

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL



INSTITUTO DE CIENCIAS MATEMATICAS

ESCUELA DE GRADUADOS

TESIS DE GRADO

PREVIO A LA OBTENCION DEL TITULO DE:  
“MAGISTER EN CONTROL DE OPERACIONES Y  
GESTION LOGISTICA”

TEMA

OPTIMIZACION DE LA CADENA DE PRODUCCION DE POLLO  
UTILIZANDO PROGRAMACION MATEMATICA

AUTOR:

WASHINGTON EDUARDO RODRIGUEZ MONTERO

GUAYAQUIL - ECUADOR

AÑO 2011

# DEDICATORIA

A Emily y Paula, dos de mis grandes amores que a pesar de su corta edad me dieron todo el amor y el apoyo que tanto necesité para continuar con los estudios, el trabajo y mi hogar.

A mi amada esposa, mi gran amor, por su dedicación y esfuerzo para animarme en los momentos más difíciles que pasamos.

A mi madre por haberme dado la vida y por sus invaluable consejos, a mis hermanos que también fueron parte de este logro al darme su apoyo en una época difícil de mi vida. Dios les bendiga.

*Washington Rodríguez*

# AGRADECIMIENTOS

A Dios, ser grande y todopoderoso que me dio la fuerza y sabiduría para no desmayar y lograr culminar con éxito esta gran meta que me propuse hace dos años.

He aquí, tú amas la verdad en lo íntimo, y en lo secreto me has hecho comprender sabiduría ... Salmo 51:6.

A Fernando Sandoya mi director de tesis por su apoyo en el proceso de elaboración del presente trabajo.

A Jorge por su paciencia, sabiduría y apoyo durante todo el proceso de modelización y puesta en marcha de este proyecto.

A todos las personas que de alguna manera hicieron posible el desarrollo de este trabajo.

*Washington Rodríguez*

# **DECLARACION EXPRESA**

La responsabilidad por los hechos y doctrinas expuestas en este Proyecto de Graduación, así como el Patrimonio Intelectual del mismo, corresponde exclusivamente al ICM (Instituto de Ciencias Matemáticas) de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

**Ing. Washington Rodríguez**

# TRIBUNAL DE GRADO

**M.Sc. Fernando Sandoya**  
DIRECTOR DE TESIS

**M.Sc. Guillermo Baquerizo Palma**  
PRESIDENTE TRIBUNAL

**M.B.A. Fabricio Echeverría Briones**  
VOCAL

# **AUTOR DE LA TESIS**

Ing. Washington Rodríguez

# INDICE GENERAL

<b>DEDICATORIA</b>	<b>I</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>II</b>
<b>DECLARACION EXPRESA</b>	<b>III</b>
<b>TRIBUNAL DE GRADO</b>	<b>IV</b>
<b>AUTOR DE LA TESIS</b>	<b>V</b>
<b>INDICE DE FIGURAS</b>	<b>IX</b>
<b>INDICE DE TABLAS</b>	<b>XI</b>
<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS PARTICULARES</b>	<b>2</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>3</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Terminología utilizada en la industria avícola . . . . .	1
1.2 Evolución de la producción de pollo . . . . .	3
1.3 Información general de la organización . . . . .	5
1.4 Características del problema . . . . .	8
1.5 Revisión de la literatura . . . . .	10
1.6 Metodología de solución propuesta . . . . .	15
<b>2 Predicción de parámetros zootécnicos</b>	<b>19</b>

2.1	Introducción . . . . .	19
2.2	Análisis exploratorio de los parámetros zootécnicos . . . . .	19
2.2.1	Prueba de normalidad para los parámetros zootécnicos . . . . .	20
2.3	Predicción de la mortalidad . . . . .	21
2.3.1	Mortalidad zona 1 ( $\%M_1$ ) . . . . .	23
2.3.2	Mortalidad zona 2 ( $\%M_2$ ) . . . . .	24
2.3.3	Mortalidad zona 3 ( $\%M_3$ ) . . . . .	26
2.4	Estimación del peso promedio . . . . .	27
2.5	Predicción de la conversión de alimento . . . . .	31
2.5.1	Conversión de alimento zonas 1 y 3 integrados . . . . .	32
2.5.2	Conversión de alimento zona 2 relacionadas . . . . .	34
2.5.3	Conversión de alimento zona 2 integrados . . . . .	36
2.5.4	Conversión de alimento zona 3 relacionadas . . . . .	37
2.6	Estimación del porcentaje de nacimiento . . . . .	38
2.6.1	Predicción de nacimientos INC1 e INC3 . . . . .	40
2.6.2	Predicción de nacimientos INC2 . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Formulación del modelo matemático</b>	<b>45</b>
3.1	Introducción . . . . .	45
3.2	Secuenciamiento de granjas . . . . .	46
3.2.1	Heurística Glotona . . . . .	47
3.2.2	Heurística 2-Opt . . . . .	48
3.3	Programación de entrega de pollitos bb a granjas . . . . .	49
3.4	Modelo integrado para toda la cadena . . . . .	53
3.4.1	Modelo general . . . . .	53
3.5	Programa de incubación . . . . .	54
3.5.1	Modelo matemático . . . . .	55
3.6	Programa de faenamiento . . . . .	56
3.6.1	Modelo matemático . . . . .	56
3.7	Consumo de alimento . . . . .	57

<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>60</b>
4.1	Secuenciamiento de granjas . . . . .	60
4.2	Programa de ingreso de pollo bb . . . . .	62
4.3	Programa de faenamiento . . . . .	62
4.4	Programa de cargas de huevo fértil . . . . .	62
4.5	Análisis comparativo de los resultados . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>70</b>
5.1	Conclusiones . . . . .	70
5.2	Sugerencias para trabajos futuros . . . . .	71
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>73</b>

# INDICE DE FIGURAS

1.1	Oferta de pollo . . . . .	5
1.2	Curvas de ganancia diaria de peso . . . . .	7
1.3	Proceso de producción de pollo de engorde (Tomado de Satir) . . . . .	17
1.4	Potenciales áreas a optimizar . . . . .	18
2.1	Prueba de Kolmogov-Smirnov . . . . .	21
2.2	Prueba de Kolmogov-Smirnov para los pesos promedio . . . . .	22
2.3	Prueba de Kruskal-Wallis . . . . .	23
2.4	Serie original y diferenciada Zona 1 . . . . .	24
2.5	ACF y PACF residuales para zona1 . . . . .	25
2.6	Serie mortalidad zona 2 . . . . .	26
2.7	ACF y PACF residuales zona 2 . . . . .	27
2.8	Serie original mortalidad zona 3 . . . . .	28
2.9	ACF y PACF residuales para zona 3 . . . . .	29
2.10	Prueba de Kruskal-Wallis para diferencia de medias . . . . .	30
2.11	Curvas de crecimiento zona 1, zona 2 y zona 3 . . . . .	31
2.12	Prueba de Tukey para diferencia de medias . . . . .	33
2.13	Serie FCR y diff(FCR) . . . . .	34
2.14	ACF y PACF de los Residuales zonas 1 y 3 . . . . .	35
2.15	Serie FCR y diff(FCR) zona 2 relacionadas . . . . .	36
2.16	ACF y PACF de los Residuales zona 2 relacionadas . . . . .	37
2.17	Serie FCR zona 2 integrados . . . . .	38
2.18	Funciones ACF y PACF de los residuales zona 2 integrados . . . . .	39
2.19	Serie FCR zona 3 relacionadas . . . . .	40
2.20	ACF y PACF de los residuales zona 3 relacionadas . . . . .	41

2.21	Prueba de Tukey para nacimientos . . . . .	42
2.22	Serie original y diferenciada para INC1 e INC3 . . . . .	43
2.25	Serie ACF y PACF de los residuales . . . . .	43
2.23	Serie ACF y PACF de los residuales . . . . .	44
2.24	Serie original y diferenciada para INC2 . . . . .	44
3.1	Representación de un grafo . . . . .	47
3.2	Unión de vértices para formar un camino 2-Opt . . . . .	49
4.1	Secuencia de ingreso de bb . . . . .	65
4.2	Programa de pollos . . . . .	66
4.3	Programa de incubación . . . . .	67
4.4	Comparativo de ingreso de pollo bb diario . . . . .	68
4.5	Comparativo de ingreso de pollo bb semanal . . . . .	68
4.6	Edades de faenamiento . . . . .	69
4.7	Días de descanso . . . . .	69

