se cierra con tapa de vidrio para monitoreo, ver figura 8.b, el tanque es utilizado como equipo de calentamiento tipo baño maría, para el control de temperatura, el tanque cuenta con una resistencia eléctrica unida a un termostato, el control se realiza con el mismo principio de funcionamiento descrito en la unidad de preparación de inóculo. La válvula (V1) realiza el suministro de agua, en el tanque se sumergen doce bioreactores, frascos de vidrio con capacidad máxima de 800 ml sellados herméticamente con tapa plástica, mediante la presión de una lámina metálica con tornillos, ver figuras 8.c, denotados por la letra (B), ver figura 5; la tapa de los bioreactores contienen dos puertos (P1 y P2), P1 hace las conexiones por medio de sondas plásticas a cada acumulador respectivamente denotados (A), contiene válvulas de accionamiento manual denotadas (V2,...,V13), permite el flujo gaseoso producido en la biodegradación desde los bioreactores hacia los acumuladores. Para la acumulación de gas, es necesario suministrar a cada acumulador una solución de ácido clorhídrico de concentración 12 N manualmente para establecer el pH en 2 que impida la disolución de CH₄ en el agua, con este fin se utiliza un pH metro.

Para la transferencia de gas de los bioreactores hacia los acumuladores: se cierran las válvulas, se desconecta la sonda de los bioreactores y se conecta el sensor de CH₄ descrito anteriormente a cada una de las válvulas, éste equipo succiona el aire en los acumuladores que disminuye la presión y esta disminución eleva la columna hasta que ascienda a un nivel alto, ver figura 6, luego el sensor se desconecta de las válvulas y éstas nuevamente se ensamblan a los bioreactores, la acción del peso de la columna de agua en los acumuladores succiona el gas producido. Cuando se alcanza el nivel máximo de acumulación, es decir, cuando el agua succionada se nivela, se repite el procedimiento anterior con el sensor para cuantificar el gas retenido en los acumuladores, además de volver a succionar agua en ellos. El puerto 2 (P2) se utiliza para medir la temperatura en cada bioreactor, introduciendo un termómetro de vidrio.

Figura 6. Descripción de niveles de agua en acumuladores



Fuente: propia, octubre de 2014.

Figura 7. Unidad de biodegradación anaerobia



Fuente: propia, septiembre de 2014.

Figura 8. a) Tanque baño María, b) Tapa de vidrio, c) Bioreactor con tapa hermética, d) Acumulador de gas



a)



b).



c)



d)

Fuente: propia, septiembre 2014.

La unidad comparte instrumentos de medición con la unidad de preparación de inoculo, como sensor infrarrojo, módulo equipo de registro y cálculo (computador), manómetro y termómetro de vidrio usado para reportar temperatura ambiente y de las muestras; cuenta con placas circuitales armada con dispositivos operacionales, que mostraba una construcción empírica e incipiente nunca se conectó con equipos los para el control de variables, ver figura 9.

Figura 9. Placas circuitales



Fuente: propia, septiembre de 2014.

1.9.3 Unidad de caracterización

Está compuesta por siete módulos equipo donde se realiza: caracterización de FORSU, de inoculo y de materiales de prueba: equipo de pesado y trituración, nitrógeno total, carbono orgánico total oxidable, sólidos fijos y volátiles, sólidos totales, determinación de humedad, de materia seca.

•Equipo de pesado y trituración

El equipo de pesado, está conformado por una balanza analítica RADWAG XA 110/X, ver figura 10.a, que pesa componentes de la formulación de FORSU, inoculo y muestras de ensayo. El equipo de trituración está conformado por un molino analítico A11 BASIC IKA, ver figura 10.b, donde parte de la muestra de ensayo es pulverizada.

Figura 10. a) Balanza analítica b) Molino analítico



a)
Fuente: propia, agosto de 2014.

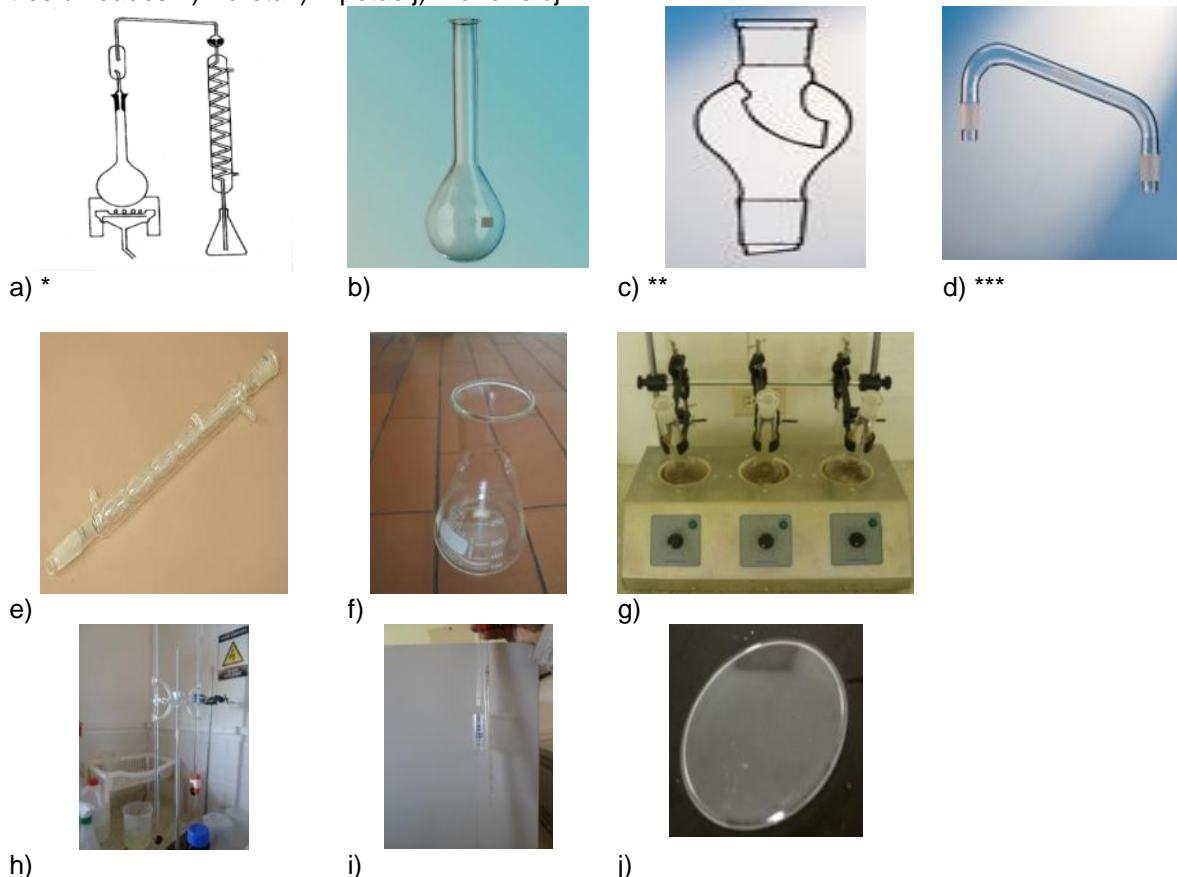


b)

•Equipo para la determinación de Nitrógeno Total

El módulo de equipo para realizar esta prueba utiliza tres aparatos de digestión - destilación Kjeldahl, ver figura 11.a) cada aparato está compuesto por: balón Kjeldahl de 800 ml, ver figura 11.b) un adaptador tipo Kjeldahl, ver figura 11.c) un adaptador puente de destilación, ver figura 11.d) un condensador Graham, ver figura 11.e) un Erlenmeyer de 250 ml, ver figura 11.f, un equipo de calentamiento de tres unidades, ver figura 11.g); se utilizan instrumentos para medición como: bureta de 50 ml, ver figura 11.h, pipetas de 20 y 10 ml, ver figura 11.i, vidrio reloj, ver figura 11.j, y balanza analítica descrita anteriormente.

Figura 11. Equipos utilizados en la prueba de determinación de nitrógeno total a) Aparato de digestión - destilación Kjeldahl, b) Matraz Kjeldahl c) Adaptador para matraz Kjeldahl, d) adaptador puente de destilación e) Condensador de Graham f) Erlenmeyer g) Equipo de calentamiento de tres unidades h) Bureta i) Pipetas j) Vidrio reloj



Fuente: propia, agosto de 2014.

* Fuente: (Camacho & Aley, 2012)

** Fuente: (ICT SL instrumentación Científico Técnica, 2014)

*** Fuente: (PRENDO Aparatos de laboratorio y SEV Vidrio Científico, 2011)

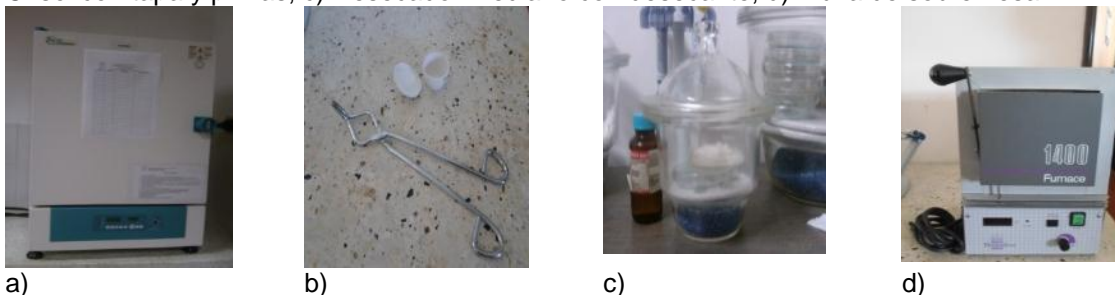
• Equipo para la cuantificación de Carbono Orgánico Oxidable Total

Se hace uso de la balanza analítica, Erlenmeyer de 250ml, bureta de 50ml y pipetas aforadas de 20 y 10 ml, descritas anteriormente.

• Equipo para la determinación de sólidos fijos y volátiles

Se hace uso de balanza analítica, un horno pequeño OF-01E, ver figura 12.a, crisol de porcelana con tapa pequeño y pinzas, ver figura 12.b, un desecador mediano con desecante (sílica), ver figura 12.c, Mufla de sobremesa 1400 Furnace, ver figura 12.d.

Figura 12. Equipos utilizados para las pruebas de Sólidos Fijos y Volátiles: a) Horno pequeño, b) Crisol con tapa y pinzas, c) Desecador mediano con desecante, d) Mufla de sobremesa



Fuente: propia, agosto de 2014.

• Equipo para la determinación de humedad y sólidos totales

Consta de un medidor de humedad Precisa 360XM, ver figura 13.

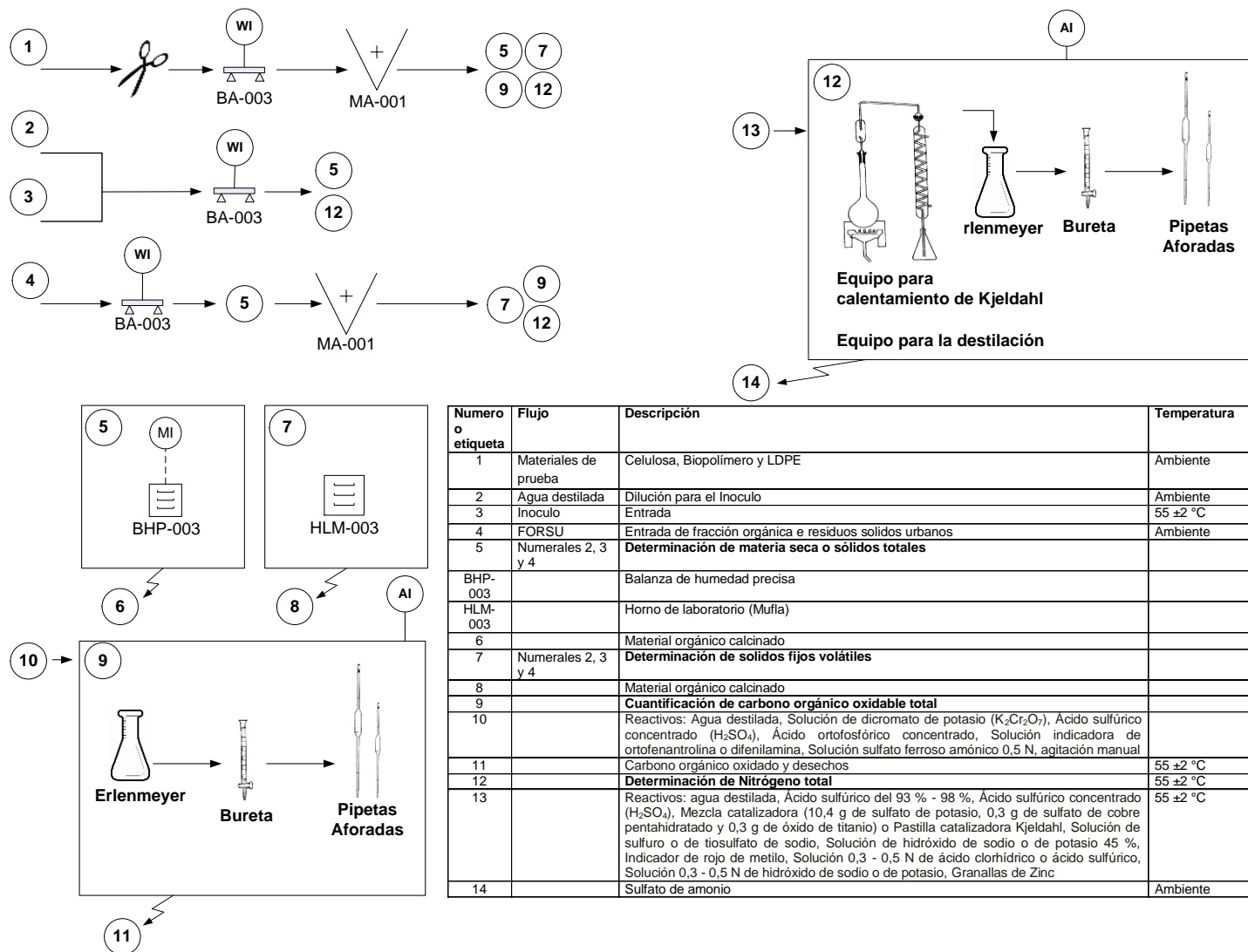
Figura 13. Medidor de humedad precisa



Fuente: propia, agosto de 2014.

A partir de la descripción de proceso descrita en la sección 1.8, se elabora un diagrama de flujo de proceso PFD de las pruebas de caracterización, ver figura 4. Compuesta por las operaciones: 1) Determinación de humedad y sólidos totales 2) Determinación de sólidos fijos volátiles 3) Cuantificación de carbono orgánico total 4) Determinación de nitrógeno total. El diagrama PFD describe el flujo de materias primas e insumos en el desarrollo de las pruebas para caracterizar FORSU, inóculo y materiales de prueba. Para caracterizar FORSU, se toman 10gr de los componentes de la formulación, se llevan a la prueba de caracterización de sólidos totales donde se secan, se trituran con molino analítico y posteriormente se realizan las demás pruebas de caracterización: a) Materia seca o sólidos totales b) Sólidos volátiles c) Carbono orgánico oxidable total d) Nitrógeno total (NH₄ – N), ver figura 14. Para caracterizar los materiales de prueba: se cortan con tijera para pesarlos con balanza analítica, luego se trituran con molino analítico y se realizan las pruebas de caracterización: a) Materia seca o sólidos totales b) Sólidos volátiles c) Carbono orgánico total, d) Nitrógeno total (NH₄ – N), ver figura 14. Para caracterizar el inóculo, se disuelve en agua destilada y se realizan las pruebas: nitrógeno total, materia seca y sólidos totales, ver figura 14. a) Humedad, materia seca o sólidos totales, b) Sólidos volátiles, c) Carbono orgánico oxidable total y d) Nitrógeno total (NH₄ – N).

Figura 14. PFD unidad caracterización



Numero etiqueta	Flujo	Descripción	Temperatura
1	Materiales de prueba	Celulosa, Biopolímero y LDPE	Ambiente
2	Agua destilada	Dilución para el Inoculo	Ambiente
3	Inoculo	Entrada	55 ±2 °C
4	FORSU	Entrada de fracción orgánica e residuos solidos urbanos	Ambiente
5	Numerales 2, 3 y 4	Determinación de materia seca o sólidos totales	
BHP-003		Balanza de humedad precisa	
HLM-003		Horno de laboratorio (Mufla)	
6		Material orgánico calcinado	
7	Numerales 2, 3 y 4	Determinación de solidos fijos volátiles	
8		Material orgánico calcinado	
9		Cuantificación de carbono orgánico oxidable total	
10		Reactivos: Agua destilada, Solución de dicromato de potasio (K ₂ Cr ₂ O ₇), Acido sulfúrico concentrado (H ₂ SO ₄), Acido ortofosfórico concentrado, Solución indicadora de ortofenantrolina o difenilamina, Solución sulfato ferroso amónico 0,5 N, agitación manual	
11		Carbono orgánico oxidado y desechos	55 ±2 °C
12		Determinación de Nitrógeno total	55 ±2 °C
13		Reactivos: agua destilada, Acido sulfúrico del 93 % - 98 %, Acido sulfúrico concentrado (H ₂ SO ₄), Mezcla catalizadora (10,4 g de sulfato de potasio, 0,3 g de sulfato de cobre pentahidratado y 0,3 g de óxido de titanio) o Pastilla catalizadora Kjeldahl, Solución de sulfuro o de tiosulfato de sodio, Solución de hidróxido de sodio o de potasio 45 %, Indicador de rojo de metilo, Solución 0,3 - 0,5 N de ácido clorhídrico o ácido sulfúrico, Solución 0,3 - 0,5 N de hidróxido de sodio o de potasio, Granallas de Zinc	55 ±2 °C
14		Sulfato de amonio	Ambiente

Fuente: propia, octubre de 2014.

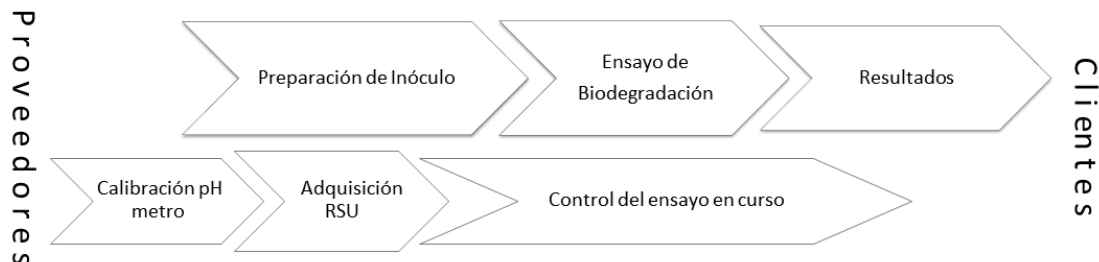
2 INGENIERÍA CONCEPTUAL

En este capítulo se hace una descripción técnica del proceso BATACS, desde el punto de vista de la automatización industrial, partiendo de la cadena de valor para identificar las actividades que aportan valor al ensayo; se realiza diagrama de flujo de materias primas y subproducto; se expresa el proceso en términos de modelos ISA S88 parte I (ISA, 2006): proceso, físico y procedimental, se realiza un diagnóstico del proceso, se presenta las necesidades declaradas por los clientes y finalmente se establecen los requerimientos.

2.1 CADENA DE VALOR DEL PROCESO BATACS

A partir del protocolo del proceso BATACS implementado por Camacho y Aley, se identifica la cadena de valor, ver figura 15, conformada por dos líneas: primaria y secundaria. La primaria consta de las etapas: “preparación de inóculo”, “ensayo BATACS” y una actividad “resultados”, es una secuencia lógica del proceso dispuesta para la obtención de los resultados del ensayo; en la línea secundaria se ubican actividades complementarias que aseguran la calidad del ensayo como calibración de uno de los sensores, adquisición de FORSU y control del ensayo. El control del ensayo en curso hace referencia a operaciones de pruebas de caracterización y actividades de proceso: control de pH en la etapa de preparación de inóculo y control de temperatura en preparación de inóculo y ensayo de biodegradación.

Figura 15. Cadena de valor del proceso BATACS obtenida del protocolo implementado por Camacho y Aley



Fuente: propia, septiembre de 2014.

2.2 DIAGRAMA DE FLUJO EN BLOQUES

De acuerdo con la descripción del proceso BATACS consignado en la sección 1.8, del protocolo de Camacho y Aley, (Camacho & Aley, 2012), se desarrolla un diagrama de flujo del proceso teniendo en cuenta las entradas y salidas a las etapas del proceso y operaciones de caracterización, ver cuadro 2.

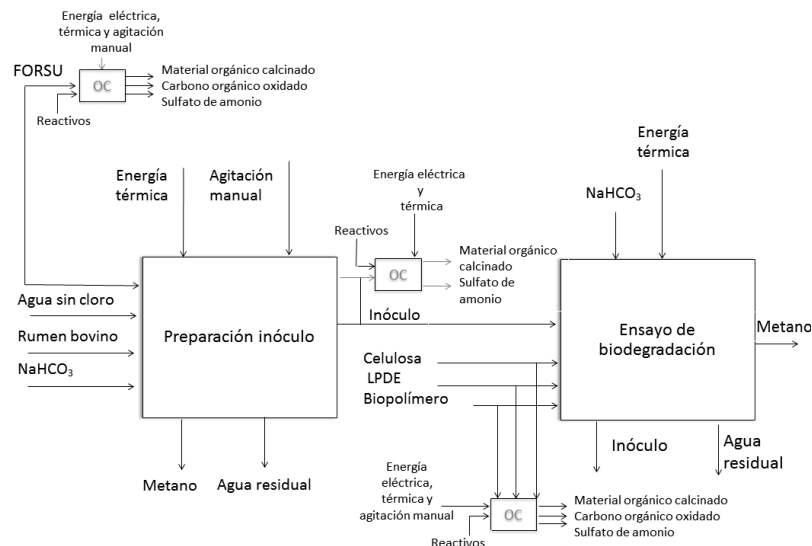
Cuadro 2. Entradas y salidas del proceso BATACS y operaciones de caracterización

Entradas	Etapas/Operaciones	Salidas
Cáscara de: papa, papa criolla, naranja, mandarina, plátano, arveja, desecho de zanahoria, lechuga y yuca. Agua, rumen líquido de bovino. Agitación mecánica manual. Energía térmica.	Preparación inóculo	Inóculo Metano Agua residual
Inóculo, celulosa, LDPE. Polímero biodegradable. Energía térmica.	Ensayo de biodegradación	Metano y CO ₂ Inóculo Agua residual (digestato)
FORSU o Inóculo o materiales de prueba. Energía térmica.	Prueba materia seca o sólidos totales	Material orgánico seco
FORSU o Inóculo o materiales de prueba. Energía térmica.	Prueba sólidos volátiles	Material orgánico calcinado
FORSU o materiales de prueba. Reactivos: Agua destilada Solución de dicromato de potasio (K ₂ Cr ₂ O ₇) Ácido sulfúrico concentrado (H ₂ SO ₄) Ácido ortofosfórico concentrado Solución indicadora de ortofenantrolina o difenilamina Solución sulfato ferroso amónico 0,5 N Agitación manual	Prueba carbono orgánico oxidable total	Carbono orgánico oxidado Desechos
FORSU o Inóculo o materiales de prueba. Reactivos: Agua destilada Ácido sulfúrico del 93 % - 98 % Ácido sulfúrico concentrado (H ₂ SO ₄) Mezcla catalizadora (10,4 g de sulfato de potasio, 0,3 g de sulfato de cobre pentahidratado y 0,3 g de óxido de titanio) o Pastilla catalizadora Kjeldahl Solución de sulfuro o de tiosulfato de sodio Solución de hidróxido de sodio o de potasio 45 % Indicador de rojo de metilo Solución 0,3 - 0,5 N de ácido clorhídrico o ácido sulfúrico Solución 0,3 - 0,5 N de hidróxido de sodio o de potasio. Granallas de Zinc. Energía eléctrica Energía térmica	Prueba Nitrógeno total	Residuos sulfurosos

Fuente: propia, septiembre de 2014.