# INDICE DE TABLAS

1.1	Oferta de pollo en pie . . . . .	4
1.2	Pesos promedio ( <i>kg</i> ) a diferentes edades . . . . .	6
1.3	Ganancia diaria de peso en gramos . . . . .	7
2.1	Estimadores de los parámetros zona 1 . . . . .	23
2.2	Estimadores de los parámetros . . . . .	25
2.3	Estimadores de los parámetros zona 1 . . . . .	26
2.4	Parámetros de las curvas de crecimiento de Gompertz . . . . .	31
2.5	Estimadores de los parámetros zona 1 y 3 . . . . .	33
2.6	Estimadores de los parámetros zona 2 relacionadas . . . . .	35
2.7	Estimadores de los parámetros zona 2 integrados . . . . .	36
2.8	Estimadores de los parámetros zona 3 relacionadas . . . . .	38
2.9	Estimadores de los parámetros para INC1 e INC3 . . . . .	40
2.10	Estimadores de los parámetros para INC2 . . . . .	42
4.1	Resumen secuenciación . . . . .	61

# **OBJETIVO GENERAL**

El objetivo general del presente trabajo es desarrollar un modelo matemático para la planificación de la cadena de producción de pollos considerando los procesos de incubación, engorde y faenamiento.

# OBJETIVOS PARTICULARES

Los objetivos particulares del presente trabajo son:

- Desarrollar un modelo de planificación de ingreso de pollo bb a granjas de engorde.
- Desarrollar un modelo de planificación de entregas de pollo bb desde incubación a granjas de engorde.
- Desarrollar un modelo de entrega de pollo a plantas de faenamiento.
- Integrar los tres modelos anteriores en un solo modelo para representar a toda la cadena de producción.

# Resumen

La producción industrial de pollo de engorde ha evolucionado de tal manera que la eficiencia en los resultados productivos han elevado la competitividad, siendo hoy en día un factor crucial para la sobrevivencia de los productores. La diferencia se irá marcando entre las empresas que analicen cada eslabón de la cadena de valor, optimizando sus procesos y maximizando la utilización de los recursos. En la actualidad, la programación matemática es muy utilizada en la industria avícola, sobretodo en empresas multinacionales de gran tamaño, siempre buscando mejorar las técnicas de producción en las diferentes áreas y procurando encontrar nuevas maneras de resolver los problemas. En este trabajo se presenta un nuevo modelo de optimización, basado en programación entera mixta que logra determinar un plan de producción de pollos que maximiza la utilización de las capacidades de los distintos centros de producción.

Las preguntas que debemos responder son:

- ¿Qué cantidad de pollos alojar?
- ¿Dónde se deben alojar?
- ¿Cuándo se deben alojar?
- ¿Cuándo se deben sacrificar para cumplir con un presupuesto de venta?

La compañía está integrada verticalmente por tanto el problema involucra a toda la cadena de producción. El objetivo principal es obtener un plan de producción óptimo que garantice el cumplimiento del presupuesto de ventas, respetando los días de vacío sanitario, secuencia de ingreso a granjas y edades de faenamiento.

# CAPITULO 1

## Introducción

### 1.1. Terminología utilizada en la industria avícola

En esta sección definiremos algunos términos que se utilizarán en el resto de capítulos de la presente tesis.

Iniciamos con el primer eslabón de la cadena de producción, la reproducción. Este proceso comienza con la importación de las **reproductoras de un día** de edad, a estas las llamaremos **reproductoras bb**. Utilizaremos cualquiera de las dos formas para hacer referencia a las reproductoras importadas. La pollita antes de las 24 semanas se denomina **pollona**. Una vez que la pollona ha llegado a las 24 semanas de edad, llega a su edad adulta, convirtiéndose en **gallina reproductora**. En esta etapa la gallina inicia su ciclo productivo.

La producción de huevos se divide en:

1. **Huevos fértiles**, que serán los huevos aptos para la incubación, a éstos también se los denomina **huevos incubables**
2. **Huevos infértiles**, que serán huevos no aptos para incubación, también se los denomina huevos no incubables o **huevos comerciales**

Semanalmente las reproductoras envían huevos fértiles al siguiente proceso que es la

incubación, en este proceso existen **máquinas incubadoras** y **máquinas nacedoras**. En las incubadoras, los huevos pasan 18 días y luego se trasladan a las nacedoras, se completa el ciclo de 21 días de incubación y los pollitos que nacen son enviados a las granjas de engorde. A los pollitos de un día de nacidos se los conoce como **pollitos bb**.

En las granjas de engorde, previo a la recepción existe un periodo de acondicionamiento de la granja, que consiste en la limpieza y desinfección de los galpones o casetas en donde se recibirán a los pollos. Este periodo normalmente dura entre 15 y 20 días, dependiendo de la velocidad de producción que se tenga. A este periodo se le conoce como **vacío sanitario**.

En la preparación de la granja se utiliza cascarilla de arroz, este material se esparce uniformemente en los galpones o casetas que recibirán los pollitos bb. A este material se le conoce como **cama**. En cada caseta los pollos permanecerán entre 39 y 47 días, dependiendo del mercado hacia donde se deben enviar. En el caso del pollo procesado, el pollo se puede faenar en edades entre 39 y 42 días. Cuando el pollo está destinado para venderlo en pie, la estadía en granja puede llegar hasta los 47 días, dependiendo del cliente.

La **densidad** se define como la cantidad de pollos por metro cuadrado que ingresan en el galpón. La densidad también puede ser expresada en términos de otros parámetros, así se definen:

1. Número de pollos por comedero.- Es la cantidad de pollos por cada comedero (plato) instalado en el galpón, mientras más comederos haya menor será la densidad y en consecuencia mayor será el acceso al alimento que tendrán los pollos.
2. Número de pollos por bebedero.- Es la cantidad de pollos por bebedero instalado en el galpón, al igual que la densidad por comedero, este parámetro es muy importante para el resultado zootécnico.

También podemos mencionar otros términos muy utilizados en la industria avícola.

1. Programa de luz.- Es la cantidad de horas de luz que se suministra a los pollos

durante la fase de crianza.

2. Aislamiento de techo.- En algunas instalaciones se utiliza un aislamiento de poliuretano para evitar el recalentamiento del galpón por la radiación solar.

A la cadena de producción de pollo de engorde, también se le conoce como producción de **broilers**, porque es un término genérico utilizado para referirse al pollo blanco, indistintamente de su genética. Cuando hagamos referencia al término **pollo de engorde**, significará que se trata de pollos destinados a la producción de carne.

La **compañía en estudio** hará referencia a la empresa integrada verticalmente que tiene toda la cadena de producción de pollos de engorde. Esta empresa está conformada por granjas de reproducción, granjas de engorde de pollos, plantas de incubación y plantas de faenamiento. Estos procesos serán integrados en un solo modelo para la planificación de la producción.

## 1.2. Evolución de la producción de pollo

En la última década la Industria Avícola ecuatoriana ha crecido rápidamente, llegando a duplicarse la producción, las grandes empresas han incrementado la productividad y por tanto la eficiencia en el manejo de los costos también ha mejorado. La tendencia que se observa en el sector es obtener buenos resultados productivos en la menor cantidad de tiempo. Este crecimiento ha llevado a los productores a mejorar día a día los procesos con el fin de mantener la competitividad, en un negocio tan dinámico como el de la crianza de pollos de engorde.

Haciendo un poco de historia, la robustez del pollo de engorde hace 10 años le permitía al productor manejar al pollo con poca técnica, así el peso promedio que el mercado demandaba se lograba entre los 49 y 52 días. El consumo de alimento era de aproximadamente 2.20 veces el peso alcanzado, según datos históricos de la empresa en estudio, el consumo de carne de pollo per cápita en el Ecuador alcanzaban los 13 kg

por habitante <sup>1</sup>, además la demanda de materias primas estaban muy por debajo de la oferta, por tanto los precios eran muy convenientes y los costos de producción bastante bajos, en consecuencia los márgenes altos permitían que la industria ecuatoriana creciera a pasos agigantados.