Conforme con la sección 1.8 se plantea un diagrama de flujo en bloques por etapas, del proceso BATACS implementado por Camacho y Aley, ver figura 16, el cual inicia con la obtención de FORSU en las proporciones indicadas en el cuadro 2; se toman pequeñas cantidades de FORSU para comprobar si cumplen las especificaciones, mediante cuatro operaciones de caracterización, a la salida se obtienen residuos como material orgánico calcinado, carbono orgánico oxidado y sulfato de amonio; si el FORSU satisface las condiciones, ingresa a la etapa de preparación de inóculo y se mezcla con agua sin cloro y rumen bovino, ésta etapa necesita de energía térmica porque se desarrolla a 55°C y se utiliza el bicarbonato de sodio y carbonato de calcio para controlar el pH; como resultado de esta etapa se obtiene inóculo, biogás y agua residual como residuos; una pequeña muestra de inóculo pasa por tres operaciones de caracterización y si cumple las condiciones de calidad se utiliza en el ensayo; de las operaciones de caracterización salen residuos, ver cuadro 2 y figura 16; la etapa de ensayo de biodegradación requiere de materiales de prueba: celulosa, LDPE y polímero biodegradable, éstas deben cumplir condiciones de calidad, por tanto, son caracterizadas con cuatro operaciones, de ahí se obtienen residuos ya mencionados, una vez cumplan con los requisitos, los materiales de prueba ingresan a la etapa del ensayo con inóculo; la etapa se desarrolla a 52°C por tanto requiere de energía térmica, al inicio se utiliza bicarbonato de sodio para ajustar el pH de los acumuladores, a la salida de esta etapa se obtiene como producto gas metano y como residuos inóculo y agua residual, sulfuro de hidrógeno y amoníaco, ver cuadro 2 y figura 16.

Figura 16. Diagrama de flujo en bloques del proceso BATACS por etapas

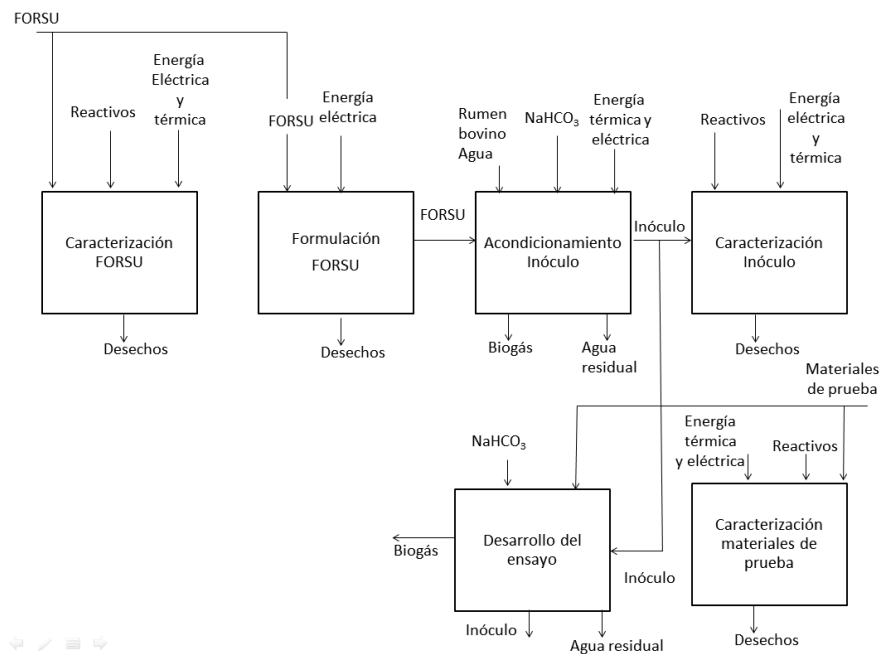


Fuente: propia, septiembre de 2014.

En la figura 16, los cuadros nombrados OC indican operaciones de caracterización que se realizan sobre pequeñas cantidades de FORSU, inóculo y materiales de prueba (celulosa, LDPE y polímero biodegradable) respectivamente, con sus entradas y salidas, los cuadros grandes representan las etapas principales del proceso con sus entradas y salidas, ver tabla 3.

Se describe el proceso BATACS mediante un diagrama de flujo de bloques por operaciones, son seis operaciones que lo conforman: en la parte superior, cuatro de la etapa de preparación de inóculo y en la inferior, dos de ensayo de biodegradación; se detalla el flujo de materias primas, insumos y flujos energéticos, ver figura 17.

Figura 17. Diagrama de flujo en bloques del proceso BATACS por operaciones



Fuente: propia, octubre de 2014.

2.3 MODELOS DE PROCESO BATACS

A nivel industrial, se hace uso de la norma ISA 88 parte 1 (ISA, 2010) para unificar el lenguaje de todas las partes involucradas en el diseño, construcción y ejecución de procesos de producción; provee una terminología estándar y un conjunto de modelos para plantas de manufactura y control batch; en términos generales, el estándar separa el proceso en: modelo de proceso, modelo físico y modelo de control procedimental; se apropia el estándar al proceso BATACS como se expone a continuación.

2.3.1 Modelo de Proceso del Ensayo BATACS

En la sección 1.8 del capítulo 1, se presenta la descripción del proceso BATACS, de acuerdo a lo consignado en el protocolo de Camacho y Aley (Camacho & Aley, 2012), está conformado por dos etapas: preparación de inóculo y ensayo de biodegradación. La primera etapa comprende cuatro operaciones: formulación de FORSU, caracterización de FORSU, acondicionamiento de inóculo y caracterización de inóculo; desarrollada en 18 acciones de proceso; la segunda etapa comprende dos operaciones: caracterización de materiales de prueba y desarrollo de ensayo, que se ejecutan en 17 acciones de proceso; en total se realizan 6 operaciones y 35 acciones de proceso, ver cuadro 3.

Cuadro 3. Modelo de Proceso del Proceso BATACS

PROCESO DE BIODEGRADACIÓN ANAEROBIA TERMÓFILA EN ALTA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS		
ETAPAS	OPERACIONES	ACCIONES DEL PROCESO
Preparación de Inóculo	Formulación de FORSU	Obtención de FORSU.
		Pesaje de FORSU.
	Caracterización de FORSU	Pesaje muestra de FORSU
		Trituración de muestra de FORSU
		Determinación de materia seca o sólidos totales y volátiles de FORSU
		Determinación de carbono orgánico total
		Determinación de contenido de nitrógeno
	Acondicionamiento de inóculo	Calibración de pH metro
		Mezclado con rumen bobino y agua sin cloro
		Homogenizado de mezcla
		Control de pH
		Control de temperatura de la mezcla degradada
		Registro de mediciones
	Caracterización de inóculo	Control de sólidos en el inóculo
		Disolución de inóculo en agua destilada
		Pesado de muestra de inóculo
		Medición de pH
		Determinación de nitrógeno total
Ensayo de biodegradación	Caracterización de materiales de prueba	Cálculos y documentación
		Corte de materiales de prueba
		Pesado de materiales de prueba
		Trituración de materiales de prueba
		Determinación de materia seca o sólidos totales y sólidos fijos y volátiles totales
		Determinación de cantidad de carbono orgánico oxidable total
	Determinación de nitrógeno total	
	Desarrollo del ensayo BATACS	Control de pH en agua de acumuladores
		Pesado de inóculo y carga de bioreactores
		Corte de materiales de prueba
		Pesado de materiales de prueba
		Trituración de celulosa y parte del material de prueba
		Cortado de LDPE y parte del material de prueba.
		Carga de materiales de prueba en bioreactores
		Mezclado en cada bioreactor por 3 minutos.
		Control de temperatura en la mezcla degradada a 52°C± 2°C
		Registro de mediciones de metano, temperatura, presión atmosférica
Cálculos y documentación		

Fuente: propia, octubre de 2014.

2.3.2 Modelo Físico del proceso BATACS

Acorde con el modelo físico S.ISA 88 parte 1 y conforme con la información consignada en la sección 1.9 sobre la descripción de la planta, se define el modelo físico del proceso BATACS, así: 1) Nivel de empresa: Universidad del Cauca, ubicada en la ciudad de Popayán, Colombia. 2) Nivel de sitio: Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Cauca, situada en la Vereda las Guacas, al norte de la ciudad de Popayán. 3) Área: edificación del laboratorio de Biotecnología de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad del Cauca. 4) Celda de proceso: denominada “Celda de Biodegradación Anaerobia” ubicada en el laboratorio de Biotecnología, donde se identifica tres unidades: a) Unidad de preparación de inóculo, b) Unidad de biodegradación y c) Unidad de caracterización, en estas unidades se identifican módulos equipo y control como se presenta a continuación.

La primera contiene 11 módulos equipo: tanque de almacenamiento, pesado, mezclado de FORSU, equipo de biodegradación, calentamiento, acumulación de gas, control de pH, control de sólidos, medición de gas y registro y cálculos; de los cuales 9 tienen módulos de control, para controlar, peso, mezclado, homogenización, temperatura, pH, cantidad de sólidos, accionar la acumulación de gases, y uno para medir gas metano, compuesto por dos módulos de control, mientras que dos de ellos son únicamente módulos equipo para almacenamiento de FORSU y para registrar y hacer cálculos, ver cuadro 4.

La segunda unidad se compone de once módulos equipo: bioreactores con tapa, acumuladores de gas, equipo de calentamiento, equipo de medición de gas metano, equipo de control de pH, pesado, trituración, corte, sensores de temperatura, presión, y módulo equipo de registro y cálculo; de los cuales, nueve tienen módulos de control para controlar: temperatura, pH, peso, trituración, corte; medir: gas metano, temperatura, presión y para accionar la acumulación de gas, ver cuadro 4.

La tercera unidad consta de siete módulos equipo: equipo de pesado, trituración, determinación de humedad, de materia seca y sólidos totales y sólidos fijos y volátiles, carbono total oxidable, nitrógeno total y módulo equipo de cálculos y registro, todos tienen módulos de control, ver cuadro 4.

Cuadro 4. Modelo físico del Proceso BATACS

Unidad de proceso de Biodegradación Anaerobia		
Unidades	Módulo Equipo	Módulo de Control
P r e p a r a c i ó n d e I n ó c u l o	Equipo de almacenamiento: bidón plástico	
	Equipo de pesado: balanza Javar CW 15	Sensor: balanza Javar
		Controlador: humano
		Actuador: humano
	Equipo de mezclado: licuadora Javar HBB250R	Sensor: humano
		Controlador: humano
		Actuador: licuadora Javar
	Equipo de biodigestión: anaerobio con agitación y tapa	Sensor: humano
		Controlador: humano
		Actuador: palanca con aspas del digestor
	Equipo de calentamiento: tanque baño María con control de temperatura (termostato TS090S y resistencia eléctrica)	Sensor: termómetro de vidrio, termostato
Controlador: termostato		
Actuador: resistencia eléctrica		
Equipo de acumulación de gas: bolsa de acumulación de gas y bomba de vacío	Sensor: humano	
	Controlador: humano	
	Actuador: bomba de vacío	
Equipo de control de pH	Sensor: pH metro OAKTON ARCON pH 5	
	Controlador: humano	
	Actuador: humano	
Equipo de control de sólidos	Sensor: humano	
	Controlador: humano	
	Actuador: tamiz	
Equipo de medición: sensor HITOX IR 600	Sensor: sensor infrarrojo de metano	
Módulo equipo de registro y cálculo computador DELL Inspiron 1525		
B i o d e g r a d a c i ó n	Equipo de biodegradación: 12 bioreactores con tapa	
	Equipo de acumulación de gas: 12 acumuladores de gas	Sensor: humano
		Controlador: humano
		Actuador: mecanismo de succión de sensor
	Equipo de calentamiento: tanque baño María, tapa, ME control de temperatura (termostato TS090S y resistencia eléctrica)	Sensor: termómetro de vidrio, termostato
		Controlador: termostato
		Actuador: resistencia eléctrica
	Equipo de medición de gas metano	Sensor: Sensor infrarrojo de metano HITOX IR 600
	Equipo de control de pH	Sensor: pH metro
		Controlador: humano ácido clorhídrico
		Actuador: humano
	Equipo de medición de temperatura	Sensor: termómetro de vidrio
	Equipo de medición de presión	Sensor: barómetro Fisher PRAZIS 15:01
Módulo equipo de registro y cálculo computador DELL Inspiron 1525		
Equipo de pesado: balanza RADWAG XA 110/X	Sensor: balanza analítica	
	Controlador: humano	
	Actuador: humano	
Equipo de trituración: : Molino analítico A11 BASIC IKA	Sensor: humano	
	Controlador: humano	
	Actuador: Molino analítico	
Equipo de corte	Sensor: humano	
	Controlador: humano	
	Actuador: tijera	

Sigue...

Cuadro 4. (Continuación)

Unidad de proceso de Biodegradación Anaerobia		
Unidades	Módulo Equipo	Módulo de Control
Caracterización	Equipo de pesado: balanza RADWAG XA 110/X	Sensor: balanza analítica Controlador: humano Actuador: humano
	Equipo de trituración: Molino analítico A11 BASIC IKA	Sensor: humano Controlador: humano Actuador: molino analítico
	Equipo para la determinación de humedad: Balanza de humedad Precisa 360XM	Sensor: balanza de humedad Controlador: humano Actuador: humano
	Equipo para la determinación de materia seca y sólidos totales y sólidos fijos y volátiles	Sensor: balanza analítica Controlador: humano Actuador: humano
	Equipo para la determinación de carbono total oxidable	Sensor: humano Controlador: humano Actuador: humano
	Equipo para la determinación de nitrógeno total	Sensor: humano Controlador: humano Actuador: humano
	Módulo equipo de registro y cálculo computador DELL Inspiron 1525	

Fuente: Propia, octubre de 2014.

2.3.3 Modelo de Control Procedimental

A partir del protocolo de Camacho y Aley (Camacho & Aley, 2012) y por entrevista con el ingeniero Ricardo Camacho (Camacho R. , 2014), se plantea el control procedimental del proceso BATACS, conformado por dos procedimientos de unidad: preparar inóculo y desarrollar ensayo de biodegradación. A su vez, el primer procedimiento comprende cuatro operaciones de unidad: formular FORSU, caracterizar FORSU, acondicionar inóculo y caracterizar inóculo; que se ejecuta en 18 fases de proceso; el segundo procedimiento de unidad consta de dos operaciones: caracterizar materiales de prueba y desarrollar ensayo, que se ejecutan en 17 fases de proceso; en total se realizan 6 operaciones y 35 fases de proceso, ver cuadro 5.

Cuadro 5. Modelo de control de procedimiento del proceso BATACS

CONTROL PROCEDIMENTAL DEL PROCESO DE BIODEGRADACIÓN ANAEROBIA TERMÓFILA EN ALTA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS		
Procedimiento de unidad	Operaciones de unidad	Fases de proceso
Preparar Inoculo	Formular FORSU	Obtener FORSU.
	Caracterizar FORSU	Pesar FORSU según formulación.
		Pesar muestra de FORSU
		Triturar muestra de FORSU
		Determinar materia seca o sólidos totales y volátiles de FORSU
		Determinar carbono orgánico total
	Determinar contenido de nitrógeno	
	Acondicionar inoculo	Calibrar pH metro
		Mezclar con rumen bobino y agua sin cloro
		Homogenizar mezcla
		Controlar pH
		Controlar temperatura de la mezcla degradada
		Registrar mediciones
	Caracterizar inóculo	Controlar sólidos en el inóculo
Pesar muestra de inóculo		
Diluir inóculo en agua destilada		
Medir pH		
Desarrollar Ensayo de biodegradación	Caracterizar materiales de prueba	Determinar nitrógeno total
		Calcular y documentar
		Cortar materiales de prueba
		Pesar materiales de prueba
		Triturar materiales de prueba
	Desarrollar ensayo BATACS	Determinar materia seca o sólidos totales y sólidos fijos y volátiles totales
		Determinar cantidad de carbono orgánico oxidable total
		Controlar pH en agua de acumuladores
		Pesar inóculo y cargaren bioreactores
		Cortar materiales de prueba.
		Pesar materiales de prueba
		Triturar celulosa y parte del material de prueba
		Cortar LDPE y parte del material de prueba.
		Cargar en bioreactores los materiales de prueba
Mezclar cada bioreactor por 3 minutos.		
Controlar temperatura en la mezcla degradada a 52°C± 2°C		
Registrar mediciones de metano, temperatura, presión atmosférica		
Calcular y documentar		

Fuente: propia, octubre de 2014.

El procedimiento puede describirse en mayor detalle describiendo fases; se presentan las fases: calibración de pH metro, control de pH, control de temperatura, determinación de materia seca o sólidos totales sólidos fijos y volátiles totales, humedad, determinación de cantidad de carbono orgánico total, y determinación de nitrógeno total, ver cuadros 6 al 12.

Cuadro 6. Fase calibrar pHmetro

Verificar disponibilidad de equipos
Limpieza del electrodo del sensor
Ubicación de buffers en soporte
Conectar el sensor al transmisor y a la fuente de poder
Calibrar el punto buffer 7
Calibrar el punto buffer 4
Ajustar hasta que el error sea 1%
Limpia el electrodo y almacenarlo

Fuente: propia, octubre de 2014.

Cuadro 7. Fase Controlar pH

Verificar calibración del sensor
Agitar del material por 5 minutos en el biodigestor
Introducir de la sonda cerrada
Abrir llaves de válvula
Colocar la sonda en el fondo del tanque
Taparla sonda con la muestra
Extraer la sonda
Abrir la sonda para dejar caer la muestra en el beaker
Diluir en agua destilada en proporción 5 a 1 agua/inóculo y agitar con la palanca
Medir pH
Controlar pH: si se encuentra por debajo de 6.5 usar carbonato de calcio para neutralizar calculado con fórmula

Fuente: propia, octubre de 2014.

Cuadro 8. Fase controlar temperatura

Abrir tapa del tanque baño María
Depositar agua en el tanque baño María
Girar botón de encendido de calentamiento hasta 52°C
Comprobar que la temperatura del agua del tanque esté en 52°C con termómetro de vidrio
Cerrar tapa del tanque baño María

Fuente: propia, octubre de 2014.

Cuadro 9. Fase determinar materia seca o sólidos totales y sólidos volátiles

Secar crisol
Enfriar crisol
Pesar crisol
Pesar muestra
Calentar muestra
Enfriar de muestra
Registrar peso
Secar a 550°C
Enfriar
Pesar
Secar a 550°C
Enfriar
Pesar
Repetir hasta que la diferencia entre dos mediciones sucesivas no sea superior a 0,001 g
Calcular ceniza total producida
Calcular sólidos volátiles

Fuente: propia, octubre de 2014.

Cuadro 10. Fase determinar contenido de humedad

Extender muestra
Fijar temperatura de secado
Iniciar medición automática
Lectura de % humedad

Fuente: propia, octubre de 2014.

Cuadro 11. Fase determinar cantidad de carbono orgánico total

Pesar material
Ubicar en Erlenmeyer
Adicionar dicromato de potasio
Adicionar ácido sulfúrico concentrado
Agitar manualmente
Enfriar
Adicionar agua
Adicionar mezcla oxidante
Adicionar cantidades añadidas doble o pesar menos producto si se torna verde brillante
Preparar blanco de reactivos
Titular blanco de reactivos con sulfato ferroso amónico
Verificar el color (amarillo a verde brillante)
Registrar volumen
Titular muestras con solución de sulfato ferroso amónico
Verificar color (desde amarillo o café rojizo hasta verde brillante)
Calcular contenido de carbono orgánico oxidable

Fuente: propia, octubre de 2014.

Cuadro 12. Fase determinar Nitrógeno Total

Pesar muestra
Ubicar muestra pesada en balón Kjeldahl
Adicionar catalizador y ácido sulfúrico concentrado
Inclinar balón
Calentar hasta que no tenga espuma
Ebullir por dos horas
Limpiar de las paredes del balón
Enfriar al aire libre
Adicionar 200ml de agua y 25ml de tiosulfato de sodio
Refrigerar a temperatura ambiente
Adicionar granallas de zinc
Inclinar balón
Adicionar 100ml de hidróxido de sodio o potasio al 45 %
Adicionar solución alcalina girando el balón
Conectar el balón al refrigerante y trampa de vapor
Calentar hasta que destile el amoniaco
Validar la prueba con amonio negativo y papel tornasol rosado
Retirar el tubo de salida del destilado
Lavar tubo destilado
Titular el exceso de solución de ácido con la solución alcalina valorada de hidróxido de sodio o potasio
Someter a digestión y destilación los reactivos
Calcular nitrógeno total

Fuente: propia, octubre de 2014

2.4 DIAGNÓSTICO DEL PROCESO BATACS

Se realiza teniendo en cuenta: una inspección visual interna y externa de la célula, nivel de dificultad de las operaciones, nivel de automatización de la célula, análisis de modelos, necesidades del cliente y valoración de pertinencia.

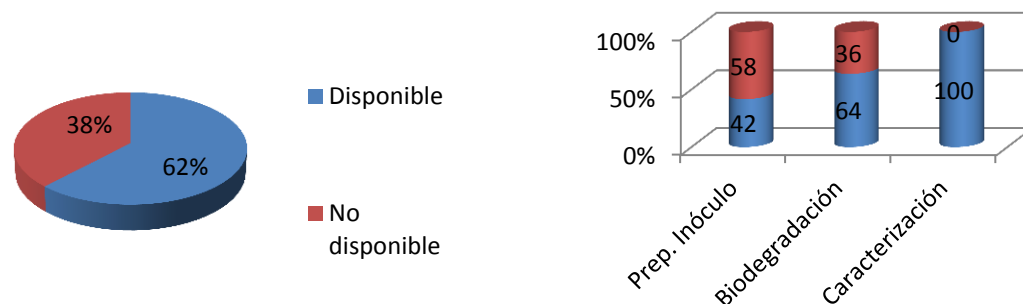
2.4.1 Inspección visual y verificación de funcionamiento de la celda del proceso BATACS

Se hace un diagnóstico de la célula así: a) Reconocimiento visual interno y externo de la planta del proceso BATACS y verificación de funcionamiento, b) Verificación de funcionamiento de elementos externos de la planta del proceso BATACS.

Reconocimiento visual interno de la planta del proceso BATACS y verificación de funcionamiento

La célula de biodegradación anaerobia del laboratorio de Biotecnología fue desarmada a finales del 2013; cuando se hace el reconocimiento no se cuenta con celda del proceso, sólo el 62% de los elementos están disponibles para su uso, ver figura 18; se encuentra disponible el 58% de los elementos de la unidad de preparación de inóculo, el 64% de la unidad de ensayo y el 100% de la unidad de caracterización, ver figura 18.

Figura 18. Estado de disponibilidad de equipos de la célula de biodegradación anaerobia del laboratorio de Biotecnología en forma general y por unidades

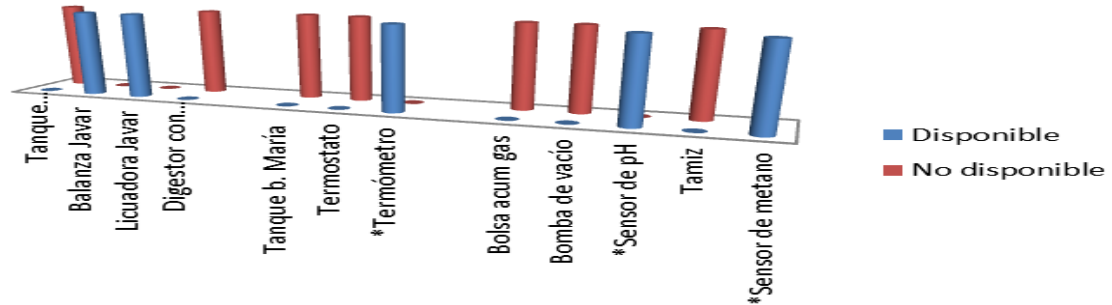


Fuente: propia, octubre de 2014.

Algunas partes de la célula se encuentran en una bodega de la facultad, otras en el laboratorio de Biotecnología y en la planta de Panes. Los elementos principales de la unidad de preparación de inóculo (biodigestor, equipo de calentamiento y acumulación de gas) no se encuentran, sólo están disponibles el termómetro de vidrio y el sensor de pH, ver figura 19; los elementos principales de la unidad

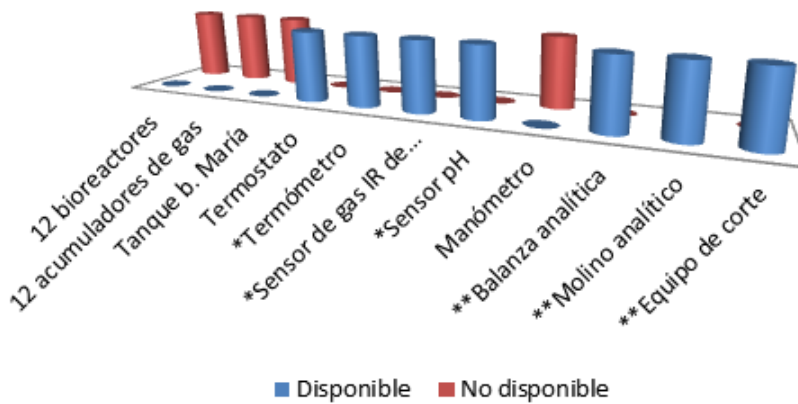
(bioreactores, acumuladores de gas y baño maría) no están en buen estado, los elementos de medición, de pesado, corte y trituración son los mismos de la unidad de caracterización, ver figura 20; por su parte, la unidad de caracterización se encuentra completa, ver cuadro 13.

Figura 19. Estado de disponibilidad de los elementos de la unidad de preparación de inóculo



Fuente: propia, octubre de 2014.

Figura 20. Estado de disponibilidad de los elementos de la unidad de preparación de ensayo



Fuente: propia, octubre de 2014.

Cuadro 13. Reconocimiento de elementos de la celda de biodegradación anaerobia

Unidad	Módulo Equipo	Estado	Ubicación
	Tanque almacenamiento	No disponible	No especificado
Preparación del inóculo	Pesado: Balanza Javar	Disponible	Lab. Biotecnología
	Mezclado: Licuadora Javar	Disponible	Lab. Biotecnología
	Biodegradación: Biodigestor anaerobio con agitador manual	No disponible	No especificado
	Calentamiento: Tanque baño María con resistencia Termostato *Termómetro	No disponible No disponible Disponible	No especificado Bodega Lab Biotecnología
	Acumulador de gases: Bolsa Bomba de vacío	No disponible No disponible	No especificado No especificado
	Control de pH: sensor de pH	Disponible	Lab. Biotecnología
	Tamiz	No disponible	No especificado
	Sensor de gas metano	Disponible	Lab. Biotecnología
Biodegradación	Biodegradación: 12 bioreactores	No disponible	Bodega
	Equipo de acumulación de gas: 12 acumuladores de gases	No disponible	Bodega
	Equipo de calentamiento: Tanque baño maría con resistencia Termostato Termómetro	No disponible Disponible Disponible	Bodega Bodega Bodega
	Equipo de medición de gas: Sensor infrarrojo de metano HITOX IR 600	Disponible Disponible	Lab. Biotecnología Lab. Biotecnología
	Equipo de control de pH: Sensor pH	Disponible	Lab. Biotecnología
	Equipo medición temperatura: Termómetro de vidrio	Disponible	Lab. Biotecnología
	Equipo de medición de presión: manómetro	No disponible	No especificado
	Equipo de pesado: balanza analítica	Disponible	Lab Biotecnología
	Equipo de trituración: molino analítico	Disponible	Planta Panes
	Equipo de corte	Disponible	Lab Biotecnología
	Caracterización	Equipo de pesado: Balanza analítica	Disponible
Equipo de trituración Molino analítico		Disponible	Planta Panes
Cuantificación de sólidos totales		Disponible	Lab. Biotecnología
Cuantificación de sólidos fijos y volátiles			
Cuantificación de carbono			
Cuantificación nitrógeno			

Fuente: propia, septiembre de 2014.

En la inspección visual se encontraron tarjetas circuitales empíricas, válvulas manuales, celdas de carga AM Cells Mod SPS, que nunca se conectaron y se desconoce su estado funcional, ver figura 21.

Figura 21. Otros elementos encontrados a) Tarjetas circuitales, b) Válvulas manuales, c) Celdas de carga



a) Fuente: propia, agosto de 2014.

c)

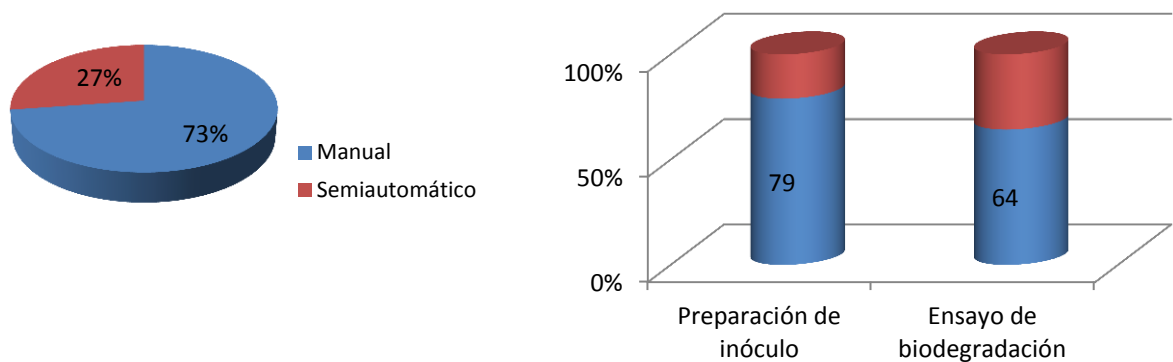
Verificación de funcionamiento de elementos externos

En la inspección visual no se encontraron fuentes de alimentación de energía ni equipos de cómputo u otros elementos.

2.4.2 Nivel de dificultad en la realización de operaciones y nivel de automatización del proceso BATACS

De acuerdo con la entrevista personal realizada al ingeniero agroindustrial Ricardo Camacho (Camacho R. , 2014) uno de los autores del protocolo del proceso BATACS (Camacho & Aley, 2012) y miembro del grupo de investigación CYTBIA, se encuentra que el protocolo es manual en un 73%, ver figura 22, las únicas operaciones semiautomáticas son pesado, trituración y determinación de materia seca o sólidos totales y determinación de sólidos fijos y volátiles, ver cuadro 14.

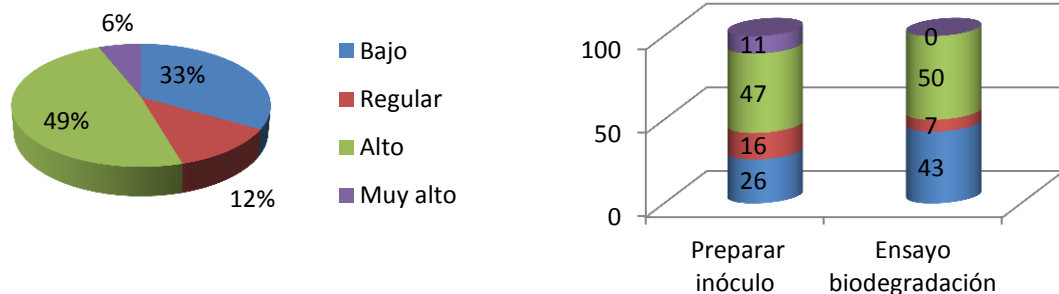
Figura 22. Nivel de automatización del proceso BATACS en general y por etapas



Fuente: propia, octubre de 2014.

El proceso es altamente dependiente del laboratorista, presenta un nivel de dificultad alto: del 49% y muy alto 6%, ver figura 23 y tabla 15; la etapa de preparación de inóculo presenta un nivel de dificultad alto 47% y muy alto 11%, mientras que la etapa de desarrollo de ensayo de biodegradación presenta un nivel de dificultad alto del 50%, ver figura 23 y cuadro 14.

Figura 23. Dificultad de las tareas realizadas por el laboratorista en el proceso BATACS, en general y por fases de las etapas de proceso



Fuente: propia, octubre de 2014.

Cuadro 14. Grado de dificultad en la realización de operaciones y nivel de automatización del proceso BATACS

Procedimiento de unidad	Fases de proceso	Nivel de automatización	Dificultad de la realización
Preparar Inoculo	Obtener FORSU.	Manual	Regular
	Pesar FORSU.	Semiautomática	Bajo
	Pesar muestra FORSU.	Semiautomática	Bajo
	Triturar muestra FORSU	Semiautomática	Bajo
	Determinar materia seca o sólidos totales y volátiles de FORSU	Manual	Alto
	Determinar carbono orgánico total	Manual	Alto
	Determinar contenido de nitrógeno	Manual	Regular
	Mezclar con rumen bobino y agua sin cloro	Manual	Regular
	Homogenizar mezcla	Manual	Alto
	Controlar pH	Manual	Alto
	Controlar temperatura de la mezcla degradada	Manual	Alto
	Registrar mediciones	Manual	Muy alto
	Controlar sólidos en el inóculo	Manual	Muy alto
	Medir pH	Manual	Bajo
	Pesar muestra de inóculo	Semiautomática	Bajo
	Diluir inóculo en agua destilada	Manual	Alto
	Determinar materia seca o sólidos totales y sólidos fijos y volátiles totales	Manual	Alto
	Determinar nitrógeno total	Manual	Alto
	Calcular y documentar	Manual	Alto

Continúa...

Cuadro 14. (Continuación)

Ensayo de biodegradación	Cortar materiales de prueba	Manual	Bajo
	Pesar materiales de prueba	Semiautomática	Bajo
	Triturar materiales de prueba	Semiautomática	Bajo
	Determinar materia seca o sólidos totales y sólidos fijos y volátiles totales	Manual	Alto
	Determinar cantidad de carbono orgánico oxidable total	Manual	Alto
	Determinar nitrógeno total	Manual	Regular
	Controlar pH en agua de acumuladores	Manual	Alto
	Pesar inóculo y cargar en bioreactores	Semiautomática	Bajo
	Cortar materiales de prueba	Semiautomática	Alto
	Pesar materiales de prueba		
	Triturar celulosa y parte del material de prueba	Semiautomática	Bajo
	Cortar LDPE y parte del material de prueba.	Manual	Bajo
	Colocar materiales de prueba en bioreactores	Manual	Bajo
	Mezclar en cada bioreactor por 3 minutos.	Manual	Bajo
	Controlar temperatura en la mezcla degradada a 52°C± 2°C	Manual	Alto
	Registrar mediciones de metano, temperatura, presión atmosférica	Manual	Alto
	Calcular y documentar	Manual	Alto

Fuente: propia, octubre de 2014.

2.4.3 Nivel de automatización de la célula de biodegradación anaerobia

Las plantas de biodegradación anaerobias comerciales consignadas en la sección 1.7 Ampts II (Bioprocesscontrol, 2011) y Umic Lab 3 on line (Umic-science.com, 2011), son plantas automatizadas con nivel 2¹, es decir que abordan los niveles de instrumentación, control y supervisión, mientras que la planta de estudio, presenta automatización nivel 0, enfocada sólo a instrumentación; presenta un rezago tecnológico con respecto a las comerciales pues éstas realizan el proceso de forma semiautomática, tienen supervisorio y gestionan resultados a través de intranet e internet.

¹ La Pirámide CIM (*Computer Integrated Manufacturing*) establece una jerarquía de comunicaciones, según los requerimientos, de cinco niveles,: 0) instrumentación 1) control 2) supervisión 3) Planta y 4) Factoría(Barragán, 2014).

2.4.4 Análisis de los modelos ISA S.88

El proceso BATACS de Camacho y Aley, es un proceso tipo batch, con celda uni producto (donde el producto es un servicio) y de ruta única. El ciclo del proceso es de 92 días aproximadamente, es manual en su mayor parte; se realiza un análisis de los tres modelos:

Modelo de proceso: presenta manufactura rígida; está configurado para obtener un sólo servicio y tiene ruta única; consta de dos etapas: preparación de inóculo y ensayo de biodegradación, la primera tiene cuatro operaciones y la segunda dos. El ciclo del proceso es de 92 días. En el proceso se encuentran mezcladas operaciones de transformación de materia con operaciones de calidad (caracterización de: FORSU, inóculo y materiales de prueba). Excluye actividades de limpieza y calibración de equipos.

Modelo de procedimiento: el protocolo de Camacho y Aley (Camacho & Aley, 2012), establece dos procedimientos de unidad para preparar inóculo y desarrollar ensayo, contiene 6 operaciones y 33 fases; en general el procedimiento presentan un alto nivel de dificultad en la realización de tareas del laboratorista porque la tecnología utilizada es 73% manual, requiere de intervención y monitoreo constante, ver figura 22, y los lazos de control de pH, y control de temperatura para preparar inóculo y realizar ensayo son cerrados por acción humana, por tanto es muy dispendioso.

Modelo de equipo: la célula de biodegradación anaerobia es tipo batch, uni producto con celda uni producto y de ruta única. La tecnología de los equipos es nivel 0 de automatización, los lazos de control de temperatura y pH son cerrados por el laboratorista, no presenta supervisión. Los equipos en su mayoría son de accionamiento manual; no cuentan con suministro de energía eléctrica continuo; la celda no incluye computador.

2.4.5 Captura de necesidades del cliente

Se realiza una entrevista (Villada & Camacho, 2014) al ingeniero Ricardo Camacho y al director del grupo de investigación CYTBIA de la Universidad del Cauca, Dr. Ing. Héctor Villada, para conocer las necesidades relacionadas con la célula de biodegradación anaerobia del laboratorio de Biotecnología, en el contexto del proyecto financiado por el Sistema General de Regalías “Investigación y desarrollo en empaques biodegradables” (PEDCTiCAUCA, 2012), donde proyectan establecer un Centro de Desarrollo Tecnológico que albergará un laboratorio acreditado de Biotecnología para prestar servicios a organizaciones externas, entre los cuales se encuentra el ensayo de BATACS, de modo que equipos y protocolos del ensayo evolucionan para atender las nuevas condiciones del laboratorio.

Se consignan las necesidades de acuerdo con los modelos de procedimiento, modelo físico, nivel de automatización de la célula y registro de información:

Necesidades para el modelo de procedimiento: es necesario establecer nuevos modelos acordes con los protocolos que establezca CYTBIA, tanto para prestar el servicio de ensayo de biodegradación anaerobia, como para las pruebas de caracterización. Se requiere sistematizar el registro, desarrollo de cálculos y reporte de resultados. Deben establecerse rutinas de limpieza de equipos para evitar contaminación del área de trabajo. Por otro lado, al establecerse un laboratorio acreditado, debe cumplir la norma colombiana NTC 17025 (NTC-ISO/IEC, 2005), en este sentido, se debe establecer procedimientos de calibración de los sensores.

Necesidades para el modelo físico: los equipos deben trabajar en los rangos adecuados para controlar, medir y monitorear las variables de proceso. Prefieren que las etapas se realicen de modo manual o semiautomático para que el laboratorista controle, realice ajustes e inspecciones y con equipos que garanticen precisión en los resultados de las pruebas. Las variables deben manipularse con instrumentos precisos, exactos y reproducibles, por tanto, serán adquiridos por transferencia tecnológica comercialmente.

Necesidades de automatización de la célula: se considera suficiente utilizar tecnología nivel 0 de automatización, para asegurar un control total de los parámetros del sistema y precisión en los resultados, aunque el proceso siga siendo dependiente del laboratorista, el presupuesto no permite adquirir equipos de otros niveles, aunque más adelante estiman llegar a nivel 2 (Villada & Camacho, 2014).

Necesidades de monitoreo y reportes: las variables controladas y monitoreadas deben ser registradas en la frecuencia establecida en los nuevos protocolos, estableciendo formatos para su ingreso manual. Se deben generar reportes en formato Excel y Word; la información se debe administrar desde un único computador ubicado en el laboratorio; se requiere acceder a reportes diarios y transferir resultados impresos o por correo electrónico. La información del ensayo a documentar debe incluir las siguientes tablas y figuras:

- Tabla de caracterización de FORSU empleada en la preparación de inóculo.
- Tabla de registro del proceso de adecuación del inóculo pH y metano.
- Tabla de porcentajes de metano en la preparación de inóculo.
- Figura de Logaritmos naturales de producción de gas respecto al tiempo de digestión anaerobia.
- Tabla de caracterización del Inóculo.
- Tabla de caracterización de los materiales de prueba.
- Tabla de pesos de muestra e inóculo cargados en los bioreactores.

- Tabla de cantidades y desviaciones estándar de la producción total de gas en V_t (esp).
- Figura de volúmenes de gas corregidos, en condiciones de temperatura y presión estándar generada por los materiales de prueba respecto al tiempo de degradación.
- Tabla de porcentajes de metano en el biogás y pH del sustrato transcurridos 30 días de digestión.
- Tabla de porcentajes de biodegradación de los tres materiales de prueba.
- Tabla de porcentajes de biodegradación y metano de la referencia positiva respecto a tiempo de degradación.
- Tabla de porcentajes de biodegradación y metano de la muestra de ensayo respecto al tiempo de degradación.
- Figura de Porcentajes de biodegradación de la referencia negativa respecto al tiempo de degradación.
- Requieren reportar facturas y cotizaciones.

2.4.6 Valoración de pertinencia del proceso BATACS acorde con las necesidades

Pertinencia del modelo de proceso: se sugiere hacer una división entre ensayo de biodegradación y pruebas de caracterización, para brindar flexibilidad al proceso y ofrecer pruebas de caracterización como servicios independientes, por tanto, deben modelarse por separado. Se requiere de un proceso semi continuo para preparar inóculo; multi producto para realizar el ensayo de biodegradación anaerobia y pruebas de caracterización, basados en normas estandarizadas.

Pertinencia del modelo de procedimiento: va a transformarse por cambios en los protocolos establecidos por el grupo CYTBIA para ofrecer sus servicios; en los procedimientos, se busca reducir la complejidad en lo posible.

Pertinencia del modelo físico: la célula requerida es multi producto, la unidad "preparación de inóculo" es semi continua, las otras unidades son batch. Se van a adquirir equipos para establecer una célula con nivel 0 de automatización; en lo posible, los lazos de control de temperatura y de control de pH, serán cerrados con instrumentación. De acuerdo a la cultura del laboratorista se requiere un escenario de automatización tipo stand alone, no consideran necesaria una interfaz de supervisión; se incluirá un computador para gestionar la información generada. Debe garantizarse el suministro de energía eléctrica continuo en las etapas de preparación de inóculo y ensayo de biodegradación, para esto deben incorporarse equipos de respaldo energético.

2.5 REQUERIMIENTOS DE LA NUEVA CÉLULA Y PROCESO BATACS

El proceso BATACS presentado antes, data de un trabajo de grado realizado por Camacho y Aley (Camacho & Aley, 2012), este proceso evoluciona para que el Laboratorio de Biotecnología de la Universidad del Cauca brinde el servicio del Ensayo BATACS a organizaciones externas, basado en la norma ISO 15985:2014 (ISO, 2014a) “*Plastics - Determination of the ultimate anaerobic biodegradation and disintegration under high-solids anaerobic-digestion conditions – Method by analysis of released biogás*” para una aplicación global, así mismo ofrecerá pruebas de caracterización basadas en normas estandarizadas establecidas por CYTBIA en sus protocolos. El nuevo protocolo establece un método estandarizado en ambientes anaerobios termófilos en altas concentraciones de sólidos (Camacho, 2014). Para el nuevo proceso y célula de biodegradación anaerobia, los clientes establecen cuatro tipos de requerimientos: generales, automatización y hardware:

2.5.1 Requerimientos generales

Se establecen requerimientos generales del proceso en cuanto a: nuevos protocolos, prestación de servicios, mejorar procedimientos, medición de variables, reutilizar equipos existentes en el laboratorio de Biotecnología y Reología y establecer estación de almacenamiento de reactivos y muestras de laboratorio, como se presenta a continuación:

RG1. En la nueva célula de proceso BATACS, se debe cambiar el procedimiento de Camacho y Aley (Camacho & Aley, 2012) basado en la norma ASTM D5511 - 02, por un nuevo protocolo del grupo CYTBIA (Camacho, 2014) de aplicación global de BATACS regido por la norma ISO 15985 – 2014.

RG2. Ofrecer servicios de ensayo y pruebas en forma independiente en la nueva célula de proceso BATACS: por un lado el ensayo de biodegradación anaerobia con sus pruebas de caracterización y de otro, pruebas de caracterización individual.

RG3. Mejorar los procedimientos derivados del protocolo anterior basado en la norma ASTM D5511 -02: un ensayo de biodegradación anaerobia rediseñado con otros procedimientos basados en la norma ISO 15985:2014, que involucra además de cuatro pruebas de caracterización, ver cuadro 15, siete nuevas pruebas: humedad, densidad, alcalinidad, ácidos grasos volátiles AGV, carbono orgánico disuelto, nitrógeno amoniacal y pH, ver cuadro 16, en la nueva célula de proceso BATACS, con protocolos estándar. Donde cinco pruebas: Carbono Orgánico Total COT, Carbono Orgánico Disuelto COD, nitrógeno total, nitrógeno amoniacal y Ácidos Grasos Volátiles AGV, se realizan en laboratorios externos.

Cuadro 15. Pruebas del protocolo BATACS basado en ISO 15985:2014: ensayo de biodegradación y tres pruebas de caracterización, especificando técnica y normas utilizadas

Prueba de caracterización	Técnica	Norma
Ensayo de Biodegradación Anaerobia en Alta Concentración de Sólidos	Biogasificación, bajo alto contenido de sólidos (más de 20% de sólidos totales)	ISO 15985 : 2014
Sólidos Totales	Secado a peso constante 105°C	APHA-AWWA-WEF 2540
Sólidos Volátiles	Incinerado a peso constante 550°C	APHA-AWWA-WEF 2540
Carbono orgánico total oxidable	Oxidación por combustión húmeda	Walkley y Black ISO 14235:1998
Nitrógeno Total	Kjeldahl	APHA-AWWA-WEF 4500-NorgC

Fuente: protocolo ensayo de biodegradación CYTBIA (Camacho, 2014).

Cuadro 16. Descripción de nuevas pruebas de caracterización de la célula de proceso BATACS, basado en ISO 15985:2014, especificando técnica y normas utilizadas

Prueba de caracterización	Técnica	Norma
Densidad	Peso volumen	APHA-AWWA-WEF 2710F
Humedad	Secado a peso constante 105°C	APHA-AWWA-WEF 2540
Alcalinidad	Titulación	APHA-AWWA-WEF 2320B
pH	Potenciómetro	APHA-AWWA-WEF 4500B
Nitrógeno amoniacal	Destilación – Titulación	APHA-AWWA-WEF 4500-NorgC
Ácidos grasos volátiles (AGV)	Cromatografía – Titulación	APHA-AWWA-WEF 5560B
Carbono orgánico disuelto (COD)	Oxidación por combustión húmeda	Walkley y Black ISO 14235:1998

Fuente: protocolo ensayo de biodegradación CYTBIA (Camacho, 2014).

RG4. Realizar la medición de variables: pH, temperatura, presión, volumen de gas; se especifica rangos de medición, unidades, lectura mínima y frecuencia de los parámetros, ver cuadros 17 y 18.