Del año 2000 al 2005 la industria ecuatoriana de pollos experimentó un crecimiento del 45 %, de igual forma del año 2005 al 2009 el crecimiento fue del 40 %. Como se puede observar en el cuadro 1.1, la producción en el último quinquenio se incrementó en 61 millones de pollos, esto representa un crecimiento del 47 %, la producción en *TM* pasó de 273.000 *TM* en el 2005 a 402.000 *TM* en el 2010. En cuanto al consumo de carne de pollo per cápita, éste aumentó de 17 *Kg* a 29 *Kg* por habitante en los mismos años. Los pesos que el mercado demanda se logran a partir de los 35 días (2.0 *Kg* en pie) y el consumo de alimento <sup>2</sup> a esta edad es aproximadamente 1.6 veces dicho peso.

El cuadro 1.1 resume la evolución de la oferta de pollo en pie y la oferta de carne de pollo en el Ecuador en la última década.

Año	Oferta de pollo <sup>a</sup>	Oferta en <i>TM</i>	Crecimiento
2001	98.177	207.153	9.7 %
2002	103.483	218.349	5.4 %
2003	112.506	237.387	8.7 %
2004	118.267	249.543	5.1 %
2005	129.529	273.306	9.5 %
2006	148.949	314.282	15.0 %
2007	161.994	341.807	8.8 %
2008	170.708	360.193	5.4 %
2009	181.264	382.467	6.2 %
2010	190.334	401.604	5.0 %

<sup>a</sup>Fuente: Proyección realizada por la empresa en estudio

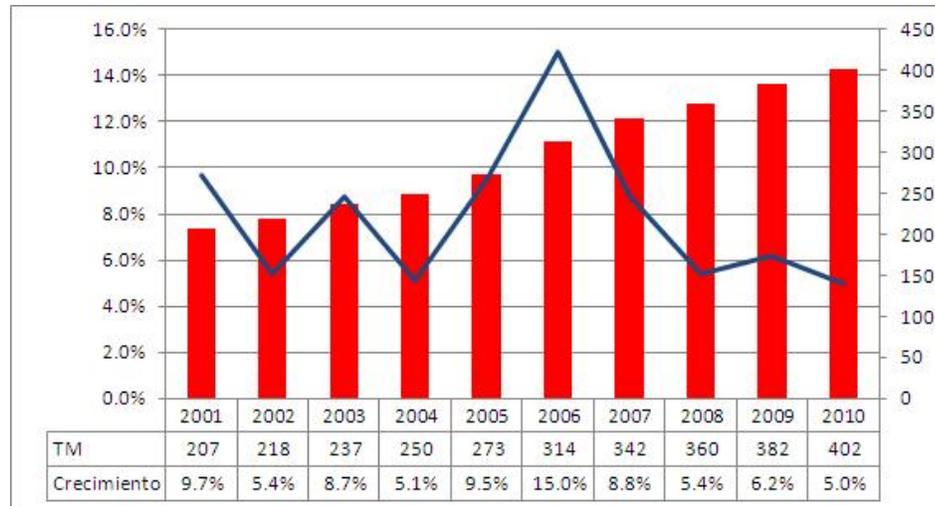
**Tabla 1.1:** Oferta de pollo en pie

La figura 1.1 muestra la evolución de la oferta en unidades.

Las líneas genéticas han evolucionado a la misma velocidad, el pollo de engorde en

<sup>1</sup>Según datos históricos de la empresa en estudio

<sup>2</sup>Este valor depende de la línea genética



**Figura 1.1:** Oferta de pollo

la actualidad está diseñado para ganar la mayor cantidad de peso a partir de los 35 días de edad, de 36 días hasta el faenamiento el ave desarrolla el máximo potencial genético, lógicamente considerando una adecuada nutrición, condiciones ambientales y de manejo ideales.

Los cuadros 1.2 y 1.3 muestran la evolución de la genética de los pollos de engorde en los últimos 4 años, según registros históricos de la empresa en estudio, mientras que la figura 1.2 muestra las curvas de ganancia diaria de peso promedio semanal desde el año 2006 al 2009.

La gran velocidad de cambio que tiene la industria, obliga al productor a ser eficiente a través de toda la cadena de producción, para lograr mejores resultados zootécnicos y financieros.

### 1.3. Información general de la organización

La compañía en estudio es una empresa integrada verticalmente; es decir, desarrolla toda la cadena de producción de pollos, la figura 1.3 muestra el proceso de producción en cada una de sus etapas.

Día	2006	2007	2008	2009 <sup>a</sup>
1	0,04	0,04	0,04	0,04
7	0,16	0,17	0,18	0,20
14	0,35	0,40	0,43	0,47
21	0,77	0,83	0,90	0,98
28	1,33	1,38	1,45	1,54
35	1,92	1,95	2,05	2,14
41	2,25	2,33	2,42	2,45
42	2,40	2,45	2,55	2,64
43	2,45	2,53	2,59	2,67
44	2,54	2,63	2,66	2,68
45	2,57	2,65	2,67	2,72
46	2,61	2,67	2,74	2,79
47	2,65	2,70	2,73	2,80
48	2,67	2,75	2,84	2,93

<sup>a</sup>Línea genética Ross 308

**Tabla 1.2:** Pesos promedio (*kg*) a diferentes edades

El proceso de producción de pollos comienza con la importación de las reproductoras de un día de edad, las cuales inician su ciclo productivo a las 25 semanas de vida y tiene una duración de 40 semanas. A partir de la semana 25 se envían los huevos fértiles a las plantas de incubación, en donde después de 3 semanas habrán nacido los pollitos y estarán listos para el envío a las granjas de engorde. En las granjas de engorde pasarán 42 días en promedio y serán enviados al faenamamiento. Cuando los pollos han alcanzado el peso requerido por el mercado, se envían a la planta faenadora, las granjas deberán pasar a un proceso de desinfección, el mismo que dura entre 15 y 20 días. Después de éste tiempo la granja está lista para ingresar un nuevo lote de producción.

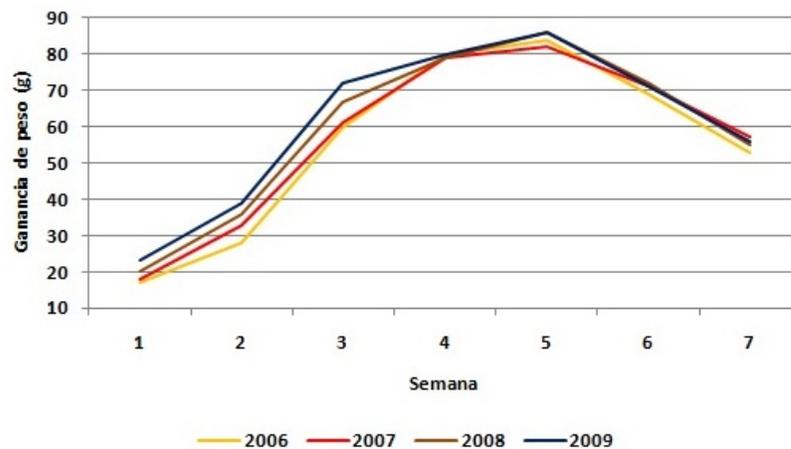
Actores importantes en esta cadena de producción son: la planta de alimentos y el laboratorio, los cuales suministran materias primas para el proceso de engorde, siendo la planta de alimentos la más relevante, ya que en el costo de producción de pollos en pie, el alimento balanceado constituye el 60% del costo total. La figura 1.3 muestra el diagrama del proceso, que en forma resumida hemos descrito.

Las granjas de engorde están divididas en propias e integradas. La empresa vende el pollo bb, el alimento balanceado, medicinas y vacunas al integrado (criador), quien

Semana	2006	2007	2008	2009 <sup>a</sup>
1	17	18	20	23
2	28	33	36	39
3	60	61	67	72
4	80	79	79	80
5	84	82	86	86
6	69	71	72	71
7	53	57	55	56

<sup>a</sup>Línea genética Ross 308

**Tabla 1.3:** Ganancia diaria de peso en gramos



**Figura 1.2:** Curvas de ganancia diaria de peso

se encarga del manejo. Una vez que el pollo ha llegado a la edad de faena, la empresa compra el pollo engordado para ser procesado o vendido en pie.