Cuadro 17. Descripción de rangos de medición de las variables en la etapa Preparación de Inóculo

Parámetro	Equipo	Rango de medición	Unidad	Lec mínima	Frecuencia
pH	pH metro	5 – 9	pH	0.1	Diaria
T° ambiente	Sensor	0 – 40	°C	0.1	Diaria
T° interna	Sensor	0 – 60	°C	0.1	Diaria
P atmosférica	Sensor	550 – 650	mmHg	1	Diaria
Volumen de biogás	Flujómetro	Indefinido	ml / h		Diaria
Metano	Sensor	0 – 100	%		Diaria
Dióxido de carbono	Sensor	0 – 100	%	1	Diaria
Hidrogeno	Sensor	0 – 25	%		Diaria

Fuente: propia, noviembre de 2014.

Cuadro 18. Descripción de rangos de medición de las variables en la etapa de Ensayo de Biodegradación

Parámetro	Técnica	Rango de medición	Unidad	Lectura mínima	Frecuencia
pH	Potenciómetro	5-9	pH	0.1	Inicio y final
Temperatura interna	Sensor comercial de temperatura	0 – 60	°C	0.1	Al hacer mediciones de gas
Temperatura ambiente	Termómetro de vidrio	0 –40	°C	0.1	Al hacer mediciones de gas
Presión atmosférica	Sensor comercial de presión	550 – 650	mmHg	1	Al hacer mediciones de gas
Volumen de Biogas	Flujómetro de gases comercial	Indefinido	ml / h		Diaria
Metano	Sensor de gases por infrarrojo comercial	0 – 100	%	0.1	Diaria
Dióxido de carbono	Sensor de gases por infrarrojo comercial	0 – 100	ml	0.1	Diaria

Fuente: Propia, noviembre de 2014.

RG5. Analizar la viabilidad de reutilizar equipos existentes que estén sub utilizados en los laboratorios de Biotecnología y Reología para la nueva célula de proceso BATACS (Villada & Camacho, 2014).

RG6. Proponer una estación de almacenamiento para reactivos, muestras de laboratorio y residuos, asociado a la nueva célula de proceso BATACS.

RG7. Proponer implementos y equipos de seguridad industrial, para la nueva célula de proceso BATACS.

RG8. Proponer almacenamiento para residuos orgánicos y químicos de la nueva célula de proceso BATACS.

2.5.2 Requerimientos de automatización

Conforme con los requerimientos anteriores, se establecen requerimientos de automatización asociados a la nueva célula de proceso BATACS para modelar el proceso basado en la norma ISA S.88 (modelo de proceso, físico, procedimental y de recetas), realizar la cadena de valor y hacer uso de uso de normas técnicas de automatización para realizar PFD y PI&D.

RA1. Modelar el proceso BATACS, basándose en la norma ISA S.88 (ISA, 2010).

RA2. Diseñar un modelo de proceso BATACS, que cumpla el estándar ISO 15895:2014, que garantice un ambiente ideal para el crecimiento microbiano y que disminuya la complejidad de las tareas del laboratorista.

RA3. Modelar 6 pruebas de caracterización: densidad, humedad, sólidos totales, sólidos volátiles, alcalinidad y pH, establecidas por el grupo de investigación CYTBIA. **Nota:** las pruebas carbono orgánico total COT, carbono orgánico disuelto COD, ácidos grasos volátiles AGV, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total se realizarán en laboratorio externo, por tanto no se modelan.

RA4. Proponer un modelo físico para la nueva célula de proceso BATACS, que permita realizar el ensayo y las pruebas de caracterización en los rangos de operación deseados.

RA5. Diseñar un modelo de control de procedimiento basado en ISA S.88 que ejecutado al modelo físico genere el proceso BATACS y las pruebas de caracterización de forma efectiva.

RA6. Modelar la receta maestra y de control para el proceso BATACS y pruebas de caracterización.

RA7. Diseñar la cadena de valor del proceso BATACS.

RA8. Hacer uso de normas técnicas de automatización para realizar PFDs y PI&D para el proyecto.

RA9. Proponer un escenario de automatización para la nueva célula de proceso BATACS.

2.5.3 Requerimientos hardware

Seleccionar y proponer equipos e instrumentos que permitan construir una nueva célula del proceso BATACS, donde se establezca unidades con módulos equipos y de control para llevar a cabo el proceso de acuerdo a las especificaciones planteadas a continuación:

RH1. Seleccionar y proponer equipos de preparación de inóculo:

RH11. Equipos de acondicionamiento de materia prima FORSU: equipos para almacenar (20 Kg), triturar (3 mm) y secar a temperatura ambiente (malla) y en horno (0 - 300°C) con temporizador.

RH12. Equipos de preparación de inóculo: módulo equipo de biodigestor (20l) (0 - 70 rpm), módulo de equipo de control de temperatura de líquidos (0 - 200°C ± 0.1) y pH metro de (0 - 14), módulo equipo de medición de temperatura ambiente (0 - 200°C ± 0.1) medición de temperatura interna (0 - 200°C ± 0.1), medición de metano (0-100 %), medición CO₂ (0-100 %) y equipo de acumulación de gases (9 L).

RH13. Visores de instrumentos (display digital) para variables: pH, temperatura ambiente, temperatura interna, presión atmosférica, flujo de gas, volumen de biogás metano, dióxido de carbono e hidrógeno.

RH2. Seleccionar y proponer equipos para el Ensayo de Biodegradación

Un módulo equipo de acumulación de gases (9 acumuladores), un módulo de equipo de calentamiento (9 bioreactores), un módulo de control de temperatura (0-200°C ± 0.1°C), un módulo de cuantificación de gases (0-100 %), junto con equipos para post fermentación (0 - 100°C ± 0.1) que permitan estructurar un módulo equipo de biodegradación anaerobia (hasta 9 bioreactores).

RH3. Seleccionar y proponer Equipos para realizar pruebas de caracterización

RH3.1. Equipos para determinar densidad: balanza analítica (0 - 220 gr ± 0.0001 gr) y probeta (100 ml).

RH3.2. Equipos para determinar humedad: balanza de humedad (1 - 5 gr ± 0.0001 gr), (0-100 ± 0.1°C) y espátula pequeña.

RH3.3. Equipos para determinar sólidos totales y sólidos volátiles: mufla (0 - 1100 °C ± 0.0001°C), desecador mediano (2.4l), beaker (50 ml), varilla de vidrio y espátula, balanza analítica (0 - 220 gr ± 0.0001 gr), crisoles de porcelana (15ml), vidrio reloj (diámetro 118,5 cm), horno de secado pequeño (0 - 300°C) con temporizador, mechero de gas Busen (0 - 1400 °C).

RH3.4. Equipos para determinar alcalinidad: desecador mediano (2.4l), balanza analítica (0 - 220 gr ± 0.0001 gr), Erlenmeyer (250ml), botellas de vidrio (250ml), papel vinipel, balón aforado (1000ml), pipetas aforadas (10ml), beaker (100 y 50 ml), agitador magnético (0-1600 rpm), pH metro (0-14), horno de secado pequeño (0 - 300°C).

RH3.5. Equipos para determinar nitrógeno amoniacal, nitrógeno total: vidrio reloj (diámetro 118,5 cm), beaker (20, 100, 500 y 1000 ml), horno de secado pequeño (0 - 300°C), desecador mediano (2.4l), pipeta aforada (10 ml) Erlenmeyer (250 ml), balón aforado (1000 ml), pH metro, agitador magnético (0-1600 rpm).

RH3.6. Equipos para determinar pH: pH metro (0-14), pipeta (10 ml), beaker (20 ml), agitador magnético (0-1600 rpm).

RH3.7. Equipos de muestreo: pipetas volumétricas (10ml), beaker (150ml), varilla de vidrio (30 cm).

RH3.7. Equipos para preparación de muestras de inóculo (para caracterización de nitrógeno orgánico total, nitrógeno amoniacal, alcalinidad, acidez total volumétrica AGV, carbono orgánico disuelto COD y carbono orgánico total COT): embudo Buchner (87ml) (diámetro 55mm), Erlenmeyer (100ml) manguera (5 mm) pipeta volumétrica (100ml), beaker (100ml).

RH3.8. Visores de instrumentos de variables: pH, temperatura ambiente, temperatura interna, presión atmosférica, flujo de gas, volumen de biogás metano, dióxido de carbono e hidrógeno.

RH4. Seleccionar y proponer equipos para monitoreo y reportes.

De acuerdo a las características de los equipos previamente recomendados, solo es posible realizar monitoreo de la etapa Ensayo BATACS, para ello se recomienda hacer uso de un equipo de cómputo conectado por medio de un módulo de interfaz al equipo de incubación de biodegradación. Sin embargo debido a la importancia que tiene el registro de las diferentes variables en las tres etapas y pruebas del ensayo BATACS se propone un sistema de registro manual.

RH5. Seleccionar y proponer equipos de respaldo de energía.

Equipos de respaldo de energía: planta eléctrica y UPS.

3 INGENIERIA BASICA

En este capítulo se desarrolla la ingeniería básica de la propuesta de automatización del proceso BATACS y la nueva célula de biodegradación anaerobia así: garantizando el cumplimiento de los requerimientos de los clientes expresados en la sección 2.5; desarrollando modelos basados en ISA S.88: proceso, físico, de control procedimental y de recetas, para el ensayo de biodegradación y 6 pruebas de caracterización, así como la cadena de valor; finalmente se realizan diagramas de flujo de proceso y de instrumentación y tuberías.

3.1 PROPUESTA DE AUTOMATIZACION BATACS

Se plantea una propuesta para dar cumplimiento a los requerimientos generales, de automatización y hardware, expresados, ver sección 2.5.

3.1.1 Cumplimiento de requerimientos de la nueva célula y proceso

Cumplimiento de requerimientos generales

Para dar cumplimiento a los requerimientos RG1, RG2, RG3 y RG4 se plantea el nuevo proceso BATACS basado en los protocolos diseñados por el grupo CYTBIA, “Protocolos de Biodegradación Anaerobia en Alta Concentración de Sólidos del Laboratorio de Biotecnología de la Universidad del Cauca” (Camacho R. , 2014), ver Anexo 4.1 y su modelamiento, ver sección 3.3. En cuanto al requerimiento RG5 se revisan equipos de la célula de hidrólisis del Laboratorio de Biotecnología para ser utilizados en la etapa de “preparación de inóculo”, ver Anexo 4.12. Para dar cumplimiento al requisito RG6, sobre la estación de almacenamiento de materiales y residuos, ver Anexo 4.4 “Estación de almacenamiento”. Para dar cumplimiento al requerimiento RG7, de acuerdo con la información de los protocolos del grupo CYTBIA (Camacho R. , 2014) se proponen implementos y equipos de seguridad industrial, para la nueva célula de proceso BATACS, ver Anexos 4.3 y 4.6. Para dar cumplimiento al requerimiento RG8 se establece un procedimiento de manejo de los residuos, ver Anexo 4.2.

Cumplimiento de requerimientos de automatización

Para dar cumplimiento a RA1, RA2, RA3, RA4, RA5 y RA6, se realizan los modelos: de proceso, físico procedimental y recetas; para el requisito RA7, se diseña la cadena de valor; para RA9 se define como escenario de automatización Stand Alone; para RA8 se realizan planos de automatización 13 PFD y 7 PI&D, ver anexo 4.9.

Cumplimiento de requerimientos hardware

Para dar cumplimiento a los requerimientos hardware, se proponen y seleccionan equipos, satisfaciendo RG5, reutilizando equipos de los laboratorios de Biotecnología y Reología de la Universidad del Cauca, o adquiriéndolos comercialmente. Se seleccionan equipos: a) Existentes en buen estado, con capacidades adecuadas para ser reutilizados. b) Se compran tomando en cuenta los criterios: precisión, robustez, tiempo de vida, garantía, fabricante y precio.

Equipos para acondicionar materia prima

Dando solución al requerimiento RH11, se proponen y seleccionan equipos con el grupo CYTBIA que serán adquiridos comercialmente; acondicionar materia prima, se eligen tanques de almacenamiento de polietileno con tapa, sin refrigeración, dando cumplimiento a RG5 se re utilizan equipos de pesado y secado del laboratorio de Biotecnología y Planta Piloto, ver cuadros 19 y 20.

Cuadro 19. Equipos para acondicionar materia prima

Equipo	Capacidad	Función	Observaciones
Bidón	16Kg	Almacenar cáscara de vegetales	Tapa hermética
Bidón	10Kg	Almacenar frutas	Tapa hermética
Bidón	10Kg	Almacenar cáscara de carbohidratos	Tapa hermética
Bidón	9Kg	Almacenar cáscara de proteínas	Tapa hermética
Bidón	16Kg	Almacenar cáscara de inóculo líquido	Tapa hermética
Bidón	45 Kg	Para almacenar FORSU	Tapa hermética

Fuente: propia, diciembre 2014.

Cuadro 20. Equipos de triturado, secado y pesado

Equipo	Referencia	Descripción	Estado	Función
Cuchillo	Genérico	Estándar	Comprar	Cortar
Molino de cuchillas	Kienmatica polymix PX-MFC 90 D	Diámetro tamices: 0.2 - 6.0 mm	Comprar	Molienda FORSU
Montaje de secado	Diseño Malla tipo galpón	Malla: 0.1 – 0.5 cm	Comprar	Secado inicial FORSU
Horno de secado grande	Binder FD 240	0-300 °C	Disponible Biotecnología	Secado FORSU
Balanza de precisión 12Kg	Kern Gab-12K	12 Kg ± 0.001 Kg	Disponible	Pesado de FORSU

Fuente: propia, diciembre de 2014.

Equipos de la unidad de preparación de inóculo

Se seleccionan y proponen equipos, para los módulos equipos como se muestra a continuación:

Módulo equipo de biodigestión

Dando cumplimiento a los requerimientos RH12 y RG5, se realiza un estudio de reutilización de equipos a la célula de hidrólisis del Laboratorio de Biotecnología, ver Anexo 4.1.10, y los demás serán adquiridos comercialmente, ver cuadro 21.

Cuadro 21. Equipos de biodigestión seleccionados

Equipo	Referencia	Capacidad	Estado
Biodigestor anaerobio con chaqueta	Centricol Genérico	20l, sin agitación con manómetro	Disponible
Manómetro del biodigestor	Centricol Genérico	0-30 psi	Disponible
Sensor pT-100	Centricol Genérico	Precisión 0.1° C	Disponible
Transmisor de temperatura	Siemens Siemens: D-76181	4 -20 mA	Disponible
Indicador de temperatura	TC Direct Indicador de temperatura	PT100: ±(0.3% de la lectura + 1 dígito) ó ±0.8°C (1.6°F)	Comprar
Sistema de agitación Motor con variador y juego de aspas	Optimización de procesos y tecnología OPT Agitador vertical de velocidad reducida VR3	150m ³ /l, 40 – 335 rpm	Comprar
Chiller	LAUDA LAUDA ALPHA RA8	Control de temperatura: -25 ° C 100 ° C ± 0,05 ° C Volumen: 7.5 L Flujo: 15 L / min	Disponible
Sensor indicador de pH	pH metro SCHOT Instruments Lab 850	-2.000-19.999 ± 0,005 Pt 1000 Buffer: 4,01 + 6,87 Sin interfaces	Comprar
Sistema de acumulación de gases	Ritter Gas Sampling Bag GSB-P/ 10, Pulse Pump III™ Modelo Lab 850	40l	Comprar
Cromatógrafo de gases	Agilent Technologies Agilent 7890A	Rango dinámico lineal de 10 ⁷ Hasta cuatro señales Automatizado con HMI de computador	Comprar
Barómetro	PCE Instruments DB 3	0...+2000 mbares, Precisión: ± 0,5 %	Comprar
Termómetro de vidrio	Brand VWR Brand	0 -100°C ± 1 °C	Disponible

Fuente: propia, diciembre de 2014.

Equipos de visualización de variables para biodigestión

Dando cumplimiento a los requerimientos RH12 y RH13, se seleccionan equipos de medición de temperatura, presión, metano y CO₂, para identificar volumen y composición de gas, ver cuadro 22.

Cuadro 22. Equipos de medición de temperatura, pH y gases (metano y dióxido de carbono)

Equipo	Referencia	Marca	Rango	Función
Visor de temperatura	Indicador de temperatura	TC Direct	PT100: $\pm(0.3\%$ de la lectura + 1 dígito) ó $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ (1.6°F)	Permite la visualización de temperatura interna del biodigestor
Manómetro del biodigestor	Genérico	Centricol	0-30 psi	Permite visualizar presión interna del biodigestor
Indicador de pH	Modelo Lab 850	pH metro SCHOT Instruments	-2.000-19.999 \pm 0,005	Permite visualizar pH del inóculo o mezcla degradada
HMI del cromatógrafo de gases (a futuro)	Agilent 7890A	Agilent	Lineal de 107 Hasta cuatro señales	Permite visualizar la cantidad de CH ₄ , CO ₂ del gas producido
Flujómetro	Ritter DrumType TG 0.5	Ritter	Flujo: 1- 60 l/h	Permite visualizar flujo de gas
Termómetro de mercurio	VWR Brand	Brand	0 -100°C \pm 1 °C	Permite visualizar temperatura ambiente
Barómetro	DB 3	PCE Instruments	0...+2000 mbares, Precisión: \pm 0,5 %	Permite visualizar presión atmosférica

Fuente: propia, diciembre de 2014.

Equipos para el ensayo de biodegradación

Los equipos de la primera unidad de biodegradación no pueden ser reutilizados para satisfacer RG5, por tanto se selecciona un equipo teniendo en cuenta criterios establecidos, ver cuadro 23.

Cuadro 23. Equipos para ensayo de biodegradación de la nueva célula de proceso

Equipo	Referencia	Marca	Rango	Estado	Can	Función
Recipiente pos fermentación		Genérico	10l Hermético	Comprar	1	Contener inóculo en condiciones anaerobias
Balanza analítica	Kern 220K	Precisa	0 – 220 g \pm 0.0001 g	Disponible	1	Pesar muestras de ensayo
Horno incubadora con salida superior	Binder FD115	Ritter	(0-300)°C +/- 0.1 °C	Comprar	1	Calentar bioreactores
Bioreactores	Laboratory glass bottle	Ritter	9l Hermético Boca de 1 puerto	Comprar	9	Depositar material degradad con inóculo

Continúa...

Cuadro 23. (Continuación)

Equipo	Referencia	Marca	Rango	Estado	Can	Función
Flujómetro milligas counter	MilliGascounter MGC-1 V3.2 PMMA	Ritter	Flujo: 1 ml/h to 1 ltr/h $\pm 0.3\%$	Comprar	9	Medir flujo de gas producido
Balanza de precisión 12 Kg	Kerno 12	Kern	12 Kg ± 0.0001	Disponible	1	Pesar inoculo
Software de adquisición de datos	RIGAMO V.3.1	Ritter	Para un solo computador			
Tijera				Comprar	1	Corte Materiales de muestra
Molino analítico	PX-MFC 90 D	Kienmatica polymix	Diámetro tamices: 0.2 - 6.0 mm	Triturar materiales de prueba	1	Molienda de materiales de prueba
Tamices	Genérica	Genérica	Capacidad: 60 y 120	Tamizado de materiales de prueba	1	Tamizado materiales de prueba
Barómetro	DB 3	PCE Instruments	0...+2000 mbar Precisión: $\pm 0,5\%$	Medir presión atmosférica	1	Determinar presión atmosférica
Termómetro de mercurio	VWR Brand	Brand	0 -100°C $\pm 1^\circ\text{C}$		1	Medir temperatura atmosférica

Fuente: propia, diciembre de 2014.

Equipos para realizar pruebas de caracterización

Para dar cumplimiento al requerimiento RH3 y RG5, se seleccionan equipos que existen en el Laboratorio de Biotecnología para establecer módulos equipo para realizar las pruebas: densidad, humedad, sólidos totales, sólidos volátiles, alcalinidad y pH, ver cuadro 24.

Cuadro 24. Módulos equipo existentes en el Laboratorio de Biotecnología para realizar pruebas de caracterización

Prueba	Equipo	Referencia	Observaciones
Densidad	Balanza analítica	Precisa XB 220 ^a XB 220A	Capacidad: 220 gr Resolución: 0.1mg Repeteabilidad: 0.1 mg
	Probeta	Genérico	100ml

Continúa...

Cuadro 24. (Continuación)

Prueba	Equipo	Referencia	Observaciones
Humedad, sólidos totales y sólidos fijos	Medidor de humedad precisa	Precisa 60X	30-230 °C ± 0.01%
	Mufla	1400 Furnace	30-300 °C ± 0.9°C
	Desecador mediano	Nalgene	2.4l
	Varilla de vidrio	Genérico	Pequeña
	Espátula	Genérico	Pequeña
	Balanza analítica	Precisa XB 220 ^a XB 220A	220 gr
	Crisoles de porcelana	Genérico	15 mi
	Vidrio reloj	Genérico	118,5 cm
	Horno de secado pequeño	Binder FD115	0-300°C
	Mechero de gas	Busen	Con llave de seguridad
Alcalinidad	Balanza analítica	Precisa XB 220 ^a XB 220A	220 gr
	Desecador mediano	Nalgene	2.4l
	Erlenmeyer	Genérico	250ml
	Balón aforado	Genérico	1000ml
	Pipetas aforadas	Genérico	10ml
	Beakers	Genérico	100ml 50 ml
	Plancha de agitación	MS 7-H550-S	0 - 550 ± 1°C 0 - 1600 rpm
	pHmetro	SCHOT Instruments Modelo Lab 850	0-14 pH Pt 1000 Buffer: 4,01 + 6,87 Sin interfaces
	Horno de secado pequeño	Binder FD115	0-300°C
	Vidrio reloj	Genérico	118,5 cm
	Beaker	Genérico	20, 100, 500 y 1000 ml
	Horno de secado pequeño	Binder FD115	0-300°C
	Desecador mediano	Nalgene	2.4l
	Pipeta aforada	Genérico	10 ml
	Erlenmeyer	Genérico	250 ml
	Balón aforado	Genérico	1000 ml
	pHmetro	SCHOT Instruments Modelo Lab 850	0-14 pH Pt 1000 Buffer: 4,01 + 6,87 Sin interfaces
	Plancha de agitación	MS 7-H550-S	0 - 550 ± 1°C 0 - 1600 rpm
pH	pHmetro	SCHOT Instruments Modelo Lab 850	0-14 pH Pt 1000 Buffer: 4,01 + 6,87 Sin interfaces
	Beaker	Genérico	20 ml

Fuente propia, diciembre de 2014.

Las pruebas: carbono orgánico total (COT), carbono orgánico disuelto (COD), ácidos grasos volátiles (AGV), nitrógeno total, nitrógeno amoniacal, se realizan en laboratorios externos, por tanto no se establece módulos equipo para ellas.

Equipo para reportes y registro

Para satisfacer el requerimiento RH4, se comprará un computador de escritorio DELL, impresora EPSON multifuncional y una tablet, ver cuadro 25.

Cuadro 25. Equipos de respaldo de energía eléctrica

Equipo	Referencia	Descripción	Estado
Computador de escritorio	DELL Inspiron Small Desktop 3647	Procesador Intel® Celeron® de doble núcleo Memoria de 4 GB Disco duro de 500 GB Windows 8.1	Comprar
Impresora	EPSON Impresora Multifuncional Epson L210	Capacidad 4.000 páginas en negro y 6.500 páginas a color 27 páginas por minuto en negro	Comprar
Tablet	Genérica	Genérica	Comprar

Fuente: propia, diciembre de 2014.

Equipos de respaldo de energía

Para satisfacer el requerimiento RH6, se propone una planta de emergencia y una UPS, ver cuadro 26.

Cuadro 26. Equipos de respaldo de energía eléctrica

Equipo	Referencia	Función	Observaciones
Planta de emergencia	EF300ISEB Yamaha	Proporcionar energía continua fiable	Potencia suministrada: 3000W Salida: 120VAC/12VCD
UPS	Telco 2700W DELL	Protección eléctrica	2700W Salida 5 minutos respaldo energético

Fuente: propia, diciembre de 2014.

3.2 NUEVOS MODELOS DE PROCESO

Se desarrollan los nuevos modelos de proceso para el ensayo de biodegradación anaerobio y seis pruebas de caracterización que se llevarán a cabo en la nueva célula de proceso de biodegradación anaerobia. El Anexo 4 describe el proceso de ensayo BATACS que se obtiene al adecuar los protocolos del grupo CYTBIA: "Acondicionamiento y caracterización de los materiales de prueba e inóculo metanogénico", "Realización de pruebas de biodegradación anaerobia y preparación de inóculo metanogénico" (Camacho R. , 2014).

Se desarrollan modelos basados en ISA S.88: de control procedimental, a partir de los protocolos, organizando la información de cada etapa “Preparación de FORSU”, “Preparación de Inóculo y “Ensayo de Biodegradación”, ver Anexo 4.1. El modelo físico corresponde a equipos seleccionados, ver sección 3.3.1, el de recetas al combinar toda la información. Las “Pruebas de caracterización” son once, se toman del protocolo CYTBIA (Camacho R. , 2014), ver Anexo 4.1.3; se detallan las seis que se realizarán en el laboratorio y se modelan por separado.

3.2.1 Modelos del ensayo de Biodegradación Anaerobia

El modelo de proceso del ensayo BATACS consta de tres etapas “Preparación de FORSU”, “Preparación de inóculo” y “Ensayo de biodegradación” la primera tiene 2 operaciones y 11 acciones de proceso, la segunda tiene 6 operaciones y 23 acciones de proceso, la tercera tiene 6 operaciones y 44 acciones de proceso, para un total de 78 acciones de proceso, ver cuadro 27, las pruebas de caracterización se modelan por separado.

Cuadro 27. Modelo de Proceso del Proceso BATACS nuevo

PROCESO BATACS DE LA NUEVA CÉLULA DE PROCESO		
ETAPAS	OPERACIONES	ACCIONES DEL PROCESO
Preparación FORSU	Preparación de FORSU	Recolección de FORSU
		Trituración manual
		Mezcla manual
		Secado a temperatura ambiente
		Secado en horno
		Trituración en molino
	Caracterización de FORSU	Agitado manual
		Pesar muestra de FORSU
		Preparación de materiales para caracterización
		Determinación de carbono orgánico total
Preparación de Inoculo	Preparación de inóculo	Determinación de contenido de nitrógeno
		Pesar muestra de FORSU
		Mezclado de FORSU con inóculo líquido
		Homogenizado de mezcla
		Control de pH
		Control de temperatura de la mezcla degradada
	Caracterización de inóculo	Registro de mediciones
		Extracción de muestra de inóculo
		Preparación de muestra de inóculo
		Medición de pH
		Determinación de densidad
		Determinación de humedad
		Determinación de sólidos volátiles
		Determinación de sólidos totales
		Determinación de COT
		Determinación de COD
		Determinación de alcalinidad
		Determinación de AGV
		Determinación de nitrógeno amoniacal
		Determinación de nitrógeno total
		Determinación de pH
		Registro de información

Continúa...

Cuadro 27. (Continuación)

PROCESO BATACS DE LA NUEVA CÉLULA DE PROCESO		
ETAPAS	OPERACIONES	ACCIONES DEL PROCESO
Ensayo de biodegradación	Preparación de materiales de prueba	Enfriamiento de material de prueba
		Corte de material enfriado
		Trituración de material enfriado y cortado
		Tamizado de material enfriado, cortado y triturado
		Cuantificación de réplicas de materiales de prueba
	Caracterización de materiales de prueba	Preparación de muestras para caracterización
		Determinación de sólidos volátiles
		Determinación de sólidos totales
		Determinación de carbono orgánico total
	Post fermentación de inóculo	Homogenización de inóculo
		Post fermentación de inóculo
		Mezclado de inóculo post fermentado
	Caracterización de inóculo pos fermentado	Realización de muestreo
		Preparación de muestra para caracterización
		Medición de pH
		Determinación de densidad
		Determinación de humedad
		Determinación de sólidos volátiles
		Determinación de sólidos totales
		Determinación de COT
		Determinación de COD
		Determinación de alcalinidad
		Determinación de AGV
		Determinación de nitrógeno amoniacal
		Determinación de nitrógeno total
		Registro de información
	Ensayo de biodegradación de materiales de prueba	Mezcla de inóculo pos fermentado y materiales de prueba
		Homogenizado de inóculo para blanco
		Biodegradación de muestras con temperatura controlada
		Reposo del equipo
		Cálculos y documentación
	Caracterización de mezcla degradada	Realización de muestreo
		Preparación de mezcla degradada para caracterización
Medición de pH		
Determinación de densidad		
Determinación de humedad		
Determinación de sólidos volátiles		
Determinación de sólidos totales		
Determinación de COT		
Determinación de COD		
Determinación de alcalinidad		
Determinación de AGV		
Determinación de nitrógeno amoniacal		
Determinación de nitrógeno total		
Cálculos y documentación		

Fuente: propia, diciembre de 2014.

El modelo físico de la célula consta de cuatro unidades: preparación de FORSU, preparación de inóculo anaerobio, ensayo de biodegradación y caracterización, ver cuadro 28.

Cuadro 28. Modelo físico del Proceso BATACS

Célula de proceso de Biodegradación Anaerobia		
Unidades	Módulo Equipo	Módulo de Control
Preparación de FORSU	Equipos de almacenamiento: bidones plásticos Equipo de pesado: balanza Kern Gab-12K0.1N Equipo de corte: cuchillo Equipo secado: montaje de secado con malla plástica 0,1 cm a 0,5cm Equipo secado : horno Binder FD240	Sensor con indicador: balanza Kern Gab-12K0.1N Sensor: sensor horno Binder Controlador: controlador horno Binder Actuador: actuador horno Binder Sensor: humano Controlador: humano Actuador: molino de cuchillas
	Equipo de trituración: Molino Kienmatica polymix PX-MFC 90 D	
Preparación de Inóculo	Equipo de mezclado: guantes metálicos	
	Equipo de biodigestión: biodigestor anaerobio Centricol 40l con tapa y manómetro	Sensor indicador: manómetro
	Sistema de agitación: agitador vertical de velocidad reducida VR3	Sensor: humano Controlador: humano Actuador: agitador vertical
	Equipo de calentamiento: Chiller LAUDA ALPHA RA8	Sensor: Sensor Chiller
		Controlador: termostato Chiller
		Actuador: bomba Chiller LAUDA RA8
	Equipo de visualización temperatura:	Sensor: Pt 100
		Transmisor: Siemens: D-76181
		Indicador: TC Direct
	Equipo de acumulación de gas: Gas Sampling Bag GSB-P/ 10 con bomba de succión	Actuador: bomba de succión de la bolsa
Equipo de control de pH	Sensor con indicador: pH metro SCHOT Intruments, modelo Lab 850	
	Controlador: humano Actuador: humano	
Equipo de medición: sensor: cromatógrafo de gases Agilent 7890 ^a	Sensor: cromatógrafo de gases Agilent 7890 ^a	
Barómetro: DB 3	Sensor con indicador: barómetro DB3	
Termómetro de vidrio VWR Brand	Sensor con indicador: VWR Brand	
Biodegradación	Equipo de pos fermentación: pos fermentador	
	Equipo de pesado: balanza Kern Gab-12K0.1N	Sensor con indicador: balanza 12K0.1N
	Equipo de preparación de materiales de prueba Equipo de corte: tijera Equipo de enfriamiento: nitrógeno líquido Equipo de trituración: molino analítico Equipo de tamizado: tamices malla 60 y 120	Sensor: humano Controlador: molino analítico Actuador: molino analítico
	Equipos para ensayo de biodegradación Equipo de calentamiento: horno Binder FD115 Equipo analizador de gases: MilliGascounter MGC-1 V3.2 PMMA Cromatógrafo de gases	Sensor: sensor horno Binder FD115 Controlador: controlador horno Binder FD115 Actuador: resistencia horno Binder FD115
	Equipo de biodegradación: 9 bioreactores Laboratory glass bottle Equipo de medición de temperatura	Sensor: 9 MilliGascounter MGC-1 V3.2 PMMA Sensor: Cromatógrafo de gases Agilent 7890A
	Barómetro: DB 3	Sensor: termómetro de vidrio
	Equipo de pesado: balanza Kern Gab-12K0.1N	Sensor con indicador: barómetro DB3
	Módulo equipo de registro y cálculo computador DELL Inspiron 3647, impresora y Tablet	Sensor con indicador: balanza Kern Gab-12K0.1N

Fuente: propia, diciembre 2014.

La unidad de caracterización es el lugar donde se llevan a cabo las pruebas, está compuesta por 6 módulos equipo, uno por cada prueba y dos más para extracción y preparación de muestra, ver cuadro 29.

Cuadro 29. Modelo físico nuevo de la unidad de caracterización

Unidad de caracterización		
Unidad	Módulo Equipo	Módulo de Control
Caracterización	Equipo extracción de muestra Sonda de muestreo Beaker Varilla de vidrio Plancha de agitación magnética MS7-H550 S Equipo de pesado: balanza analítica ALJ 220-4NM	Sensor indicador: balanza analítica
	Equipo de preparación muestra para caracterización Pipeta, Beaker, Embudo de decantación Plancha de agitación magnética MS7-H550 S	
	Equipo para la determinación de densidad Balanza analítica: ALJ 220-4NM Probeta de 100ml	Sensor indicador: balanza analítica
	Equipo para la determinación de humedad, sólidos totales y sólidos fijos y volátiles Medidor de humedad Precisa 60X	Sensor: medidor de humedad Controlador: humano Actuador: humano
	Mufla FB 1400	Sensor: sensor Mufla Controlador: controlador Mufla Actuador: resistencia Mufla
	Higrómetro MT-241 Varilla de vidrio Balanza analítica ALJ 220-4NM Crisoles y vidrio reloj	Sensor indicador: higrómetro
	Horno de secado: Binder FD 240	Sensor: sensor horno Binder Controlador: controlador horno Binder Actuador: resistencia horno Binder
	Desecador plástico Nalgenen	
	Equipo para la determinación de alcalinidad Balanza analítica ALJ 220-4NM Desecador plástico Nalgene Erlenmeyer Balón aforado Pipetas aforadas Beakers Plancha de Agitación MS 7-H550-S pH metro Lab 850 Schot Horno Binder FD 240	Sensor indicador: balanza analítica Sensor indicador de pH Sensor: sensor horno Binder Controlador: controlador horno Binder Actuador: resistencia horno Binder
	Equipo para determinación de pH pH metro Lab 850 plancha de agitación magnética MS 7-H550-S	

Fuente: Propia, diciembre de 2014

Se realizan los modelos de control procedimental para el ensayo BATACS, ver cuadro 30, está compuesto por tres procedimientos de unidad” el primero tiene 2 operaciones y 11 fases, el segundo tiene 6 operaciones y 23 fases, el tercero tiene 6 operaciones y 44 fases, para un total de 78 fases de proceso, ver cuadro 30.

Cuadro 30. Modelo de control de procedimiento del proceso BATACS nuevo

PROCESO BATACS DE LA NUEVA CÉLULA DE PROCESO		
Procedimiento de unidad	Operaciones de unidad	Fases de proceso
P R E P A R A C I Ó N F O R S U	Preparar FORSU	Recolectar FORSU
		Triturar manualmente
		Mezclar manualmente
		Secar a temperatura ambiente
		Secar en horno
		Triturar en molino
		Agitar manualmente
	Caracterizar FORSU	Pesar muestra de FORSU
		Preparar materiales para caracterización
		Determinar carbono orgánico total
		Determinar contenido de nitrógeno
P r e p a r a c i ó n d e I n ó c u l o	Preparar inóculo	Mezclar FORSU con inóculo líquido
		Homogenizar mezcla
		Controlar pH
		Controlar temperatura de la mezcla degradada
		Registrar mediciones
	Caracterizar inóculo	Realizar muestreo de inóculo
		Preparar muestra de inóculo
		Medir pH
		Determinar densidad
		Determinar humedad
		Determinar sólidos volátiles
		Determinar sólidos totales
		Determinar COT
		Determinar COD
		Determinar alcalinidad
		Determinar AGV
		Determinar nitrógeno amoniacal
		Determinar nitrógeno total
		Determinar pH
		Calcular y documentar

Continúa...

Cuadro 30. (Continuación)

Ensayo de biodegradación	Preparar materiales de prueba	Enfriar material de prueba
		Cortar material enfriado
		Triturar material enfriado y cortado
		Tamizar material enfriado, cortado y triturado
	Caracterizar materiales de prueba	Preparar muestras para caracterización
		Determinar sólidos volátiles
		Determinar sólidos totales
		Determinar COT
	Post fermentar inóculo	Homogenizar inóculo
		Post fermentar inóculo
		Mezclar inóculo pos fermentado
	Caracterizar inóculo pos fermentado	Extraer muestra
		Preparar muestra
		Medir pH
		Determinar densidad
		Determinar humedad
		Determinar sólidos volátiles
		Determinar sólidos totales
		Determinar COT
		Determinar COD
		Determinar alcalinidad
		Determinar AGV
		Determinar nitrógeno amoniacal
		Determinar nitrógeno total
	Realizar ensayo de biodegradación de materiales de prueba	Mezclar inóculo post fermentado y materiales de prueba
		Homogenizar inóculo para blanco
		Realizar biodegradación con temperatura controlada
		Reposar el equipo
		Calcular y documentar
	Caracterizar mezcla degradada	Preparar mezcla degradada para caracterización
		Medir pH
		Determinar densidad
		Determinar humedad
Determinar sólidos volátiles		
Determinar sólidos totales		
Determinar COT		
Determinar COD		
Determinar alcalinidad		
Determinar AGV		
Determinar nitrógeno amoniacal		
Determinar nitrógeno total		
Calcular y documentar		

Fuente: Propia, diciembre de 2014

Las pruebas de caracterización son fases de proceso, que no se presentan aquí, se modelan en la sección 3.2.2 como procesos independientes.

Modelo de recetas del Ensayo BATACS

El modelo de control procedimental, de recetas o r cipe del ensayo BATACS integra la formulación de materias primas e insumos requeridos, muestra los productos en proceso "FORSU" e "inóculo metanogénico", los parámetros de proceso, las salidas del proceso resultado de la biodegradación anaerobia de los materiales de prueba "metano y dióxido de carbono", los requerimientos de equipo y los modelo procedimental y físico, ver cuadro 31.

Cuadro 31. Modelo de receta de control del ensayo BATACS.

RECIPES DE CONTROL		
ENSAYO DE BATACS		
VERSION 1.0		
AUTORES: Paola Marcela Certuche Muñoz Daniel Eduardo Melo Ruiz		
Revisado por: Mg. ing. Juan Fernando Flórez		
LUGAR Y FECHA DE EXPEDICION: Popayán, Enero de 2015		
FORMULA		
Entradas de Proceso	Material orgánico	
	Vegetales	Kg
	Desechos de lechuga	8,10
	Desechos de repollo	2,70
	Desechos de zanahoria	0,90
	Desechos de tomate	1,35
	Desechos de cebolla	2,70
	Frutas	Kg
	Desechos de banano	3,15
	Desechos de naranja	2,25
	Desechos de mandarina	2,25
	Desechos de piña	2,25
	Carbohidratos	Kg
	Desechos de papa criolla	3,60
	Desechos de papa	3,60
	Desechos de yuca	3,15
	Proteínas	Kg
	Desechos de carne	2,25
	Desechos de arveja	3,60
	Desechos de frijol	3,15
	INOCULO	Kg
	Inóculo líquido anaerobio	16,00
	MATERIALES DE PRUEBA	Kg
	Celulosa	0,15
	Muestra de ensayo	0,16
	NaOH 6N	1,00
	REACTIVOS	MI
Agua destilada	100	
Agua desionizada	600	
Na ₂ CO ₃	1,5	
H ₂ SO ₄ al 98%	2,8	
Productos intermedios	FORSU	45
	Inóculo metanogénico	60
Parámetros de Proceso	Variable	Valor
	Tamaño corte material orgánico	3 cm
	Tamaño trituración FORSU	(1-5) mm
	Tamaño partícula material de prueba	120µm
	Temperatura preparación inóculo	55 ± 2 °C
	pH mezcla degradada inicial	6.5± 0,2
	Temperatura interna bioreactores	52°C ± 2°C
	AGV inóculo	1 g/Kg
	N _{total} inóculo	0.5 - 2 g/Kg
	pH inóculo	7.5 – 8.5
	ST	Inicial - 8%
	SV	Inicial - 8%
	COD	Inicial - 8%

Continúa...

Cuadro 31. (Continuación)

Parámetros de Proceso	Variable	Valor
	CaCO ₃	2 - 4 g/L
	AGV	C3 (<3g/l), C1/C3 (<4), Tot (<4g/l)
	AGV/CaCO ₃	0.3 - 0.4
	N-NH ₄	< (1700 - 2000 mg /L)
	NaOH 6N	10 ml/día
	% Elim.	50%
	Ph	8
	L/d	
	%CH ₄	60%
	%CO ₂	40%
	%H ₂	0%
Salidas de Proceso	% gas metano	%
	% CO ₂	%
	% H ₂	%
	Porcentaje de biodegradación material de ensayo	%
REQUERIMIENTOS DE EQUIPO		
<p>Bidones plásticos, horno Binder FD220, malla de secado, molino triturador Penagos, molino analítico Kinematica. Balanzas analíticas Kern de 220g y 12Kg precisión ±0.0001gr Digestor anaerobio Centricol de 20l, con tapa, sistema de agitación integrado, un puerto de tomas de muestra; Chiller para con control de temperatura (55°C± 2°C); con visor de temperatura y manómetro integrado Acumulador de gases Ritter de 40l Sensor indicador de pH Schott (0-14) Cromatógrafo de gases (0-100%) de alta precisión Horno incubador Binder integrado para 9 bioreactores con tapa de un puerto, sin agitación, con control de temperatura 52°C ± 2°C 9 flujómetros Milligas counter de Ritter Barómetro digita y termómetro de vidrio Horno de secado pequeño Binder, Muffla Furnaced, crisoles, beaker 50ml, varilla de vidrio, baño María, vidrio reloj Desecador mediano, Erlenmeyer de 250ml, balón aforado de 300ml 1000ml, beaker 100ml, plancha de agitación magnética.</p>		
MODELO DE PROCEDIMIENTO		
Ver cuadro 30 y Anexo 4.1		
OTRA INFORMACIÓN		
Norma Vigente	ISO 15985-14 ISA S.88	
MODELO FISICO		
Ver Anexo 4.9		
OTRA INFORMACIÓN		
Norma Vigente	ISO 15985:2014, ISA S.88, ISA S.5	

Fuente: Propia, diciembre de 2014

3.2.2 Modelos de pruebas de caracterización

Se presentan los modelos de proceso, físico, procedimiento y recetas de las seis pruebas de caracterización, por separado:

Modelos prueba densidad

Consta de una etapa, una operación y cuatro acciones de proceso, así mismo, el modelo de control procedimental tiene una etapa, un procedimiento de unidad y cuatro fases; el modelo físico tiene un módulo equipo, ver cuadros 32 a 34. Así como el modelo de recetas de la prueba de densidad, ver cuadro 35.

Cuadro 32. Modelo de proceso de la prueba densidad

MODELO DE PROCESO PRUEBA DENSIDAD		
ETAPAS	OPERACIONES	ACCIONES DEL PROCESO
Densidad	Alistamiento de equipos	Pre calentamiento de mufla
		Lavado de crisoles y secado
		Enfriamiento de crisoles
		Almacenamiento de crisoles en desecador

Fuente: propia, diciembre de 2014

Cuadro 33. Modelo físico prueba de densidad

Unidad	Módulo Equipo	Módulo de Control
Densidad	Equipo para la determinación de densidad Balanza analítica: ALJ 220-4NM Probeta de 100ml	Sensor indicador: balanza analítica

Fuente: propia, diciembre de 2014

Cuadro 34. Modelo de control procedimental de la prueba de densidad

MODELO DE PROCEDIMIENTO PRUEBA DE DENSIDAD		
PROCEDIMIENTO	OPERACIONES	FASES
Densidad	Alistamiento de equipos	Pre calentamiento mufla a 550°C
		Lavar crisoles y secara 550°C por 1 hora
		Enfriar crisoles a temperatura ambiente hasta 70°C
		Almacenar crisoles en desecador

Fuente: propia, diciembre de 2014

Cuadro 35. Modelo de receta de control de la prueba densidad

RECIPES DE CONTROL PRUEBA DE DENSIDAD VERSION 1.0			
AUTORES:		Paola Marcela Certuche Muñoz y Daniel Eduardo Melo Ruiz	
LUGAR Y FECHA DE EXPEDICION:		Popayán, Enero de 2015	
FORMULA			
Entrada de proceso	Material	Cantidad	Unidad
	Muestra de análisis		g
Salidas de Proceso	Peso de muestra		g
	Volumen de muestra		ml
	Densidad		g/ml
REQUERIMIENTOS DE EQUIPO			
Probeta 100ml y balanza analítica Kern de 220g ±0.0001gr			
MODELO DE PROCEDIMIENTO			
Para información detallada, ver Anexo 4.9 y cuadro 34			
OTRA INFORMACIÓN			
Norma Vigente		APHA-AWWA-WEF 2710F, ISA S.88, ISA S.5	
MODELO FISICO			
Ver cuadro 33.			

Fuente: Propia, diciembre de 2014

Modelos de pruebas: humedad, sólidos totales y sólidos volátiles

El modelo de proceso tiene 4 operaciones, con 6, 7, 6 y 6 acciones de proceso; el modelo de control procedimental tiene 4 procedimientos de unidad, con 6, 7, 6 y 6 fases de proceso, ver cuadros 36 y 38. El modelo físico presenta un módulo equipo, ver cuadro 37.