Cuando los pollos llegan a la planta faenadora pasan por un aturridor para evitar daños en la carcasa, para lo cual reciben pequeñas descargas eléctricas de bajo voltaje. Cuando el ave está aturdida se le corta el cuello para que se desangre utilizando un bisturí, este proceso es manual. Luego de que los pollos se desangran pasan al eviscerado, éste es un proceso mecánico. Cuando las carcasas están evisceradas pasan al chiller en donde son lavados y enfriados con agua a baja temperatura. Enseguida los pollos avanzan hasta un clasificador, en esta etapa el pollo es destinado para despresado o

para pollo entero y finalmente pasa el área de empaque.

Cuando finaliza el faenamiento, el pollo es almacenado en las cámaras a temperaturas bajas, para luego ser trasladados a los centros de distribución para que esté disponible para el cliente.

Las áreas en las que nos concentraremos son las siguientes: Planta de Incubación, Granjas de Engorde y Planta de Faenamiento que se muestran en la figura 1.4

La compañía bajo estudio tiene 110 granjas, de las cuales 89 son granjas tercerizadas (Integrados) y 21 son granjas propias, para el proceso de engorde, cuyas capacidades están entre 20.000 y 329.000 pollos. Las granjas están ubicadas en tres zonas de engorde a las que llamaremos zona 1, zona 2 y zona 3. Las tres zonas tienen indicadores productivos diferentes, los cuales serán estimados en el Capítulo 2. En el área de reproductoras existen 11 granjas ubicadas en las mismas zonas que las granjas de engorde. Los pollitos bb se producen en tres plantas de incubación, dos plantas están ubicadas en la zona 3 y una planta en la zona 2. Los pollos gordos se faenan en tres plantas procesadoras ubicadas una en cada zona de engorde.

## 1.4. Características del problema

La figura 1.3 describe en detalle la cadena de producción de pollos en la empresa que tiene una integración vertical. La compañía en estudio está dividida en zonas de producción, cada zona está formada por cierto número de granjas de engorde con capacidad definida, las granjas están ordenadas en secuencia de ingreso. Los pollitos bb son abastecidos desde tres plantas de incubación, cada planta tiene una capacidad de producción definida y están ubicadas estratégicamente de manera que una planta abastece a una zona en particular. Una de las plantas de incubación también abastece de pollito bb al mercado (clientes terceros no relacionados con la compañía). El porcentaje de nacimiento es variable dependiendo de las granjas de reproductoras que abastecen de huevo fértil y también depende de la edad de la reproductora. Las plantas de incubación realizan 4 cargas por semana, los huevos fértiles se cargan los días lunes, martes, jueves

y viernes.

En las granjas de engorde los pollos con edades entre 40 y 44 días alcanzan el peso promedio requerido por las plantas faenadoras, las plantas de faenamiento tienen una velocidad de proceso definida por cada día de trabajo, laboran a 2 turnos de 8 horas, iniciando el día lunes y terminando el viernes.

El problema consiste en decidir, considerando la cantidad presupuestada de venta de pollo en pie, venta de pollo procesado, materia prima de pollo para embutidos y mortalidad de pollos en granjas, la cantidad de pollos que deben ingresar a las granjas de engorde por día para luego ser sacrificados a una edad comprendida entre 39 y 47 días. Una vez que se ha resuelto este problema, la etapa siguiente consiste en determinar la planta de incubación que deberá abastecer de pollito bb a las granjas, considerando las distancias de la planta a la granja. Conocida la cantidad de pollitos bb que deben producir las incubadoras se puede determinar la cantidad de huevos fértiles que deben cargar tomando en cuenta el porcentaje de nacimientos correspondientes. La estimación de los nacimientos se realiza considerando la granja reproductora y edad del lote que está abasteciendo de huevo fértil, esta estimación está basada en la tabla de la línea genética.

Si se continua para atrás en la planificación de la cadena de pollo, se podría programar los pedidos de genética de reproductoras de un día de edad para producir los huevos fértiles que requiere incubación en el proceso anterior. Esta etapa ya no es parte del presente trabajo ya que implica otras consideraciones que salen fuera del objetivo de este estudio.

Como resultado final del trabajo se espera que podamos responder a las preguntas planteadas anteriormente:

- ¿Cuándo ingresar los pollos a las granjas y en qué cantidad?
- ¿Cuándo deben salir los pollos a la faenadora, en qué cantidad y a qué edad debe sacrificar?
- ¿Cuándo cargar los huevos fértiles a la incubadora y en qué cantidad?

Para la solución del problema se plantea un modelo de programación entera que integra a las plantas de incubación, granjas de engorde y faenadoras con sus respectivas capacidades. El modelizador que utilizaremos para resolver el problema será GAMS con el optimizador CPLEX versión 12.0, luego los resultados obtenidos serán llevados a Excel para la elaboración de los reportes respectivos.

## 1.5. Revisión de la literatura

Existen varios estudios realizados en ésta área, uno de los primeros en abordar el tema a profundidad fue Taube Neto en 1996, [8], trabajando para UNISOMA, una empresa consultora en Investigación de Operaciones. Taube emplea la metodología de la investigación de operaciones en Sadia Concordia S. A., la cual era una de las empresas más grandes de Brasil, procesaba alrededor de 300 millones de pollos y 11 millones de pavos al año. Como resultado de su trabajo se produjeron ahorros por 50 millones de dólares anuales durante los 3 años posteriores a su implementación, mejorando la conversión alimenticia, flexibilizando la demanda del mercado. Las variables de decisión involucran cuestiones como: Cuándo y cuántas reproductoras abuelas comprar, planeación de las reproductoras, selección y entrada de granjas, plan de faenamiento, distribución del producto a las plantas. El horizonte de planeación que consideraron los investigadores fue de 18 meses.

Para modelar el problema Taube considera grupos de variables, por ejemplo para cada lote de producción define una variable  $Y(g, j)$  como el porcentaje de pollos del lote  $g$  que deben sacrificarse en el día  $j$ , este porcentaje se ajusta luego para corresponder al sacrificio completo del lote cuando el día  $j$  realmente ocurre. Por otro lado define la variable  $X(b, i, j)$ , como el número de pollitos del tipo  $b$  a ser alojados en el día  $i$  para ser sacrificados en el día  $j$ , esta cantidad se ajusta cuando el día  $i$  ocurre realmente (aproximadamente esta cantidad es 12000 pollitos). La variable  $W(f, j)$  se define como la cantidad de producto de la familia  $f$  (en  $TM$ ) a producir en el día  $j$ . Estos tres conjuntos de variables están relacionados con la finalidad de encontrar la demanda futura

de todos los productos con respecto a la capacidad diaria de alojamiento, sacrificio y corte.

UNISOMA implementó el sistema IPPP (Integrated Poultry Production Planning) que soluciona el problema planteado, este sistema fue desarrollado exclusivamente para Sadia y modela toda la cadena de valor de esta empresa.

Satir en su investigación, [11], propone un modelo de planificación general para cualquier organización de producción de pollo de engorde integrada verticalmente, el modelo propuesto por Satir es muy similar al de Taube Neto. En su modelo considera una relajación de las variables enteras (Cantidad de personas a contratar y variables binarias que indican si las granjas ingresan o no) para convertirlas en variables reales. Su modelo parte del análisis de la demanda de carne de pollo en Turquía. Para estimar la demanda utiliza modelos de series de tiempo (ARIMA). Para resolver el problema de planeación plantea un modelo de programación lineal considerando como variables de decisión las siguientes: Cantidad de reproductoras de un día de edad a comprar para la granja  $i$  en el tiempo  $t$ , Cantidad de huevos producidos, Cantidad de huevos importados, cantidad de huevos vendidos, consumo de alimento de las reproductoras, pollitos producidos, pollitos comprados, pollitos vendidos, pollos encasados en granjas de engorde, consumo de alimento de los pollos, cantidad de pollos para faenamiento, carne procesada vendida. También considera como variables de decisión la cantidad de alimento producida por la planta, compra de materia prima, inventarios, mano de obra requerida para las diferentes plantas. Como parámetros del modelo entran los costos directos e indirectos como son: alimento, bb, vacunas y medicinas, mano de obra, gastos generales, costos de almacenamiento y costo del inventario. También considera las capacidades de las granjas reproductoras, de engorde, plantas de incubación, plantas de faenamiento. En el modelo de planeación integral planteado por Satir asume que la organización puede disponer de huevo fértil, pollito bb y pollo en pie en cualquier instante en el mercado, esta suposición no es muy real, ya que los productores en el mercado también planifican su producción dependiendo de la necesidad de sus clientes. De la misma manera asume que en cualquier instante del tiempo puede vender en

el mercado regular pollito bb y huevos fértiles que tuviese en exceso, esta suposición tampoco es muy real ya que en la mayoría de los casos no se puede colocar todo el excedente de producción que no estuvo planificado vender, en cuyo caso el productor debe sacrificar esa producción, por ejemplo, dando de baja hacia la harina aviar.