Cuadro 36. Modelo de proceso de las pruebas humedad, sólidos totales y sólidos volátiles

MODELO DE PROCESO PRUEBAS HUMEDAD, SÓLIDOS TOTALES Y VOLÁTILES		
ETAPAS	OPERACIONES	ACCIONES DEL PROCESO
Cuantificación de humedad, sólidos totales y sólidos volátiles	Preparación de muestras en crisol	Pesado de crisoles
		Mezclado MA_ FORSU_ TSTH/INO
		Pesado de dos réplicas de MA_ FORSU_ TSTH/INO
		Tapado de conjuntos crisol y muestra de análisis.
		Trituración y pesado de 5g por triplicado de material de prueba
		Tapado de los conjuntos crisol y muestra de análisis
	Desecado de muestra	Calentamiento de crisoles tapados a 90°C
		Pre calentamiento de horno de secado a 105°C
		Ubicación de crisoles tapados en el horno por 1 hora
		Estabilización a temperatura ambiente
		Pesado de crisoles con muestra sin vidrio reloj
		Repetición de acción "desecado de muestra" hasta que la variación de peso no supere el 4% y registro de peso final
		Cálculo de porcentaje de sólidos totales y humedad
	Preparación de muestras en crisol	Pesado de crisoles
		Mezclado MA_ FORSU_ TSTH/INO
		Pesado de dos réplicas de MA_ FORSU_ TSTH/INO
		Tapado de conjuntos crisol y muestra de análisis.
		Trituración y pesado de 5g por triplicado de material de prueba
		Tapado de los conjuntos crisol y muestra de análisis
	Incineración de muestra	Incineración de crisoles tapados (crisol con muestras de polímero e inóculo)
		Incineración de material de prueba en mufla fría junto a los crisoles antes incinerados
		Retiro de crisoles y ubicación en desecador, estabilizar a temperatura ambiente
		Pesado de crisoles con muestra sin vidrio reloj
		Repetición de procedimiento "incineración de muestra"
		Cálculo de porcentaje de sólidos volátiles y sólidos fijos

Fuente: propia, diciembre de 2014

Cuadro 37. Modelo físico de las pruebas humedad, sólidos totales y sólidos volátiles

Unidad	Módulo Equipo	Módulo de Control
Humedad, ST, SV	Medidor de humedad Precisa 60X	Sensor: medidor de humedad
		Controlador: humano
		Actuador: humano
	Mufla FB 1400	Sensor: sensor Mufla
		Controlador: controlador Mufla
	Higrómetro MT-241 Varilla de vidrio Balanza analítica ALJ 220-4NM Crisoles y vidrio reloj	Actuador: resistencia Mufla
		Sensor indicador: higrómetro
		Sensor indicador: balanza analítica
		Sensor: sensor horno Binder
	Horno de secado: Binder FD 240	Controlador: controlador horno Binder
Desecador plástico Nalgenen	Actuador: resistencia horno Binder	

Fuente: propia, diciembre de 2014

Cuadro 38. Modelo de control procedimental pruebas: humedad, sólidos totales y volátiles

MODELO DE PROCEDIMIENTO PRUEBAS HUMEDAD, SÓLIDOS TOTALES Y VOLÁTILES		
ETAPAS	OPERACIONES	ACCIONES DEL PROCESO
Quantificar sólidos totales y humedad	Preparar muestras en crisol	Pesar crisoles
		Mezclar MA_FORSU_TSTH/INO
		Pesar dos réplicas de MA_FORSU_TSTH/INO
		Tapar conjuntos crisol y muestra de análisis.
		Triturar y pesar 5g por triplicado de material de prueba
		Tapar conjuntos crisol y muestra de análisis
	Desechar muestra	Calentar crisoles tapados a 90°C
		Precalear horno de secado a 105°C
		Ubicar crisoles tapados en el horno por 1 hora
		Estabilizar a temperatura ambiente
		Pesar crisoles con muestra sin vidrio reloj
		Repetir acción "desechado de muestra" hasta variación de peso menor a 4%
		Calcular porcentaje de sólidos totales y humedad
		Quantificar sólidos volátiles y sólidos fijos
Mezclar MA_FORSU_TSTH/INO		
Pesar dos réplicas de MA_FORSU_TSTH/INO		
Tapar conjuntos crisol y muestra de análisis.		
Triturar y pesar 5g por triplicado de material de prueba		
Tapar los conjuntos crisol y muestra de análisis		
Incinerar muestra	Incinerar crisoles tapados (crisol con muestras de polímero e inóculo)	
	Incinerar de material de prueba en mufla fría junto a los crisoles antes incinerados	
	Retirar de crisoles y ubicación en desecador, permitir estabilización a temperatura ambiente	
	Pesar crisoles con muestra sin vidrio reloj	
	Repetir procedimiento "incineración de muestra"	
	Calcular de porcentaje de sólidos volátiles y sólidos fijos	

Fuente: propia, diciembre de 2014

Se desarrolla la receta de control de las pruebas, por un lado la de humedad y sólidos totales y por otro las de sólidos volátiles y fijos, ver cuadros 39 y 40.

Cuadro 39. Modelo de receta de control de las pruebas humedad y sólidos totales

RECIPES DE CONTROL PRUEBAS DE HUMEDAD Y SÓLIDOS TOTALES, VERSION 1.0			
AUTORES: Paola Marcela Certuche Muñoz Daniel Eduardo Melo Ruiz			
LUGAR Y FECHA DE EXPEDICION: Popayán, Enero de 2015			
FORMULA			
Entradas de proceso	Material	Cantidad	Unidad
	Muestra de análisis	40 g	
	Agua destilada	100ml	
Parámetros de Proceso	Variable	Valor	
	Temperatura pre mufla	550	°C
	Tiempo temp pre mufla	1	H
	Temperatura incineración	550	°C
	Tiempo incineración	1	H
	Temperatura reposo crisoles	70	°C
	Tiempo de mezcla de muestra	5	Min
	Temperatura baño María	90	°C
	Tiempo baño María	2	H
	Temperatura pre 2	105	°C
	Tiempo temp pre 2	1	H
Salidas de Proceso	% Sólidos totales		%
	% Humedad		%
	% Sólidos volátiles		%

Continúa...

Cuadro 39. (Continuación)

REQUERIMIENTOS DE EQUIPO	
Horno Binder FD115, Mufla, balanza analítica Kern de 220g ± 0.0001 gr, crisoles, desecador mediano, beaker 50, varilla de vidrio, molino analítico Kinematica, baño María.	
MODELO DE PROCEDIMIENTO	
Para mayor detalle, ver Anexo 4.9 y cuadro 38.	
OTRA INFORMACIÓN	
Norma Vigente	APHA-AWWA-WEF 2540G ISA S.88, ISA S.5
MODELO FÍSICO: Ver cuadro 37	
Fuente: Propia, Diciembre de 2014	

Cuadro 40. Modelo de receta de control de la prueba sólidos volátiles

RECIPE DE CONTROL			
PRUEBA DE SÓLIDOS VOLÁTILES			
VERSION 1.0			
AUTORES: Paola Marcela Certuche Muñoz Daniel Eduardo Melo Ruiz			
LUGAR Y FECHA DE EXPEDICION: Popayán, Enero de 2015			
FORMULA			
Entradas de proceso	Material	Cantidad	Unidad
	Muestra de análisis	40	g
Parámetros de Proceso	Variable		
	Temperatura incineración mechero	550	°C
	Tiempo incineración mechero	2	h
	Temperatura mufla	1	h
	Tiempo temp mufla	550	°C
	Tiempo temp reposo cris	30	min
	Temperatura mufla rep	4	%
	Tiempo temp mufla rep	-	°C
Salidas de Proceso	Variación de peso final	15	min
	% Sólidos Volátiles		%
	% Sólidos Fijos		%
REQUERIMIENTOS DE EQUIPO			
Horno Binder FD115, Mufla, balanza analítica Kern de 220g ± 0.0001 gr, crisoles, desecador mediano, beaker 50, varilla de vidrio, molino analítico Kinematica, baño María.			
MODELO DE PROCEDIMIENTO			
Para mayor detalle, ver Anexo 4.9 y cuadro 38.			
OTRA INFORMACIÓN			
Norma Vigente	APHA-AWWA-WEF 2540G ISA S.88, ISA S.5		
MODELO FÍSICO			
Ver cuadro 37.			
Fuente: Propia, diciembre de 2014			

Modelos prueba de alcalinidad

Esta prueba presenta 4 operaciones, con 5, 3, 6 y 9 acciones de proceso; a su vez tiene un control de procedimiento con 4 procedimientos de unidad y 5, 3, 6 y 9 fases de proceso, ver cuadros 41 y 43. Se presenta modelo físico, ver cuadro 42.

Cuadro 41. Modelo de proceso de la prueba alcalinidad

MODELO DE PROCESO PRUEBA DE ALCALINIDAD		
ETAPAS	OPERACIONES	ACCIONES DEL PROCESO
Prueba de Alcalinidad	Preparación de Na ₂ CO ₃ , 0.05 N	Secado de Na ₂ CO ₃ (Estándar Primario) y enfriamiento
		Pesado de Na ₂ CO ₃ _S
		Adición de agua destilada
		Sellado de Erlenmeyer
		Almacenamiento de Na ₂ CO ₃ 0.05N
	Preparación de H ₂ SO ₄ , 0.02 N	Preparación de H ₂ SO ₄ _0.01N
		Preparación de H ₂ SO ₄ _0.02N
		Almacenamiento de H ₂ SO ₄ _0.02N
	Estandarización de H ₂ SO ₄ 0.02 N	Preparación de materiales en beaker Na ₂ CO ₃ _0.05N y agua desionizada
		Mezcla de Na ₂ CO ₃ _0.05N y agua desionizada
		Titulación potenciométrica de la mezcla
		Registro del volumen de H ₂ SO ₄ _0,02N empleado en la titulación
		Agitación después de cada adición de H ₂ SO ₄ _0,02N, detención de la agitación en el momento de la introducción del electrodo
	Cálculos	Cálculos de normalidad de H ₂ SO ₄ _0,02N
		Lavado de materiales de vidrio
		Secado de material a 105 °C durante una hora
Agitación de FORSU_TSTH/INO_L_F1 (por réplica)		
Repetición de la actividad anterior		
Titulación potenciométrica las mezclas del numeral anterior con H ₂ SO ₄ _0,02N_E hasta pH 4.5		
Titulación potenciométrica las mezclas del numeral anterior con H ₂ SO ₄ _0,02N_E hasta pH 4.5		
Estabilización de pH		
Registro de los volúmenes de H ₂ SO ₄ _0.02N_E empleado en la titulación de cada réplica		
Cálculo de alcalinidad total		

Fuente: propia, diciembre de 2014

Cuadro 42. Modelo físico de la prueba alcalinidad

Unidad	Módulo Equipo	Módulo de Control
Prueba de Alcalinidad	Equipo para la determinación de alcalinidad Balanza analítica ALJ 220-4NM	Sensor indicador: balanza analítica
	Desecador plástico Nalgene Erlenmeyer Balón aforado Pipetas aforadas Beakers Plancha de Agitación MS 7-H550-S	
	pH metro Lab 850 Schot	Sensor indicador de pH
	Horno Binder FD 240	Sensor: sensor horno Binder Controlador: controlador horno Binder Actuador: resistencia horno Binder

Fuente: propia, diciembre de 2014

Cuadro 43. Modelo de control procedimental de la prueba alcalinidad

MODELO DE PROCEDIMIENTO PRUEBA ALCALINIDAD		
ETAPAS	OPERACIONES	ACCIONES DEL PROCESO
Cuantificar Alcalinidad	Preparar Na_2CO_3 , 0.05 N	Secar Na_2CO_3 (Estándar Primario) y enfriamiento
		Pesar Na_2CO_3 _S
		Adicionar agua destilada
		Sellar Erlenmeyer
		Almacenar Na_2CO_3 0.05N
	Preparar H_2SO_4 , 0.02 N	Preparar H_2SO_4 _0.01N
		Preparar H_2SO_4 _0.02N
		Almacenar de H_2SO_4 _0.02N
	Estandarizar H_2SO_4 0.02 N	Preparar materiales en beaker Na_2CO_3 _0.05N y agua desionizada
		Mezclar de Na_2CO_3 _0.05N y agua desionizada
		Titular potenciométrica de la mezcla
		Registrar volumen de H_2SO_4 _0,02N empleado en la titulación
		Agitar después de cada adición de H_2SO_4 _0,02N
		Calcular normalidad de H_2SO_4 _0,02N
	Calcular	Lavar materiales de vidrio
		Secar material a 105 °C durante una hora
Agitar FORSU_TSTH/INO_L_F1 (por réplica)		
Repetir actividad anterior		
Titular potenciométricamente las mezclas con H_2SO_4 _0,02N_E hasta pH 4.5		
Estabilizar pH		
Registrar volúmenes de H_2SO_4 _0.02N_E empleado en la titulación de cada réplica		
Cálculo de alcalinidad total		

Fuente: propia, diciembre de 2014

El modelo de recetas, integra la información requerida para realizar la prueba, involucrando materiales, equipos, parámetros de procesos, salidas, ver cuadro 44.

Cuadro 44. Modelo de receta de control de la prueba alcalinidad

RECIPES DE CONTROL PRUEBA DE ALCALINIDAD, VERSION 1.0			
AUTORES: Paola Marcela Certuche Muñoz y Daniel Eduardo Melo Ruiz			
LUGAR Y FECHA DE EXPEDICION: Popayán, Enero de 2015			
FORMULA			
Entradas de proceso	Material	Cantidad	Unidad
	Muestra de análisis	25	ml
	Agua destilada	500	ml
	Agua desionizada	600	ml
	Na_2CO_3	1,5	g
	H_2SO_4 al 98%		ml
Parámetros de Proceso	Variable	Cantidad	Unidad
	Temperatura secado	250	°C
	Tiempo temp secado	4	h
	Tiempo enfriado	-	min
	Aforado agua para Na_2CO_3 _0.05N	250	ml
	Aforado agua para H_2SO_4 _0.01N	500	ml
	Tiempo agit est H_2SO_4 0.02N	1	min
	Titulación est H_2SO_4 0.02N	4.5	pH
	Temperatura secado instrum	105	°C
	Tiempo sec instrumentos	1	h
	Tiempo agit cálculo	1	min
	Titulación mezcla	4.5	pH

Continúa...

Cuadro 44. (Continuación)

Salidas de Proceso	Variable	Cantidad	Unidad
	Alcalinidad		
	Normalidad de H ₂ SO ₄ 0.02N		
REQUERIMIENTOS DE EQUIPO			
Horno Binder FD115, balanza analítica Kern de 220g ±0.0001gr, desecador mediano, varilla de vidrio, Erlenmeyer 250ml, balón aforado de 300ml 1000ml, beaker 100ml, plancha de agitación magnética.			
MODELO DE PROCEDIMIENTO			
Para información más detallada, ver Anexo 4.9 y cuadro 43.			
OTRA INFORMACIÓN			
Norma Vigente	APHA-AWWA-WEF 2320B, ISA S.88, ISA S.5		
MODELO FISICO			
Ver cuadro 42.			

Fuente: Propia, diciembre de 2014

Modelos prueba pH

El modelo de proceso consta de dos operaciones con 1 y 5 acciones de proceso; tiene un control procedimental con dos procedimientos de unidad y 1 y 5 fases, ver cuadros 45 y 47, se desarrolla el modelo físico, ver cuadro 46.

Cuadro 45. Modelo de proceso de las pruebas de pH

MODELO DE PROCESO PRUEBA DE PH		
ETAPAS	OPERACIONES	ACCIONES DEL PROCESO
Prueba de pH	Calibración	Calibración del sensor en puntos buffer
	Medición de pH	Ubicación de 10 ml de MA_FORSU_TSTH/INO_L
		Agitación de 10 ml de MA_FORSU_TSTH/INO_L
		Ubicación de electrodo de pH y terminal del sensor de temperatura del pHmetro
		Lectura de pH con corrección de temperatura
		Registro de valores pH y temperatura

Fuente: propia, diciembre 2014

Cuadro 46. Modelo físico de la prueba pH

Unidad	Módulo Equipo	Módulo de Control
Prueba de pH	Equipo para determinación de pH pH metro Lab 850 plancha de agitación magnética MS 7-H550-S	Sensor: pH metro

Fuente: propia, diciembre 2014

Cuadro 47. Modelo de control procedimental de la prueba de pH

MODELO DE PROCEDIMIENTO PRUEBA DE PH		
ETAPAS	OPERACIONES	ACCIONES DEL PROCESO
Prueba de pH	Calibrar pHmetro	Calibrar sensor en puntos buffer
	Medir pH	Ubicar 10 ml de MA_FORSU_TSTH/INO_L
		Agitar 10 ml de MA_FORSU_TSTH/INO_L con agitador magnético por 5 minutos
		Ubicar de electrodo de pH y terminal del sensor de temperatura del pHmetro
		Hacer lectura de pH con corrección de temperatura
		Registrar valores pH y temperatura

Fuente: propia, Diciembre 2014

Se realiza el modelo de receta para la prueba de pH, ver cuadro 48.

Cuadro 48. Modelo de receta de control de la prueba pH

RECIPES DE CONTROL: PRUEBA DE pH. VERSION 1.0			
AUTORES: Paola Marcela Certuche Muñoz Daniel Eduardo Melo Ruiz			
LUGAR Y FECHA DE EXPEDICION: Popayán, Enero de 2015			
FORMULA			
Entradas de proceso	Material	Cantidad	Unidad
	Muestra de análisis	25	ml
Parámetros de Proceso	Variable		Unidad
	Tiempo agitación	5	min
Salidas de Proceso	Variable	Cantidad	Unidad
	Corrección por temperatura		%
	pH		pH
REQUERIMIENTOS DE EQUIPO			
pH metro Schott, plancha de agitación magnética			
MODELO DE PROCEDIMIENTO: Ver cuadro 47 y Anexo 4.9.			
OTRA INFORMACIÓN			
Norma Vigente		APHA-AWWA-WEF 4500-H+. ISA S.88, ISA S.5	
MODELO FÍSICO: Ver cuadro 46			

Fuente: Propia, diciembre de 2014

3.2.3 Cadena de valor

El laboratorio de Biotecnología ofrecerá el servicio de ensayo BATACS al público en general por tanto debe ser un laboratorio acreditado conforme con la norma colombiana NTC 17025 (NTC-ISO/IEC, 2005); en este sentido, debe considerar: actividades de servicio al cliente, programas de calibración de sensores, aseguramiento de calidad; debe garantizar trazabilidad de mediciones y control de registros. Se propone una cadena de valor para el ensayo BATACS, ver figura 24.

En la parte superior de la cadena se encuentra la solicitud de ensayo por parte de un cliente, una vez conocida esta solicitud, sigue el segundo eslabón de la cadena, donde se verifica la disponibilidad de materia prima, materiales de prueba y reactivos requeridos en la receta de control y se procede a realizar el proceso en sus tres etapas, hasta obtener el documento del ensayo; en el tercer eslabón se encuentran actividades iniciales de calidad, donde se verifica la calidad de las materias primas, materiales de prueba FORSU e inóculo, se verifica la calibración de sensores y rutinas de limpieza del laboratorio y se realiza una inspección del ensayo, para garantizar que se realiza de acuerdo con los protocolos; en el cuarto eslabón se encuentran las actividades de compras, calibración, limpieza y trazabilidad que deben realizarse; en el último eslabón se encuentran las actividades de inventario, mantenimiento y facturación.

Figura 24. Cadena de valor propuesta para la nueva célula del proceso de biodegradación anaerobia del Laboratorio de Biotecnología de la Universidad del Cauca



Fuente: propia, noviembre de 2014

3.3 ESPECIFICACIÓN DE VARIABLES DE PROCESO

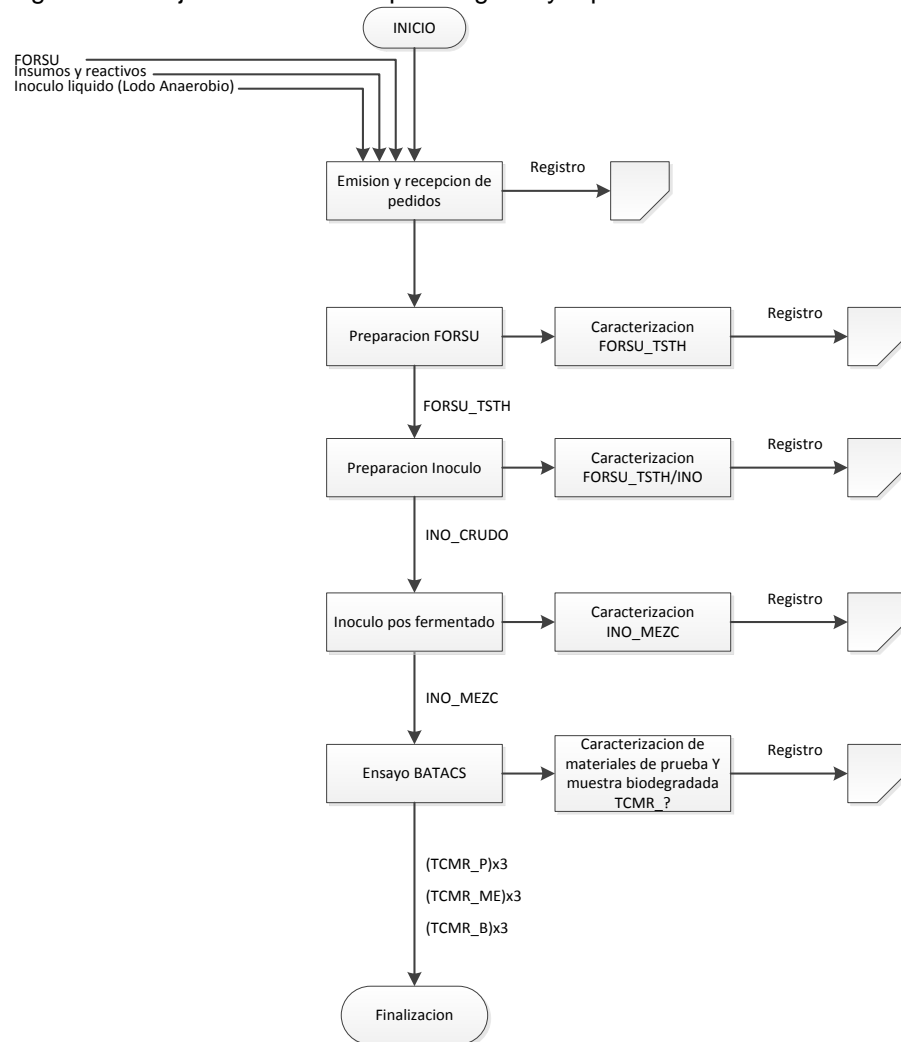
Se presentan las variables de proceso del ensayo de biodegradación y 11 pruebas de caracterización, considerando variables de entrada, monitoreadas y derivadas, ver Anexo 4.11.

3.4 MONITOREO Y REPORTE DEL ENSAYO BATACS Y PRUEBAS

De acuerdo con la cadena de valor, ver figura 24, se propone una hoja electrónica en Excel para reportes del ensayo BATACS y pruebas de caracterización, ver figura 25; indica la forma de registrar información a lo largo de todo el proceso, registrando información de materias primas, productos intermedios y salidas, para garantizar buen desempeño, calidad e identificar las fallas.

Se acondicionan los formatos suministrados por el grupo CYTBIA para registro de reportes del ensayo y pruebas de caracterización. Los diferentes formatos se almacenan en tablas diseñadas en Excel; en éstos se almacena información sobre personal responsable, fecha y hora, cantidades de materiales y equipos utilizados. La información de estos formatos se registra desde una tableta digital para que la información esté accesible. Se presenta el listado de formatos, ver tabla 2, para mayor detalle, ver anexo 5 “PROPUESTA FORMATO DE REPORTE DEL ENSAYO BATACS” y archivos xlsx digitales en CD adjunto.

Figura 25. Diagrama de flujo de información para registro y reportes



Fuente: propia, enero 2015.

Tabla 2. Listado de formatos en Excel de registro de información propuestos.

Nombre archivo o libro	Hoja	Extensión
1-Recepción de pedidos	FORSU Insumos y reactivos	.xlsx
2-Preparacion de FORSU	Preparación y caracteriza_FORSU	.xlsx
3-Preparacion de inoculo	Prep_Inoculo Densidad Humedad, ST y SV COT, COD FORSU_TSTH_INO Alcalinidad FORSU_TSTH_INO AGV FORSU_TSTH_INO Nitrógeno Total y amoniacal PH- FORSU_TSTH_INO	.xlsx

Continúa...

Tabla 2. (Continuación)

4-Inoculo pos fermentado	Post fermentación Densidad Humedad, ST y SV COT, COD Alcalinidad AGV Nitrógeno Total y amoniacal PH	.xlsx
5-Ensayo BATACS	Caract_MP (ST, SV, COT) Caracterizacion inoculo (LA) Ensayo Seguimiento RP Seguimiento ME Seguimiento B Densidad TCMR Humedad, ST y SV COT, COD TCMR Alcalinidad TCMR Alcalinidad TCMR Nitrogeno Total, amoniacal TCMR PH TCMR	.xlsx

Fuente: propia, enero de 2015.

3.5 DIAGRAMAS DE FLUJO DE PROCESO Y P&ID

Se desarrollan 13 PFD y 7 P&ID de la propuesta de automatización, ver Anexo 4 numeral 4.9 “DIAGRAMAS PFD y P&ID”.

4 INGENIERÍA DETALLADA

En este capítulo, se presenta la nueva célula de proceso, el plano de distribución físico y diagrama de recorrido, los equipos que la componen, el patrimonio tecnológico, costeo de inversiones fijas, diagnóstico del nivel de automatización y grado de dificultad del ensayo BATACS nuevo.

4.1 DISTRIBUCIÓN DE LA NUEVA CÉLULA DE PROCESO DE BIODEGRADACIÓN ANAEROBIA

Basándose en ISA S88 parte 1 y de acuerdo con la información suministrada por CYTBIA, se define el modelo físico nuevo del proceso BATACS, así: 1) Nivel de empresa: Universidad del Cauca, ubicada en la ciudad de Popayán, Colombia. 2) Nivel de sitio: Facultad de Ciencias Agrarias, situada en la Vereda las Guacas, al norte de la ciudad de Popayán. 3) Área: edificio del Centro de Desarrollo Tecnológico, laboratorio de Biodegradación. 4) Célula de proceso: denominada “Célula de Biodegradación Anaerobia”; se presenta el plano general del Centro de Desarrollo Tecnológico donde está alojado el laboratorio. En la célula se identifican cuatro unidades: a) Unidad de preparación de FORSU, b) Unidad de preparación de inóculo c) Unidad de biodegradación y d) Unidad de caracterización; se presenta la distribución de la célula, ver figura 26, para más detalle, ver Anexo en pdf “Plano de distribución”.

En el plano se observan cuatro espacios: 1. zona de almacenamiento de muestras, 2. zona de almacenamiento de reactivos, 3. zona de laboratorio de análisis físico-químico y 4. Laboratorio de Biodegradación. En el primero, se conservan los materiales de muestra y materias primas para elaborar FORSU en estantes y se establece la unidad “Preparación de FORSU” con sus equipos (malla de secado, horno y molino), tiene un mesón donde se realiza la trituración de material orgánico. En la zona 2, se almacenan los reactivos requeridos para las pruebas de caracterización y se conservan los residuos generados. En la zona 3, se establece la unidad de “caracterización” con todos sus equipos, incluyendo el horno de secado pequeño; en este sitio se realizan las seis pruebas de caracterización y se hace preparación de materiales para caracterización; se ubica un estante y una nevera para guardar los equipos. Este lugar cuenta con vestier, baño, ducha, lavamanos y lava ojos, para atender cualquier riesgo ocupacional.

En el laboratorio de biodegradación, se establecen dos unidades: la unidad de “preparación de inóculo”, compuesta por: biodigestor y Chiller y la unidad de “ensayo de biodegradación”, donde se ubica el módulo equipo post fermentación y el equipo de biodegradación Biogas Batch Fermentation System y un computador para supervisión y reportes del ensayo; esta zona cuenta con lavadero y mesón.

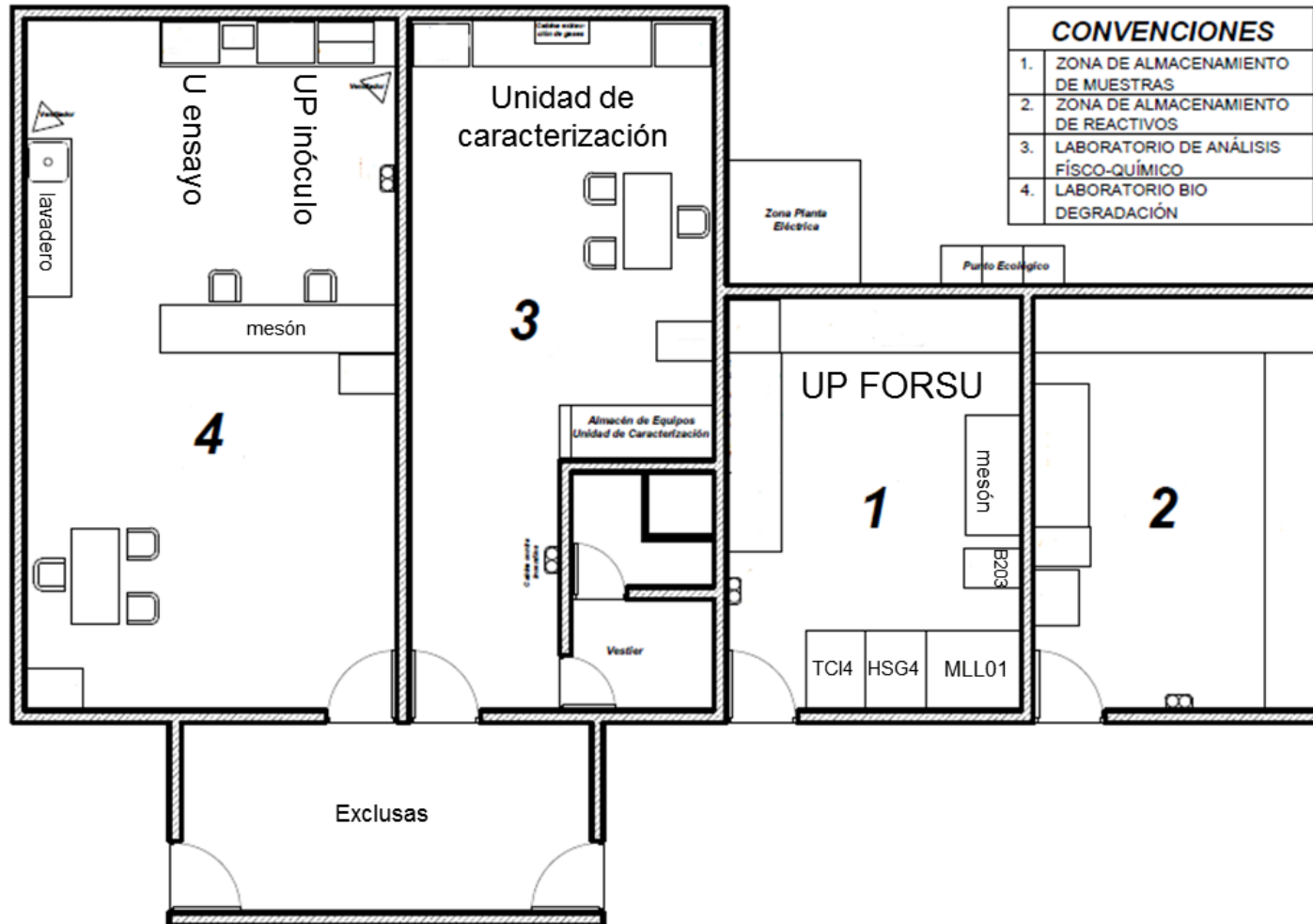
Se indica la zona de “exclusas”, con sus puertas de acceso, por donde ingresan materias primas al laboratorio de biodegradación. Todas las zonas cuentan con elementos de seguridad industrial: cada espacio tiene un extintor; el laboratorio de análisis físico químico tiene una cabina extractora y ventilador para extraer gases producidos; adicionalmente cuenta con baño, ducha, lavamanos y lava ojos.

Todas las zonas cuentan con una mesa de trabajo. En el laboratorio de biodegradación se ubica un punto de información, donde se recibe la solicitud de ensayo o prueba y se imprimen los resultados de las mismas; toda la información generada en cada uno de los espacios se registra y guarda en archivadores tablet. En la parte exterior se ubica la planta eléctrica y un punto ecológico donde se destinan los residuos generados.

4.2 DIAGRAMA DE RECORRIDO

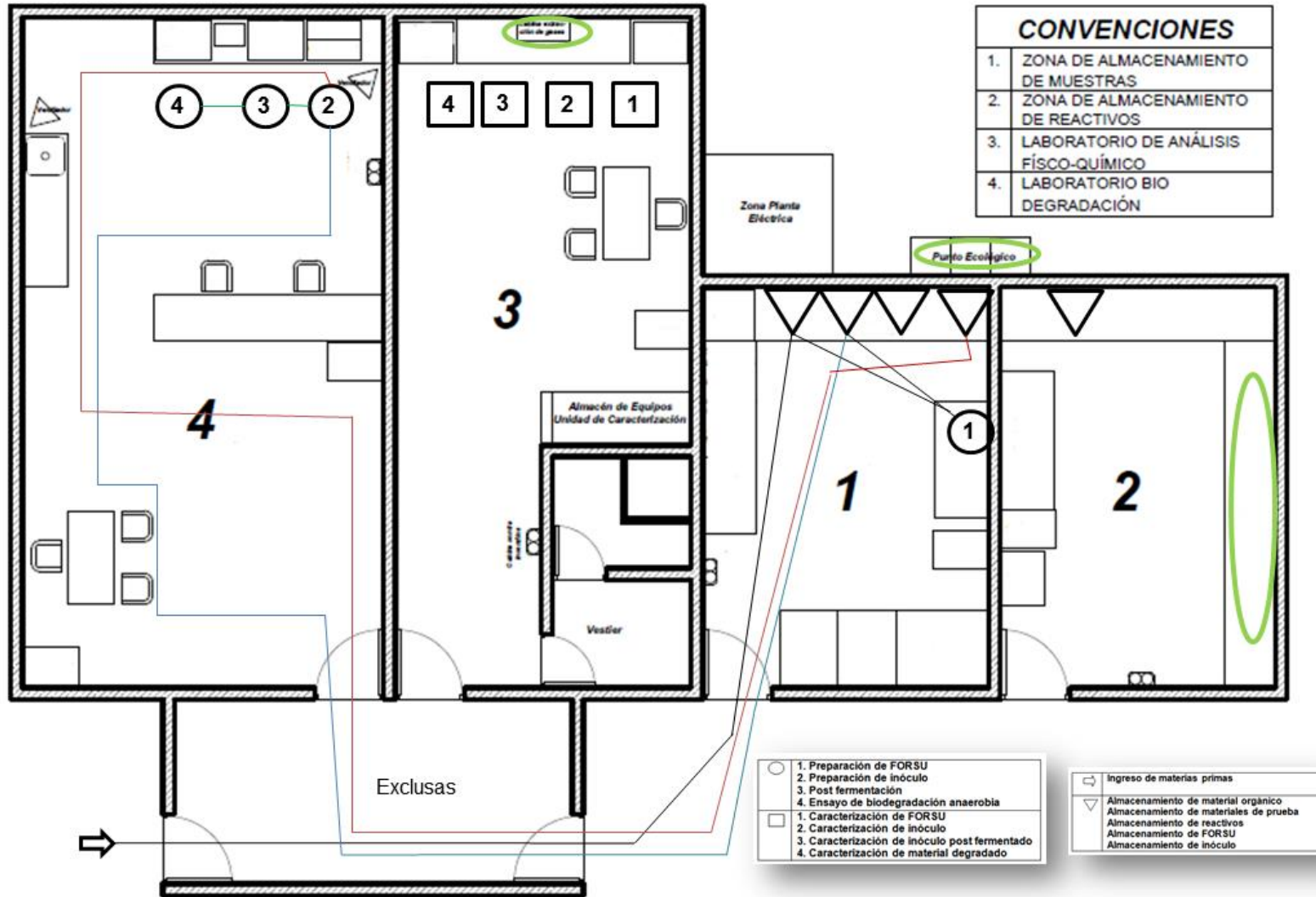
El diagrama de recorrido, ver figura 27, presenta el flujo de materias primas e insumos y su transformación en la ejecución del ensayo BATACS, el ensayo se sintetiza en cuatro operaciones; por la zona de exclusas ingresa materia orgánica y materiales de muestra hacia la zona de almacenamiento de muestras, con el material orgánico se prepara FORSU (1) que se almacena hasta por tres meses, se inspecciona (1) (trayectoria en negro); posteriormente, en el laboratorio de biodegradación se prepara inóculo (2) con FORSU y se inspecciona (2) (trayectoria azul); se post fermenta el inóculo (3) y se inspecciona (3) (trayectoria verde), finalmente se realiza el ensayo de biodegradación (4) y se inspecciona el material degradado (4). Todas las inspecciones se realizan en el laboratorio de análisis físico químico. Como la producción de inóculo es semicontinua, el excedente se almacena en la zona de almacenamiento de muestras (trayectoria roja), aquí también se almacena materia orgánica, materiales de prueba y FORSU. Los desechos orgánicos y químicos se ubican en puntos ecológicos (elipses verdes) que se envían hacia la planta de compostaje y laboratorio de desactivación de la Universidad del Cauca, respectivamente. Se desarrolla el cursograma analítico del ensayo BATACS, para tener una idea detallada de tiempos y movimientos, ver Anexo 4.12.

Figura 26. Plano de distribución de la nueva célula de proceso BATACS



Fuente: propia, enero de 2015

Figura 27. Diagrama de recorrido de la nueva célula de proceso BATACS.



Fuente, propia, enero 2015.







4.3 ESPECIFICACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS

La nueva célula de proceso de biodegradación anaerobia está compuesta por cuatro unidades: a) Unidad de preparación de FORSU, b) Unidad de preparación de inóculo c) Unidad de biodegradación y d) Unidad de caracterización; equipos e instrumentos que los componen se eligen de acuerdo con lo consignado en las secciones 3.1.1 y 3.2.2; a continuación se presentan los equipos que conforman la unidad de preparación de FORSU, ver cuadro 49, los equipos de las demás unidades se describen en el Anexo 6 “ESPECIFICACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS”. Para más información, consultar fichas técnicas de equipos en la carpeta “Anexo FT equipos” en el CD adjunto a este documento

4.3.1 Equipos unidad preparación de FORSU








Los equipos que conforman la unidad de preparación de FORSU se detallan en el Cuadro 49.

Cuadro 49. Equipos Unidad de preparación de FORSU

Equipo	Referencia	Rango	Estado	Función	Imagen
Bidón de polietileno	Genérico	Capacidad: 15l (16Kg)	Comprar	Almacenar cáscara de vegetales	
Bidón de polietileno	Genérico	Capacidad: (10Kg)	Comprar	Almacenar cáscara de frutas	
Bidón de polietileno	Genérico	Capacidad (10Kg)	Comprar	Almacenar cáscara de carbohidratos	
Bidón de polietileno	Genérico	Capacidad: (9Kg)	Comprar	Almacenar cáscara de proteínas	
Bidón de polietileno	Genérico	Capacidad: (16Kg)	Comprar	Almacenar cáscara de inóculo líquido	
Bidón de polietileno	Genérico	Capacidad: (50 Kg)	Comprar	Para almacenar FORSU	

Continúa...

Cuadro 49. (Continuación)

Balanza de precisión 12Kg	Kern Gab-12K0.1N	Capacidad: 12 Kg \pm 0.001 Kg	Disponible	Pesado de material orgánico	
Cuchillo	Genérico	Estándar	Comprar	Corte de FORSU	
Espátula	Genérica	Grande	Disponible	Esparcir FORSU	
Montaje de secado	Diseño	Malla: 0.1 – 0.5 cm	Comprar	Secado inicial FORSU	
Horno de secado grande	FD 240 Binder	Capacidad 1l (0-300°C \pm 0.1)	Disponible	Secado de FORSU	
Molino de martillo cuchillas	Triturador picador TP 8 Penagos	Diámetro tamices: 0.2 - 6.0 mm	Comprar	Molienda FORSU	
Recipiente de polietileno	Genérico	Capacidad: 50 ml	Comprar	Almacenar, y transportar FORSU que va a preparación de inóculo	

Fuente: propia, enero de 2015

4.4 COSTEO DEL ENSAYO BATACS Y PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN

La implementación de la nueva célula de proceso, requiere equipos existentes y otros que se deben adquirir comercialmente, demandando una inversión de ciento setenta y ocho millones, cuarenta y ocho mil quinientos cincuenta y dos pesos colombianos (\$178.048.552,0 mcte) aproximadamente; la inversión principal es en equipos para preparación de inóculo y ensayo de biodegradación (\$ 143.922.400). Se detalla el coste de inversiones fijas, ver cuadro 50, para mayor información ver Anexo 7 “COSTEO DEL ENSAYO BATACS Y PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN”.

Cuadro 50. Resumen de inversiones fijas en equipos

EQUIPOS	VALOR (\$)
Equipos preparación inóculo y ensayo de biodegradación	143.922.400
Equipos estación almacenamiento	2.400.000
Equipos de seguridad industrial	19.390.000
Equipos de respaldo energético	8.600.000,0
Equipos de monitoreo y reportes	3.736.152,0
TOTAL	178.048.552,0

Fuente: propia, enero 2014

Se consideraba necesario cuantificar el costo de producción del Ensayo BATACS y de 6 pruebas de caracterización, relacionando costos de materias primas e insumos, costos de mano de obra y de servicios de pruebas en laboratorios externos, sin embargo, no se tenía información sobre los precios de los mismos, sólo sus cantidades; en los numerales 7.2, 7.3 y 7.4 del Anexo, se presentan cuadros para registrar ésta información.

Se realiza el estudio de costo de consumo energético del ensayo BATACS y las pruebas de caracterización, ver cuadro 51, considerando los tiempos activos de equipos y el valor kWh Industrial², para información detallada, ver Anexo numeral 7.5.

Cuadro 51. Costo consumo energía eléctrica ensayo BATACS con pruebas de caracterización

Consumo	Valor consumo (\$)
Ensayo BATACS	679.438,84
Prueba densidad	28,74
Pruebas humedad, sólidos totales y volátiles	4.577,3
Prueba alcalinidad	171,35
Prueba pH	33,04
TOTAL	684.249,27

Fuente: propia, enero 2015

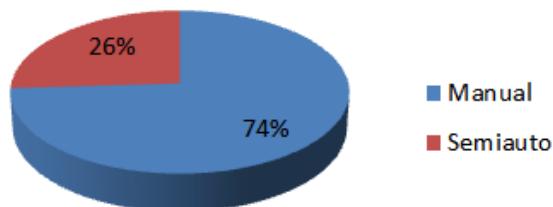
² El valor kWh a de enero de 2015 está en 373,836 suministrado por la Compañía Energética del Occidente.

4.5 DIAGNÓSTICO PROCESO BATACS Y CÉLULA NUEVOS

4.5.1 Tipo de automatización y grado de dificultad del proceso BATACS nuevo

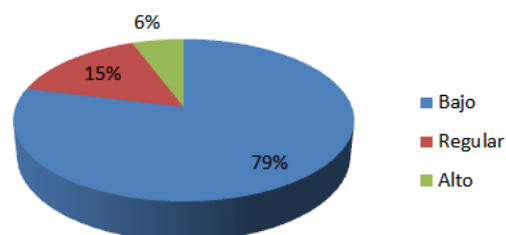
Se determina el nivel de automatización y grado de dificultad para el nuevo proceso BATACS encontrando que es 74% manual; ver figura 28. Presenta un nivel de dificultad bajo del 79%, 15% regular y 6% bajo, ver figura 29.

Figura 28. Tipo de automatización ensayo BATACS nuevo
Tipo de automatización ensayo BATACS



Fuente: propia, enero 2015

Figura 29. Grado de dificultad ensayo BATACS nuevo



Fuente: propia, enero 2015

La célula de proceso nueva presenta un nivel automatización cero³, enfocada sólo a instrumentación, donde se garantiza un adecuado desempeño de la acción microbiana en el ensayo, precisión y seguridad en resultados de pruebas.

4.5.1 Análisis de los modelos ISA S.88

El nuevo proceso BATACS basado en los protocolos del grupo CYTBIA (Camacho, 2014), es un proceso tipo batch de tres etapas, dos batch y una semi continua, con celda multi producto, donde los productos son los servicios (ensayo BATACS y seis pruebas de caracterización). El ciclo del proceso del Ensayo BATACS se estima en 60 días, 74% manual. Se realiza un análisis de los tres modelos desarrollados, basados en ISA S.88.

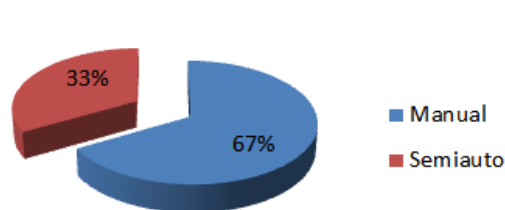
Modelo de proceso: presenta manufactura flexible; configurado para obtener siete servicios; el ensayo BATACS tiene ruta única; consta de tres etapas: preparación de FORSU, preparación de inóculo y ensayo de biodegradación, la primera tiene 2 operaciones y 11 acciones de proceso, la segunda tiene 6 operaciones y 23 acciones de proceso, la tercera tiene 6 operaciones y 44

³ La Pirámide CIM (*Computer Integrated Manufacturing*) establece una jerarquía de comunicaciones, según los requerimientos, de cinco niveles,: 0) instrumentación 1) control 2) supervisión 3) Planta y 4) Factoría (Barragán, 2014).

acciones de proceso, para un total de 78 acciones de proceso, ver cuadro 27. En los protocolos se excluyen actividades de limpieza.

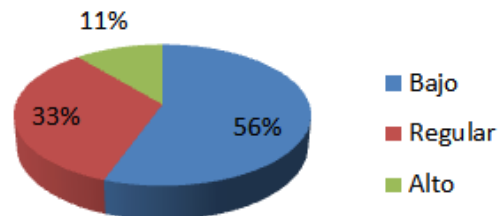
Modelo de procedimiento: el protocolo del grupo CYTBIA , establece tres procedimientos de unidad: preparación de FORSU, preparación de inóculo y Ensayo de biodegradación; el primero tiene 2 operaciones y 11 fases, el segundo tiene 6 operaciones y 23 fases, el tercero tiene 6 operaciones y 44 fases, para un total de 78 fases de proceso, ver cuadro 30; en general el procedimiento presenta bajo nivel de dificultad en la realización de tareas del laboratorista, aunque la tecnología utilizada es 74% manual. La etapa de preparación de FORSU es 67% manual, con un grado de dificultad 56% bajo, ver figuras 30 y 31.

Figura 30. Tipo de automatización preparación de FORSU



Fuente: propia, enero 2015

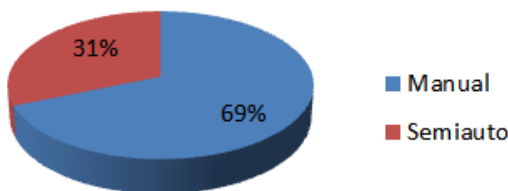
Figura 31. Grado de dificultad preparación de FORSU



Fuente: propia, enero 2015

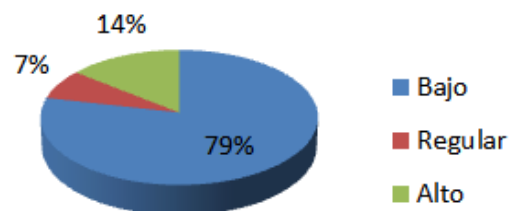
La etapa preparación de inóculo es 69% manual y el grado de dificultad es 79% baja, ver figuras 32 y 33.

Figura 32. Tipo de automatización preparación de inóculo



Fuente: propia, enero 2015

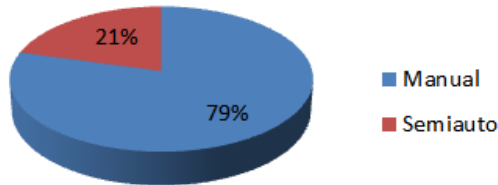
Figura 33. Grado de dificultad preparación de inóculo



Fuente: propia, enero 2015

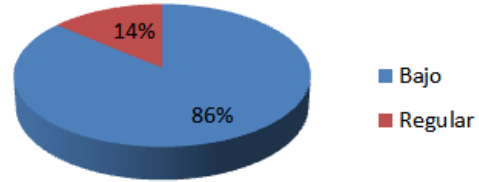
La etapa ensayo de biodegradación se realiza 79% manualmente y tiene un grado de dificultad bajo del 86%, ver figuras 34 y 35.

Figura 34. Tipo de automatización ensayo de biodegradación



Fuente: propia, enero 2015

Figura 35. Grado de dificultad ensayo de biodegradación



Fuente: propia, enero 2015

Modelo físico: la célula de biodegradación anaerobia es tipo batch, multi producto con celda multi producto. Los lazos de control de temperatura son cerrados con instrumentos, mientras que el lazo de control de pH para preparación de inóculo es cerrado por laboratorista; la célula es nivel 0 de automatización, la única etapa que presenta supervisión es la de “Ensayo BATACS”. Los equipos en su mayoría son de accionamiento manual, 74%, ver figura 28.

4.6 PATRIMONIO TECNOLÓGICO

Un inventario tecnológico aportará a la célula de proceso una visión de sí misma y le permite identificar el origen de sus ventajas competitivas; se recomienda realizar un inventario tecnológico, para ello, se parte por clasificar los equipos según el tipo de tecnología: a) básica, ver cuadro 52, b) periférica cuadro 53. Los equipos de núcleo duro⁴ y diferenciación son Biogas Batch Fermentation System y cromatógrafo de gases.