Daniel Delima, [3], abordó también un problema similar al que analizó Taube . Delima hace el estudio para una empresa productora de pollos en Curitiba, Brasil, esta empresa es una organización integrada verticalmente en casi toda la cadena de producción, excepto en el proceso de engorde, el cual está tercerizado mediante granjas integradas, la compañía provee de alimento, pollito bb, vacunas y medicinas, asistencia técnica. El integrado incurre en los gastos de la crianza como son: Mano de obra, cama, energía eléctrica, gas, etc., cuando finaliza el lote los pollos son enviados al faenamiento y recibe un pago de acuerdo a resultados obtenidos.

A diferencia de Satir y Taube Neto, Delima solamente aborda el problema del planeamiento en las granjas de engorde, y por tanto, debe resolver las siguientes cuestiones para cada semana :

- ¿Qué granja debe recibir los pollos?
- ¿Cuándo deben ingresar los pollos a la granja?
- ¿Cuándo deben salir los pollos a la procesadora?

El plan debe satisfacer condiciones de vacío sanitario mínimas, es decir, las granjas deben tener un periodo de descanso mínimo. Además busca que las aves se sacrifiquen lo más próximo posible a los 43 días de edad, ya que a ésta edad se consigue el peso promedio ideal para el faenamiento y maximiza los resultados del integrado. La compañía dispone actualmente de 350 granjas integradas a las cuales se deben asignar los pollos.

Como función objetivo, a la cual se pretende minimizar, se plantea la diferencia entre la edad ideal de faenamiento, 43 días, y la edad de sacrificio planificada, para esto se considera un rango de edades de faenamiento posibles que van de 40 a 46 días. La

programación debe hacerse semanalmente para planificar la cantidad de pollos a recibir y la cantidad de pollos a sacrificar.

Para resolver el problema plantea un modelo de programación entera en donde se define como variables de decisión a  $X_{ijk}$ , variable binaria que toma el valor de 1 si el galpón  $i$  es alojado en el día  $j$  para ser sacrificado en el día  $k$ , donde  $j = 1, 2, \dots, 7$ ,  $k = 40, 41, \dots, 46$ . También considera los pollos que ya fueron alojados, es decir que están en proceso de engorde y que deberán ser desalojados a la procesadora. Para ello introduce la variable binaria  $Y_{prk}$  que indica si el galpón  $p$ , alojado en el día  $r$  será desalojado en el día  $k$ , en este caso  $r = -7, -6, \dots, -1$  representa los días referentes a los galpones ya alojados.

Una de las restricciones que se deben satisfacer es que la cantidad de pollos a faenar por día debe ser igual o mayor a una demanda dada  $D_t$ . Otra restricción a considerar es que la cantidad de pollitos a alojar debe ser igual o menor a una cantidad disponible  $S_j$ .

Una aproximación diferente a las planteadas anteriormente es la realizada por Cagape, Villanueva y otros, vea [13]. El estudio lo desarrollaron para la empresa Villanueva Poultry Farm en Filipinas. La crianza de los pollos se realiza en granjas propias, así como en granjas integradas. A las granjas integradas se les suministran los pollitos de un día, alimento, medicinas y servicio técnico de apoyo, luego de 42 días aproximadamente se les compra el pollo a un precio pactado en un contrato de integración.

El problema que se plantean en su estudio es el siguiente: Los ciclos de crianza y limpieza se repiten varias veces en el año, debido a las fluctuaciones de los precios del pollo en el mercado, es posible que algunos de los ciclos coincidan con estos periodos, lo que implicaría que la rentabilidad sea baja. La pregunta que deben resolver es: ¿Cuántos días se deben alargar o acortar los ciclos, de tal manera que la cosecha coincida con periodos de precios altos?.

Como objetivo se plantean desarrollar un programa que permita mover los ciclos de crianza hacia atrás o hacia adelante, dentro de un periodo de un año, de tal manera que maximice la rentabilidad de la empresa.

Para lograr esto, primero definen las siguientes variables:

- $R_T$ , Ingresos provenientes de los integrados
- $R_M$ , Ingresos provenientes de las granjas propias
- $C_T$ , Costos incurridos en los integrados
- $C_M$ , Costos incurridos en las granjas propias
- $C_{TM}$ , Costo total incurrido en granjas propias e integrados

Utilizando esta notación definen la utilidad total mediante la siguiente relación:

$$P = R_T + R_M - C_T - C_M - C_{TM}$$

También definen el precio del mercado,  $P_i$ , que es el precio por kilo de pollo durante el ciclo  $i$ . Para los doce meses del año 2008 tienen una tabla de precios pronosticada, la misma que ha sido construida utilizando los precios que publica el Bureau of Animal Industry de Filipinas.

Conocido el precio del mercado se determinan los ingresos provenientes de las granjas propias, utilizando la siguiente relación para cada ciclo  $i$ :

$$R_T = Q_i \times V_i \times w_i \times P_i$$

donde  $Q_i$ , es la cantidad de pollos ingresados,  $V_i$ , es la viabilidad,  $w_i$ , es el peso promedio y  $P_i$ , es el precio del mercado.

Otra variable que consideraron fue la cantidad de mano de obra que se debe contratar para disminuir el tiempo de limpieza,  $a_i$ . Los costos de la crianza de 5000 pollos, con un peso final promedio de 1.50 kg, quedan definidos por la siguiente expresión:

$$C_i = 75000 + 2200 * a_i$$

Finalmente calculan la utilidad como la diferencia entre ingresos menos gastos.

$$U_i = 7600P_i - 2200a_i - 298204$$

Las cantidades en la expresión anterior son calculadas en una base de 5000 pollos ingresados.

## MODELO DE PROGRAMACIÓN DINÁMICA

Los componentes del modelo se definen de la siguiente manera.

- La etapa  $i$  representa el  $i$ -ésimo ciclo en un periodo de un año,  $i = 1, \dots, 6$
- $x_i$ , representa el número de trabajadores contratados al final del  $i$ -ésimo ciclo
- Los estados son el número de trabajadores contratados al final del  $(i + 1)$ -ésimo periodo

La función recursiva para el modelo de programación dinámica lo definen mediante la siguiente expresión:

$$f_i(x_i) = \begin{cases} 7600P_i - 298204 - (2200 \lceil \frac{28}{x_i+2} \rceil x_i) & i = 6 \\ 7600P_i - 298204 - (2200 \lceil \frac{28}{x_i+2} \rceil x_i) + f_{i+1}(x_{i+1}) & i < 6 \end{cases}$$

donde el término  $a_i$  fue redefinido como  $\lceil \frac{28}{x_i+2} \rceil \times x_i$  en la función recursiva. El símbolo  $\lceil \cdot \rceil$  representa la función entero mayor.

## 1.6. Metodología de solución propuesta

El trabajo está dividido en cinco capítulos, el primer capítulo presenta aspectos generales sobre la producción de pollo en el Ecuador, para lo cual analizamos la evolución del sector desde el año 2000 hasta el 2010. En las siguientes secciones se describe la organización y el proceso productivo, con el fin de dar una descripción detallada del problema. Para finalizar este capítulo se realiza una revisión de la bibliografía presentando los trabajos realizados sobre el tema. La última sección habla sobre la estructura y organización de la tesis.

En el capítulo 2 presentamos los principales indicadores que intervienen en la solución del problema, hablamos aquí del porcentaje de mortalidad, el porcentaje de nacimiento, peso promedio y conversión alimenticia. Para pronosticar estos indicadores

utilizaremos modelos de series temporales (ARIMA). Para el peso promedio vamos a utilizar el modelo de crecimiento de Gompertz modificado.

En el capítulo 3 presentamos la formulación del modelo de programación entera que engloba a toda la cadena de producción. Se inicia con una formulación para la planeación del ingreso de pollitos a granjas. En este proceso se deben satisfacer restricciones de capacidades, tanto de granjas como de incubación. También se deben considerar restricciones de demanda de pollo en pie. Una vez resuelto este problema se debe determinar la distribución de pollitos bb desde las incubadoras a las granjas, así como la distribución de los pollos a los centros de procesamiento.

El plan de producción será para un horizonte de planeación de un mes, no es conveniente planificar en un horizonte más largo puesto que las condiciones cambian de un mes a otro. Por ejemplo, una granja no estuvo lista para recibir, entonces tendrá que cambiar la secuencia de granjas para que ingrese la granja que le sigue. Otras causas que modificarían el programa son los problemas sanitarios, cuando éstos problemas se presentan es necesario suspender los ingresos siguientes y cuarentenar la granja hasta que se enfríe. Bajo estas consideraciones planificar con un horizonte más allá de un mes sería un trabajo infructuoso. Hay otras instancia de planificación que se realiza una sola vez al año, que se conoce como planificación táctica, esta planificación tiene un horizonte de un año y a veces puede ser de hasta dos años.

En el capítulo 4 presentamos los resultados obtenidos y se desarrolla una discusión de los mismos, luego realizamos una comparación de los resultados con el modelo de programación anterior. Completamos este capítulo con los reportes que se emiten considerando las soluciones óptimas encontradas.

El trabajo finaliza con las conclusiones y recomendaciones en el capítulo 5.

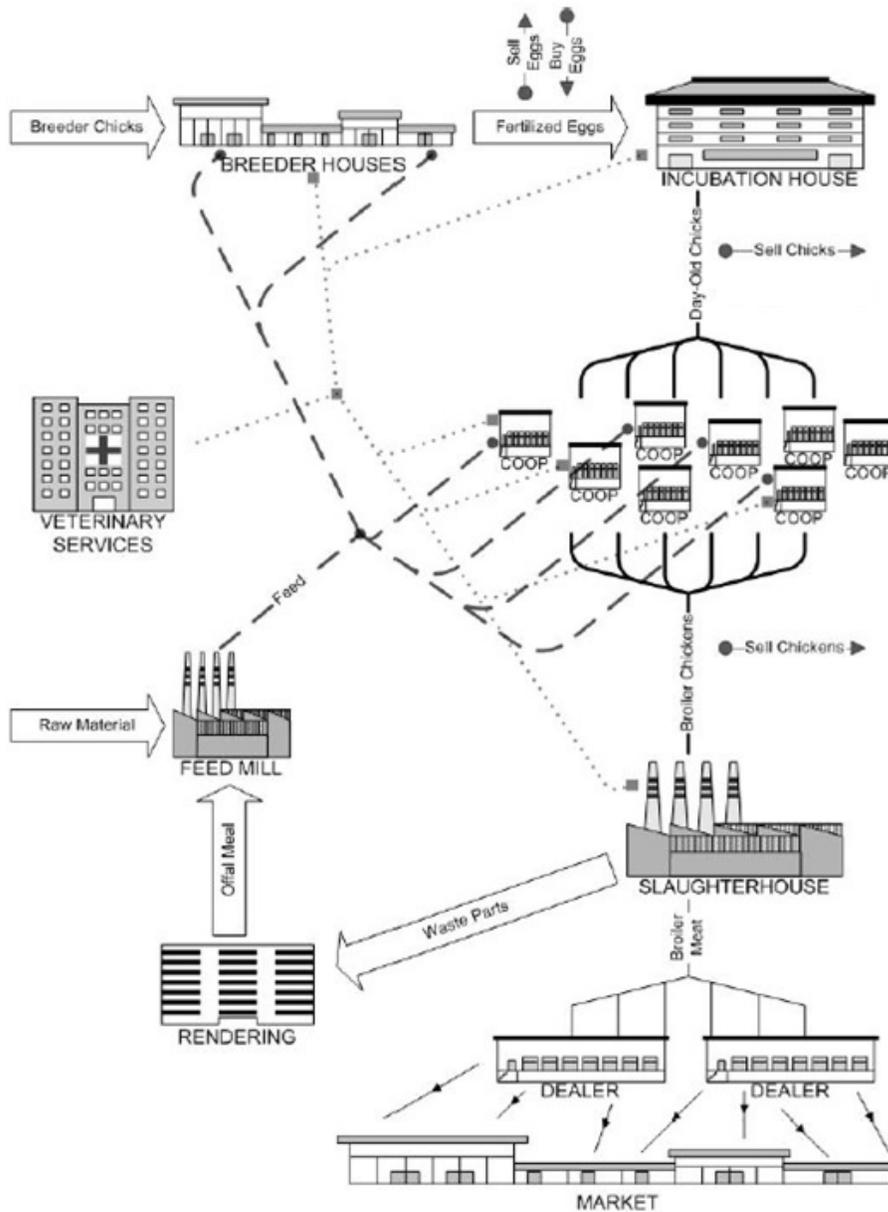


Figura 1.3: Proceso de producción de pollo de engorde (Tomado de Satir)

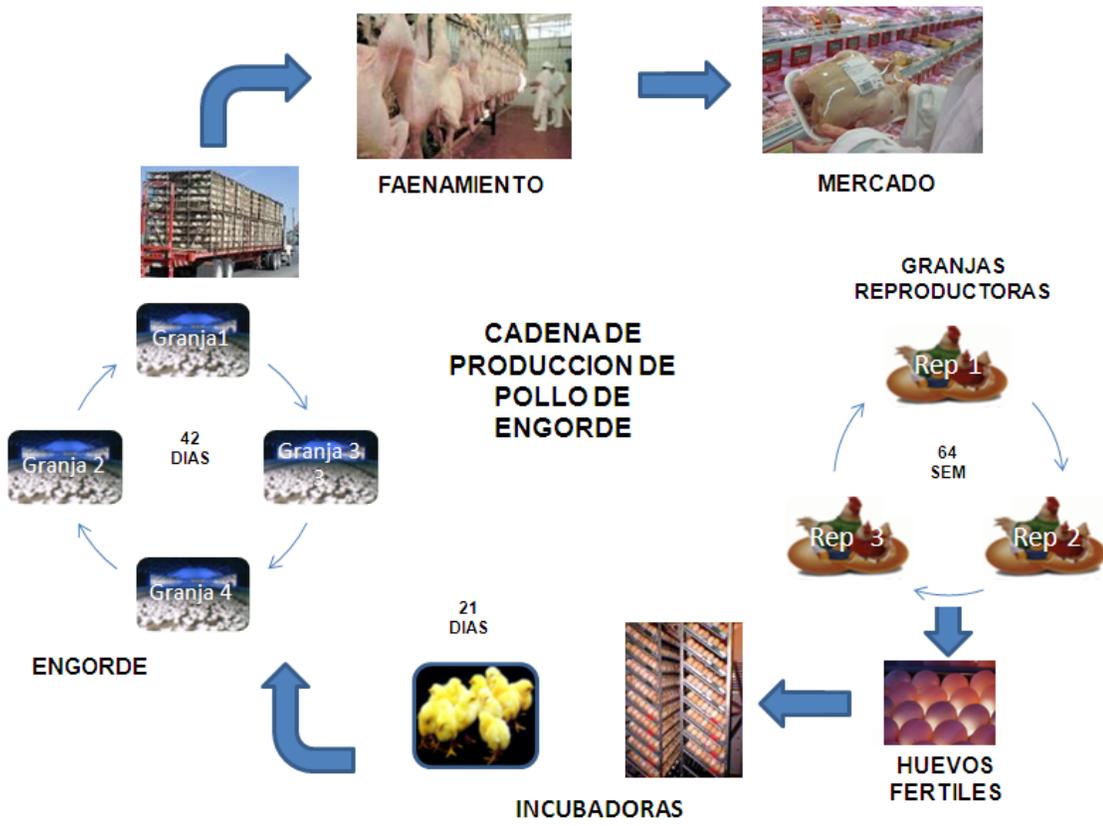


Figura 1.4: Potenciales áreas a optimizar

## CAPITULO 2

# Predicción de parámetros zootécnicos

### 2.1. Introducción

En la cadena de producción de pollos existen varios indicadores productivos tales como: *conversión alimenticia*, *peso promedio*, *porcentaje de mortalidad*, *porcentaje de nacimiento* que intervienen en la planeación. El pronóstico de estos parámetros es muy importante, pues de la exactitud que tengamos en nuestras previsiones dependerá el cumplimiento del presupuesto de producción.