Cuadro 52. Tecnología básica del laboratorio de Biodegradación Anaerobia

Equipos de calentamiento	Equipos de trituración	Equipos de agitación
Horno de secado grande	Molino industrial	Plancha de agitación magnética
Horno de secado pequeño	Molino analítico	Sistema de agitación biodigestor
Mufla	Equipos de refrigeración	Equipos de incubación
Chiller	Nevera	Biogas Batch Fermentation System
Baño María		Biodigestor

Continúa

⁴ Tecnologías de núcleo duro: aportan más valor, pues en ellas residen las principales competencias de la empresa. Tecnologías periféricas: sirven de apoyo o complemento. Tecnologías de diferenciación: sustentan la competitividad de las empresas, pues ellas aportan a los factores críticos de éxito, aportando a la estrategia tecnológica. Tecnologías básicas: no aportan a la estrategia tecnológica (Consejo Nacional para Investigaciones Científicas y Tecnológicas, 2014).

Cuadro 52. (Continuación)

Equipos de pesado	Equipos de medición	Equipos de reportes	
Balanza de precisión 12k	Sensor de temperatura pT100 con transmisor	Computador	
Balanza de 220g	Sensor indicador pH	Impresora	
Equipos caracterización	Flujómetro de gases	Calculadora científica	
	Termómetro de vidrio	Tablet	
	Densidad	Higrómetro	Software, ADC, interfaz Ritter
	Humedad	Barómetro	
Sólidos totales y volátiles	Cromatógrafo de gases		
Alcalinidad			
pH			

Fuente: propia, enero 2015

Cuadro 53. Tecnología periférica

Equipos de respaldo energético	Equipos de seguridad industrial	Almacenamiento
Planta eléctrica de emergencia	Cabina extractora de gases	Almacenamiento de reactivos
UPS	Chimenea	Almacenamiento de residuos químicos
	Ventilador vertical	Almacenamiento de FORSU
	Ventiladores de pared	Almacenamiento de equipos
	Extintores	
	Equipo de neutralización	

Fuente: propia, enero 2015

5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 CONCLUSIONES

En el capítulo 1 se realizó una exploración bibliográfica sobre contaminación ambiental mundial causada por RSU, especialmente por plástico; presentando 3 alternativas para el control de estos residuos. Se exponen 3 organismos y 20 estándares internacionales destacados en biodegradación aerobia y anaerobia; se exponen 5 definiciones de material biodegradable, 7 técnicas de medición de biodegradación aerobia y 6 anaerobias; se especifican investigaciones en materiales biodegradables realizadas por empresas y entidades de investigación mundiales de 1987 al 2014; se describen los procesos de biodegradación aerobia y anaerobia; se presentan 3 equipos automatizados de biodegradación aerobia y 3 anaerobias; se describe el proceso BATACS y la célula de biodegradación del protocolo implementado por Camacho y Aley (Camacho & Aley, 2012) con el estándar ASTM D5511-02. Es importante notar que el grupo CYTBIA ha investigado, desarrollado y generado un inóculo metanogénico estable, en lugar de utilizar uno comercial.

En el capítulo 2, con respecto al protocolo implementado por Camacho y Aley (Camacho & Aley, 2012) se desarrolló la ingeniería conceptual, presentando la cadena de valor, entradas y salidas de materias primas y flujos energéticos, diagrama de flujo en bloques por etapas y por operaciones; basado en la norma ISA 88, se realizan los modelos de proceso, físico y de control procedimental; se hace el diagnóstico del proceso y célula realizando inspección visual interna y externa de la célula, nivel de dificultad y de automatización, nivel de automatización de la célula, análisis de modelos, necesidades de cliente y valoración de pertinencia del proceso; finalmente se presentan los requerimientos de proceso de la nueva célula de proceso solicitada por el grupo CYTBIA, en el marco del desarrollo del proyecto de Sistema General de Regalías, para prestar servicios a organizaciones externas. En este capítulo se encuentra que la célula es de manufactura rígida, tipo batch de ruta única, uni producto, compuesta por tres unidades: las dos primeras tienen 11 módulos equipo con 9 módulos de control y la tercera tiene 7 módulos equipo e igual número de módulos de control; el proceso consta de 2 etapas: la primera tiene 4 operaciones y 18 acciones de proceso, la segunda tiene 2 operaciones con 17 acciones de proceso; a su vez presenta 2 procedimientos de unidad, el primero tiene 4 operaciones con 18 fases, la segunda tiene 2 operaciones y 17 fases; el ciclo del proceso es de 92 días; el procedimiento presenta un alto nivel de dificultad en la realización de operaciones porque la tecnología es 73% manual donde se requiere de intervención y monitoreo constante y los lazos de control de pH y de temperatura son cerrados por acción humana; el proceso presenta un nivel de dificultad en la realización de fases alto del 49% y muy alto 6%. La tecnología de equipos es nivel 0 de automatización, en su mayoría son de accionamiento manual; no cuentan con

suministro de energía eléctrica continuo; se consignan los requerimientos de proceso (8 generales, 9 de automatización y 4 hardware) manifestados por el grupo CYTBIA para prestar servicios a organizaciones externas, se considera pertinente hacer una división entre ensayo de biodegradación y pruebas de caracterización, para brindar flexibilidad al proceso y ofrecerlos como servicios independientes. Se realiza la estandarización del proceso mediante modelos ISA S.88.

En el capítulo 3, se desarrolló la ingeniería básica de la propuesta de automatización con los nuevos protocolos del grupo CYTBIA (Camacho, 2014) de acuerdo con los requerimientos de proceso y célula manifestados; se realizan los modelos de proceso, físico, control procedimental y de recetas, basados en ISA S.88 para el ensayo de biodegradación basado en el estándar ISO 15985 y 6 pruebas de caracterización; se presenta la cadena de valor nueva, 13 diagramas de flujo de proceso, 7 P&ID y se especifican las variables de proceso. En este capítulo, se genera flexibilidad a la célula de proceso modelando el ensayo BATACS y las pruebas de caracterización por separado; se seleccionan los equipos de la nueva célula, reutilizando algunos de los laboratorios de Reología y Biodegradación y los restantes serán adquiridos comercialmente; la etapa “preparación de inóculo” es semicontinua para garantizar la disponibilidad de este producto, mientras que la etapa “ensayo de biodegradación” y las pruebas de caracterización son tipo batch. Con los modelos de receta de control se especifican los materiales, insumos, subproductos, salidas, parámetros, equipos y procedimiento requeridos para el ensayo de biodegradación y para cada una de las pruebas de caracterización. Se tenía la expectativa de llegar a un nivel de automatización “1”, donde se incorporara un PLC que estaba disponible para controlar el proceso, sin embargo, el investigador laboratorista no consideró indispensable su uso, por tanto la propuesta se desarrolló con nivel “0” de automatización.

En el capítulo 4, se desarrolló la ingeniería detallada de la propuesta de automatización, mediante la especificación técnica de instrumentación y equipos, diagrama de distribución y diagrama de recorrido; se hace estudio de costos de la propuesta, diagnóstico del nivel de automatización y grado de dificultad de operaciones, finalmente, se analiza el patrimonio tecnológico adquirido.

El trabajo de grado aporta al grupo CYTBIA en la ejecución del proyecto del Sistema General de Regalías al documentar el protocolo de Ensayo de Biodegradación bajo el estándar ISA 88, garantizando información clara, organizada y detallada del Ensayo BATACS y 6 pruebas de caracterización.

Este trabajo aporta al grupo CYTBIA información sobre el estado de equipos de la célula de hidrolisis y de la célula BATACS anterior, para su reutilización y condensa información sobre especificaciones técnicas de equipos de la nueva célula de proceso, para tener conocimiento del inventario tecnológico. Se

recomiendan equipos para: agitación de líquidos en biodigestor, indicadores de temperatura, molino industrial, equipos de respaldo energético y de seguridad industrial.

Este trabajo aporta al grupo CYTBIA al proponer una estación de almacenamiento de materias primas, reactivos, residuos para la célula de proceso.

Este trabajo aporta al grupo CYTBIA un procedimiento de manejo de residuos químicos y orgánicos.

La norma ISA 88 es una herramienta con la cual es posible estandarizar ensayos de biodegradación y pruebas químicas.

El concepto de ingenierización es importante para proyectos de investigación interdisciplinarios, donde la interrelación con personas de distintas áreas de conocimiento pueden ser aprovechadas y agregar valor a las investigaciones siempre y cuando exista flexibilidad y pensamiento abierto hacia otras disciplinas.

5.2 RECOMENDACIONES

Discutir sobre el incremento del nivel de automatización del laboratorio de Biodegradación Anaerobia para hacerlo más competitivo, considerando un software de supervisión para control y monitoreo de variables del proceso.

Incorporar a los biorreactores un sistema de agitación aumentar versatilidad.

Realizar modelo de materiales y equipos y diseñar un modelo de segmento de seguridad industrial basado en la norma ISA 95.

Se recomienda realizar un inventario tecnológico de la célula de biodegradación.

Realizar un estudio de costo para establecer el costo asociado al Ensayo BATACS y las pruebas de caracterización, en este sentido, se recomienda registrar la información de los cuadros: costo de materia prima e insumos, costos mano de obra directa, costos en consumo energético, costos en servicio de pruebas externas, ver Anexos numerales 7.2, 7.3 y 7.4.

Se recomienda que se registren los tiempos y distancias del cursograma analítico realizado, ver Anexo 4.12, así como realizar un análisis hombre-máquina para optimizar tiempos de producción.

5.3 TRABAJOS FUTUROS

Diseñar e implementar un sistema de control por dosificación gota a gota para control de suministro de base en el control de pH.

Diseñar e implementar un sistema de alimentación y respaldo energético para el Centro de Desarrollo Tecnológico.

Desarrollar e implementar el proceso de trazabilidad, considerando trazabilidad interna y si es posible extender la trazabilidad hacia adelante y atrás para involucrar proveedores y clientes.

BIBLIOGRAFÍA

ABOUT. (2014). Vida Verde: Obtenido de: <http://vidaverde.about.com/od/Reciclaje/a/La-Historia-Del-Gran-Parche-De-Basura-Del-Pacífico.htm->; www.vidaverde.about.com.

ACOREMA. (2010). El mar se ahoga, sálvalo. Obtenido de: http://www.delphinschutz.org/informationmaterial/schutzprojekt-peru/Booklet_The_Sea_is_Drowning_Save_it.pdf

Administración Nacional Oceánica y Atmosférica. (2014). ¿Cuál es el Gran Parche de Basura del Pacífico? Obtenido de: <http://oceanservice.noaa.gov/facts/garbagepatch.html>

AENOR. (2014). Certificación de Bolsas Reutilizables UNE 53942.

AHRING, B. K. (1994). Status on science and application of thermophilic anaerobic digestion". *Water science and Technology*, 241-249.

AIMPLAS. (2014). Natruck "Desarrollo de un nuevo Bio-compuesto a partir de recursos renovables con una mejor resistencia térmica y fuego para fabricar una parte interna de camiones con acabado superficial de alta calidad."

AMBIENTUM.COM. (2014). Obtenido de: <http://www.ambientum.com/>

ASTM. (2002). ASTM D5511-02 Standard Test Method for Determining Anaerobic Biodegradation of Plastic Materials Under High-Solids Anaerobic-Digestion Conditions. West Conshohocken, PA: www.astm.org. Obtenido de: <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D5511-02.htm>

ASTM . (1994). "Standard Specification for Compostable Plastics" ASTM D 5488-94d. Manual NE Albuquerque. , NM, EE.UU.

ASTM. (2003). ASTM D6400, ISO/DIS 1708.

BALJIT, S., & SHARMA, N. (2008). *Polymer Degradation and Stability. Mechanistic implications of plastic degradation.* (vol. 93 ed.).

BARNES, D., GALGANI, F., THOMSON, R., & BARLAZ, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments 1985-1998. *Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences.* 2009.

BARRAGÁN, A. (2014). Jerarquización de comunicaciones. Obtenido de: http://www.eici.ucm.cl/Academicos/lpavesi/archivos/Apuntes/Apuntes_Arq_de_Comp_I/Transparencias_Tema2_Jerarquizacion_de_las_Comunicaciones.pdf

BAST. (2013). Recuperado el 10 de agosto de 2014, de Empresa pionera en plásticos biodegradables BAST: Obtenido de: http://www.basf.es/ecp1/News_spain/BASF_empresa_pionera_en_plasticos_biodegradables

BAYLEY, J. E., & OLLIS, D. F. (1986). "Biochemical engineering fundamental". McGraw-Hill.

BIOPROCESSCONTROL. (2011). AMPTS II. An evolution in methane potential analysis. Obtenido de: <http://www.bioprocesscontrol.com/en/products/ampts/>

BOUALLAGUI, H. T.-S. (2005). Process Biochemistry. Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. (Vol. vol. 40). Tunis, Tunisia.

CAMACHO, R., & ALEY, J. (2012). Biodegradación anaerobia de empaques biodegradables bajo digestión termófila en altas concentraciones de sólidos. Popayán, Cauca, Colombia: Universidad del Cauca.

CAMACHO, R. (2014). Protocolo CYTBIA para la Realización de Ensayo de Biodegradación Anaerobia basado en ISO 15985. Popayán, Cauca, Colombia: Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Agrarias.

CASTELLÓN, H. (2010). Plásticos oxo-biodegradables vs. Plásticos biodegradables: ¿Cuál es el camino?. (p. 2). España.

CHANDRA, R., & RUSTIGI, R. (1998). Progress in Polymer Science: Biodegradable Polymers (Vol. Vol. 23).

COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN. (2014). Comité Europeo de Normalización: Quiénes somos. CEN

COMISIÓN EUROPEA. (2010). BIO Intelligence Service – BIOIS. Plastic waste in the Environment

DEGLI I, F. (2005). Biodegradation Behaviour of Polymers in the Soil En: Handbook biodegradable polymers. United Kingdom, Bastioli C: Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR.

DEMARCO, S. (2005). Advances in Polyhydroxy alcanoate Production in Bacteria for Biodegradable Plastic. MMG 445 Basic Biotechnology e Journal.

DURAN, J. A. (2005). Formulación para la obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de yuca, variedad MBRA 383. Cali, Valle del Cauca: Universidad De San Buenaventura Cali.

EASTMAN, J. y. (1981). Journal of Water Pollution Control Federation. Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase of anaerobic digestion. (Vols. vol. 53, no. 3).

EN, C. E. (2000). EN 13432. “Requisitos para los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación. Criterios del régimen de prueba y evaluación para la aceptación final del envase”. Londres, Inglaterra: British Standards Institution BSI.

EN, C. E. (2003). EN 14046: Envases y embalajes. Evaluación de la biodegradabilidad aeróbica última y de la desintegración de los materiales de envase y de embalaje bajo condiciones controladas de formación de compost. Método mediante el análisis del dióxido de carbono. España: Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR .

FUNDACIÓN COMPROMISO Y TRANSPARENCIA. (2014). Islas de plástico, Compromiso empresarial un problema a la deriva. Obtenido de: <http://www.compromisoempresarial.com/carrusel/2014/06/islas-de-plastico-un-problema-a-la-deriva/>, Ed.

GLOBALGARBAGE.ORG. (2009). Dos expediciones salen en busca de la gran isla de basura del Pactico. Obtenido de: <http://www.globalgarbage.org/035719630054045.pdf>. 11 de Agosto de 2009

GONZÁLEZ, G., RUSTRIÁN, E., HOUBRON, E., & ZAMORA, A. (2008). Impacto de la tasa de humedad en la biodegradación de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Veracruz, México Obtenido de: Revista latinoamericana de Recursos Naturales: http://antiguo.itson.mx/drn/Revista/volumenesRevista/vol_4_2008/pdf/numero3/Art_33_Gonzalez.pdf

GONZÁLEZ, W., & MANHINI, H. (2003). Ciencia de los materiales. Ciencia y Tecnología. No es fácil ser verde. España.

HOORNWEG, D., & BHADA-Tata, P. (2012). ¡What a waste!. A Global Review of Solid Waste Management. The world bank.No 15. Whashington D.C.

HOORNWEG, D., BHADA-TATA, P., & KENNEDY, C. (2013). Environment: Waste production must peak this century. Nature, 502(7473), 615–617.

ICIS CHEMICAL BUSINESS. (1996). Monsanto to buy Biopol from Zeneca.

ICT SL INSTRUMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA. (2014). Adaptador Kjeldahl anti-salpicaduras recto. Obtenido de: <http://www.ictsl.net/productos/vidrio/adaptadorkjeldahlantisalpicadurasrecto.html>
Institución de Científicos de Oceanografía. (2009). Collections from Scripps North Pacific Ocean. Institución de Científicos de Oceanografía.

INTELIGENTE, E. (2010). Plástico biodegradable producido con almidón extraído de la papa. ENFASIS PACKAGING. Mayo de 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. (2000). ISO and CEN.

ISA. (2010). ANSI/ISA-S88. 2010. United States: ANSI/ISA.

ISO. (2014a). ISO 15985:2014. Plastics -- Determination of the ultimate anaerobic biodegradation under high-solids anaerobic-digestion conditions -- Method by analysis of released biogas. Obtenido de: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:15985:ed-1:v1:en>

ISO. (2014b). ISO About us. ISO, International Organization for Standardization.
Itävaara, M., Karjoma, S., & Selin, J. (2002). Biodegradation of polylactide in aerobic and anaerobic thermophilic conditions. *Chemosphere*, 46, 879–885.

KPMG International. (2010). The future of the chemical industry.

LAFFERTY, R., KORSATKO, B., & KORSATKO, W. (1998). Microbial Production of poly B hidroxybutyric acid. *Biothechnology*, 6b, 135 – 176.

LUCAS, N., BIENAIME, C., BELLOY, C., QUENEUDEC, M., SILVESTRE, F., & NAVA-SAUCEDO, J.-E. (2008). Polymer biodegradation: Mechanisms and estimation techniques. *Chemosphere*, vol. 73, 429-442.

MATO, Y., ISOBE, T., TAKADA, H., KANEHIRO, H., OHTAKE, C., & KAMINUMA, T. (2001). Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environmental Science and Technology*, 35(2), 318–324

MENESES, J., CORRALES, C., & VALENCIA, M. (2007). Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca, 57–67. *Microbiolog, M. D. E. L. O. S. S., & Grupo, A. (n.d.). Resúmenes de los Seminarios Microbiología Ambiental GRUPO 27-1, 1–28.*

MOJO, S. (2008). Plásticos Biodegradables, ¿Qué son? y su relación con los RSU. Revista “El Empaque.”

MONSANTO. (2001). Metabolix Purchases Biopol Assets From Monsanto.

NTC-ISO/IEC. (2005). COLOMBIANA NTC-ISO / IEC. Bogotá, D.C. Obtenido de: <http://www.itp.gob.pe/normatividad/demos/doc/Normas Internacionales/Union Europea/ISO/ISO17025LaboratorioEnsayo.pdf>

PALMA, J., VALENZUELA, P., & EPINACE, R. (1999). Reducción de los tiempos de estabilización en rellenos sanitarios operados con recirculación de lixiviados. Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (págs. 1-6). Chile: AIDS.

PEDCTICAUCA. (2012). Investigación y desarrollo de empaques biodegradables. PedCTi Cauca. Popayán, Cauca, Colombia. Obtenido de: <https://dl.dropboxusercontent.com/u/42886525/Blog CTI/Descargas/Pesta%C3%B1a Regalias/Investigacion y Desarrollo de Empaques Biodegradables.pdf>

PNUMA. (2009). Marine Litter : A Global Challenge.

PRENDO Aparatos de laboratorio y SEV Vidrio Científico. (2011). Adaptador puente de destilación con conexión para termómetro. Obtenido de: <http://www.sevmexico.com/categorias/productos/?pr=79>

PRETTING, G., & BOOTE, W. (2010). Plastic Planet (p. 8). Ornage Press, Friburgo.

RAZON.ES, L. (2012). Desarrollan nuevos polímeros biodegradables para usos médicos - La Razón digital.

RIOS, L. M., JONES, P. R., MOORE, C., & U, N. (2010). Quantification of persistent organic pollutants adsorbed on plastic debris from the Northern Pacific Gyres. Eastern Garbage Patch. Journal of Environment Monitorin, 2010.

RIOS, L. M., MOORE, C., & JONES, P. R. (2007). Persistent organic pollutants carried by synthetic polymers in the ocean environment. Marine Pollution Bulletin, 54, 1230–1237.

RITTER. (2014). Biogas Batch Fermentation System. Obtenido de: <http://www.ritter.de/>

RUDNIC, E. (2008). Compostable polymer materials – definitions, structures and methods of preparation. EN: Compostable polymer materials, Kidlington. Elsevier Ltd.

SAIDA GROUP. (2014). SAIDA MODA-6. Obtenido de: http://saidagroup.jp/fds_en/products/moda-6#pagetop

SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL E.E.U.U. (2013). Programa de Desechos Marinos. Recuperado el junio de 2014, Obtenido de: <http://response.restoration.noaa.gov/about/media/how-big-great-pacific-garbage-patch-science-vs-myth.html>

TETRA PAK. (2013, June). Braskem suministrará a Tetra Pak plástico vegetal para sus envases de cartón en Brasil. Sao Pablo, Brasil.

TINOCO, R. M. (2005). Plásticos biodegradables, 22–25.

TIPHAINE, R. (2008). Preparación y caracterización de nano compuestos en base PLA. España: Universidad Politécnica de Cataluña.

TORRES, F. (2010). Desarrollo de envases y embalajes biodegradables y compostables para la mejora de la competitividad agroindustrial. Lima, Perú.

TRAXCO. (2009). Bolsas biodegradables - Bioplásticos con almidón de patata. Utebo (zaragoza).

UMIC-SCIENCE.COM. (2011). Umic LAB3 UMIC on-line. Obtenido de: <http://www.unic-science.com/sp/productos/testar-y-analizar/biomethan/umic-lab3.php>

UNIVERSIDAD DEL CAUCA. (2014). Tres Patentes de la Superintendencia de Industria y Comercio www.unicauca.edu.co. (U. d. Prensa, Ed.) Obtenido de: <http://www.unicauca.edu.co/orii/es/bitacoras/unicauca-recibi%C3%B3>

URIBE, S. (2006). Propuesta de Plan de Manejo para los Residuos Sólidos Urbanos del Fraccionamiento Urbano Burgos – Buganbillas. Morelos, México.

VAN DER ZEE, M. (2005). Handbook biodegradable polymers: Biodegradability of polymers-mechanisms and evaluation methods, United Kingdom, Bastioli C. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR.

VEEKEN, A. (2000). Effect of pH and VFA on hydrolysis of organic solid waste. Journal of Environmental Engineering: Obtenido de: <http://www.enzyme.chem.msu.ru/ekbio/article/JEE00-12.pdf>

VILLADA, H. S. (2007). Programa: Uso de productos y subproductos de yuca (Manihot esculenta Crantz) en el desarrollo de empaques biodegradables. MINISTERIO DE AGRICULTURA, código proyecto 2008z3816, sección termo formados. Colombia: Universidad del Cauca.

WILLIAMS, S. F., & MARTIN, D. P. (1996). Applications of PHAs in Medicine and Pharmacy (p. 4). Cambridge, U.S.A.

WOJTOWICZ, A. (2010). Biodegradability and Compostability of Biopolymers. Thermoplastic Starch: A Green Material for Various Industries. Weinheim, Germany: L. P. B. M. Janssen and L. Moscick.

WURPEL G., VAN DEN AKKER J., PORS J., T. W. (2011). Ten Wolde, Plastics do not belong in the ocean. Towards a roadmap for a clean North Sea (p. 39). Amsterdam.

YAGI, H. (2009). Anaerobic biodegradation tests of poly(lactic acid) and polycaprolactone using new evaluation system for methane fermentation in anaerobic sludge vol. 94. Polymer Degradation and Stability, 1397-1404.