Para pronosticar disponemos de información mensual de los promedios del peso, % mortalidad, % nacimiento y conversión alimenticia, obtenidos de las granjas que liquidaron sus lotes en cada una de las regiones.

Las regiones de crianza se definen como zona 1, zona 2 y zona 3. Asumiremos que las granjas que pertenecen a una misma zona tienen igual comportamiento en cuanto a los indicadores de mortalidad, conversión y peso promedio.

### 2.2. Análisis exploratorio de los parámetros zootécnicos

En esta sección primero analizaremos los datos históricos de los parámetros zootécnicos que serán considerados para la predicción. Iniciaremos con la prueba de Kolmogorov-

Smirnov para comprobar la normalidad de cada una de las series de datos, con el fin de examinar si se cumplen las hipótesis para realizar un análisis de varianza (ANOVA) y luego la prueba de Tukey. Las dos pruebas nos ayudarán a determinar si hay diferencias estadísticamente significativas entre los promedios de los parámetros para las zonas consideradas.

Para todos los análisis estadísticos que realizaremos en este capítulo utilizaremos IBM-SPSS V19.

### 2.2.1. Prueba de normalidad para los parámetros zootécnicos

En esta sección se evaluarán la pruebas de hipótesis siguientes:

$$H_0 : \%M \rightarrow N(\mu, \sigma) \quad (2.1)$$

$$H_1 : \%M \nrightarrow N(\mu, \sigma)$$

$$H_0 : FCR \rightarrow N(\mu, \sigma) \quad (2.2)$$

$$H_1 : FCR \nrightarrow N(\mu, \sigma)$$

$$H_0 : \%N \rightarrow N(\mu, \sigma) \quad (2.3)$$

$$H_1 : \%N \nrightarrow N(\mu, \sigma)$$

La figura 2.1 muestra el resultado de las pruebas realizadas, las tres primeras filas de la tabla se refieren a las mortalidades de las zonas 1,2 y 3.

En el caso de los pesos promedio es necesario realizar las pruebas de normalidad para los 7, 14, 21, 28 y 35 días. Los resultados de la prueba K-S para cada semana se muestran en la figura 2.2, los mismos indican que debemos rechazar la hipótesis de normalidad de los datos analizados. Para investigar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los pesos promedio semanales entre las zonas es necesario utilizar la prueba de Kruskal-Wallis. Esta prueba se realizará en la sección de estimación de las curvas de crecimiento.

## Resumen de prueba de hipótesis

	Hipótesis nula	Test	Sig.	Decisión
1	La distribución de Zona 1 es normal con la media 8.95 y la desviación típica 3.43.	Prueba Kolmogorov-Smirnov de una muestra	.054	Retener la hipótesis nula.
2	La distribución de Zona 3 es normal con la media 6.48 y la desviación típica 2.05.	Prueba Kolmogorov-Smirnov de una muestra	.037	Rechazar la hipótesis nula.
3	La distribución de Zona 2 es normal con la media 6.93 y la desviación típica 1.42.	Prueba Kolmogorov-Smirnov de una muestra	.031	Rechazar la hipótesis nula.
1	La distribución de fcr es normal con la media 2.01 y la desviación típica 0.08.	Prueba Kolmogorov-Smirnov de una muestra	.738	Retener la hipótesis nula.
1	La distribución de INC1 es normal con la media 0.79 y la desviación típica 0.06.	Prueba Kolmogorov-Smirnov de una muestra	.115	Retener la hipótesis nula.
2	La distribución de INC2 es normal con la media 0.81 y la desviación típica 0.03.	Prueba Kolmogorov-Smirnov de una muestra	.899	Retener la hipótesis nula.
3	La distribución de INC3 es normal con la media 0.79 y la desviación típica 0.04.	Prueba Kolmogorov-Smirnov de una muestra	.558	Retener la hipótesis nula.

Se muestran las significancias asintóticas. El nivel de significancia es .05.

**Figura 2.1:** Prueba de Kolmogov-Smirnov

En el caso de la mortalidad se rechaza la hipótesis de que los datos siguen una distribución normal, en el resto de variables estudiadas no hay evidencia para rechazar la hipótesis nula.

### 2.3. Predicción de la mortalidad

La tasa de mortalidad se calcula como la diferencia entre la cantidad de aves que ingresaron menos las aves que fueron enviadas al proceso, dividida para la cantidad inicial

## Resumen de prueba de hipótesis

	Hipótesis nula	Test	Sig.	Decisión
1	La distribución de p7 es normal con la media 0.16 y la desviación típica 0.02.	Prueba Kolmogorov-Smirnov de una muestra	.000	Rechazar la hipótesis nula.
2	La distribución de p14 es normal con la media 0.42 y la desviación típica 0.04.	Prueba Kolmogorov-Smirnov de una muestra	.002	Rechazar la hipótesis nula.
3	La distribución de p21 es normal con la media 0.84 y la desviación típica 0.07.	Prueba Kolmogorov-Smirnov de una muestra	.000	Rechazar la hipótesis nula.
4	La distribución de p28 es normal con la media 1.40 y la desviación típica 0.11.	Prueba Kolmogorov-Smirnov de una muestra	.000	Rechazar la hipótesis nula.
5	La distribución de p35 es normal con la media 2.02 y la desviación típica 0.15.	Prueba Kolmogorov-Smirnov de una muestra	.000	Rechazar la hipótesis nula.

Se muestran las significancias asintóticas. El nivel de significancia es .05.

**Figura 2.2:** Prueba de Kolmogov-Smirnov para los pesos promedio

de aves. La mortalidad en el tiempo la representamos como  $\%M_t$ . Para la estimación de la mortalidad disponemos de datos mensuales de lotes de producción finalizados desde el año 2002 hasta el año 2010.

Para evaluar si hay diferencias significativas en los promedios de mortalidad entre las zonas utilizaremos la prueba de Kruskal-Wallis de muestras independientes, debido a que la serie de datos no es una muestra de una población normal. Para mayores detalles de la metodología puede referirse a [7]. La figura 2.3 resume el resultado de las pruebas corridas en SPSS.

La prueba de Kruskal-Wallis (figura 2.3) realizada para comparar si hay diferencias significativas entre la zonas mostró que hay diferencias significativas entre las tres zonas.

Para la evaluación de los modelos de pronósticos utilizaremos el modelador de SPSS y el criterio de información Bayesiano ( $BIC$ ) para elegir el mejor modelo. Para un

## Resumen de prueba de hipótesis

	Hipótesis nula	Test	Sig.	Decisión
1	Las medianas de mort son las mismas entre las categorías de zona.	Prueba de medianas de muestras independientes	.000	Rechazar la hipótesis nula.
2	La distribución de mort es la misma entre las categorías de zona.	Prueba Kruskal-Wallis de muestras independientes	.000	Rechazar la hipótesis nula.

Se muestran las significancias asintóticas. El nivel de significancia es .05.

**Figura 2.3:** Prueba de Kruskal-Wallis

análisis en detalle del sustento teórico de los modelos *ARIMA* refiérase al libro “Time Series: Theory and Methods” de Brockwell y Davis, [2], o también Bovas (2005), [1].

### 2.3.1. Mortalidad zona 1 ( $\%M_1$ )

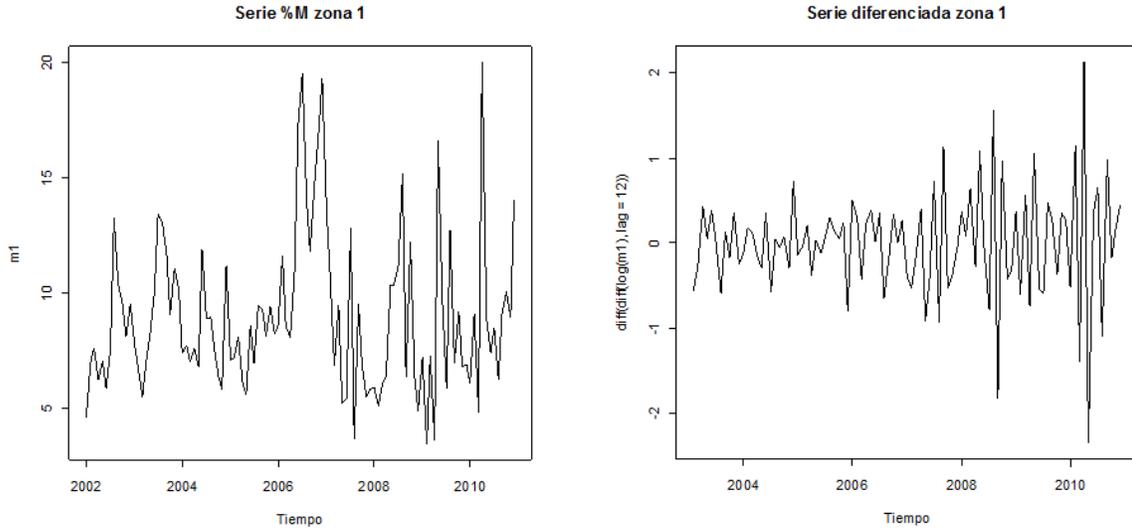
Las figura 2.4 muestra el gráfico de la serie original, la media es ligeramente decreciente en el tiempo y la varianza no es constante. Para convertir la serie en estacionaria hacemos la transformación  $Y_t = (1 - B)(1 - B^{12})\ln(\%M_t)$ , se observa en la misma figura 2.4 que la serie  $Y_t$  ya se puede considerar estacionaria. En la expresión anterior el operador  $B$  es el operador de retardos.

El análisis de las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial (*ACF* y *PACF*) de  $Y_t$  sugieren dos posibles modelos *AR*(2) o *MA*(1) en la parte ordindaria. En la parte estacional se sugieren los modelos *SAR*(1) o *SMA*(1).

El modelo que mejor se ajusta a los datos es *SARIMA*(2,1,0) : (0,1,1)<sub>12</sub> con  $BIC = 2,971$ . La tabla 2.3 muestra los coeficientes para el modelo de la zona 1.

Type	Coef	SE Coef	T	P
<i>AR</i> (1)	-0.788	0.101	-7.800	0.000
<i>AR</i> (2)	-0.304	0.101	-3.015	0.003
<i>SMA</i> (1)	0.904	0.302	2.997	0.004

**Tabla 2.1:** Estimadores de los parámetros zona 1



**Figura 2.4:** Serie original y diferenciada Zona 1

Al encontrar la ecuación final de la serie transformada:  $Y_t$  se obtiene:  $(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2)Y_t = (1 - \Theta_1 B^{12})a_t$ , con  $a_t$  ruido blanco. Reemplazando los estimadores de la tabla 2.3 llegamos a la ecuación 2.6.

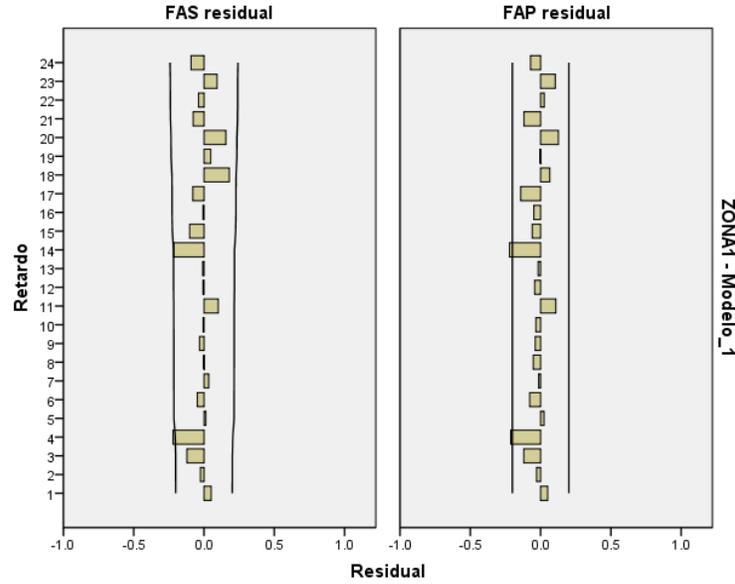
$$(1 + 0,788B + 0,304B^2)(1 - B)(1 - B^{12})\ln(\%M_t) = (1 - 0,904B^{12})a_t \quad (2.4)$$

La figura 2.5 muestra las autocorrelaciones  $ACF$  y  $PACF$  de los residuales, se observa que todas las autocorrelaciones están dentro de la banda y por lo tanto se puede considerar ruido blanco. La prueba de Ljung-Box para 18 autocorrelaciones muestra el *valor - p* = 0,385, esto indica que el modelo es adecuado.

### 2.3.2. Mortalidad zona 2 ( $\%M_2$ )

La figura 2.6 muestra la gráfica de la mortalidad de la zona 2 en el tiempo.

Podríamos considerar la serie como estacionaria y examinar las funciones de autocorrelación,  $ACF$  y  $PACF$  para determinar los posibles modelos. Luego de algunos



**Figura 2.5:** ACF y PACF residuales para zona1

procesos concluimos que el mejor modelo es un  $AR(2)$ . La tabla 2.2 muestra los estimadores de los parámetros.

Type	Coef	SE Coef	T	P
Constante	0.067	0.002	30.979	0.000
AR(1)	0.328	0.096	3.409	0.001
AR(2)	0.224	0.0097	2.323	0.022

**Tabla 2.2:** Estimadores de los parámetros

La ecuación del modelo se expresa como:  $(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2)(\%M_t - \mu) = a_t$ , con  $a_t$  ruido blanco, reemplazando por los estimadores llegamos a la ecuación 2.5

$$(1 - 0,328B - 0,224B^2)(\%M_t - 0,067) = a_t \tag{2.5}$$

La figura 2.7 muestra las funciones ACF y PACF de los residuales, se observa que todas están dentro de la banda comportándose como ruido blanco. La prueba de Ljung-Box para 18 retardos muestra un  $valor-p = 0,843$  lo que indica que el modelo propuesto es adecuado.

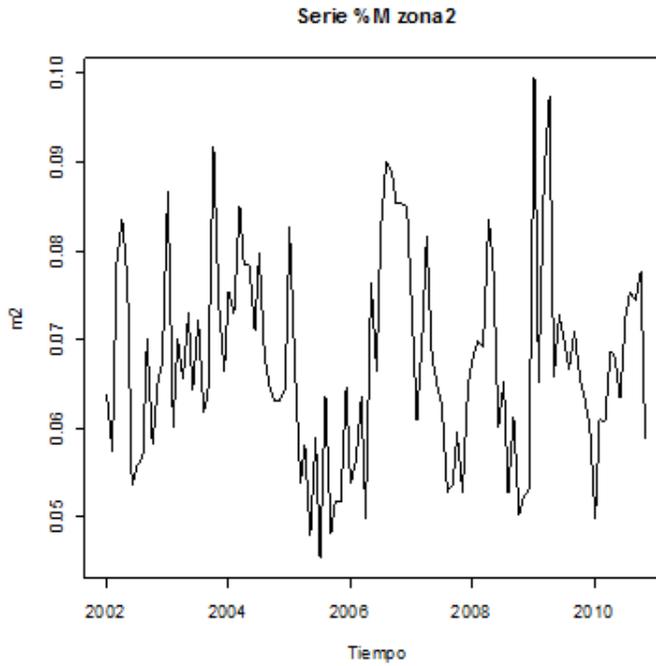


Figura 2.6: Serie mortalidad zona 2

### 2.3.3. Mortalidad zona 3 ( $\%M_3$ )

Las figura 2.8 muestra el gráfico de la serie original, la media es ligeramente decreciente en el tiempo. Para eliminar la tendencia hacemos la transformación  $Y_t = \ln(\%M_t)$ .

El modelo que mejor se ajusta a los datos es  $ARIMA(2, 0, 0)$  con  $BIC = 1,094$ . La tabla 2.3 muestra los coeficientes para la serie transformada  $Y_t$ .

Type	Coef	SE Coef	T	P
Constante	1.817	0.068	26.671	0.000
$AR(1)$	0.352	0.092	3.826	0.000
$AR(2)$	0.338	0.092	3.668	0.000

Tabla 2.3: Estimadores de los parámetros zona 1

La ecuación final de la serie transformada  $Y_t$  queda detarminada por:  $(1 - \phi_1 B + \phi_2 B^2)(\ln(\%M_t) - \mu) = a_t$ , con  $a_t$  ruido blanco. Reemplazando los estimadores de la tabla 2.3 llegamos a la ecuación 2.6.

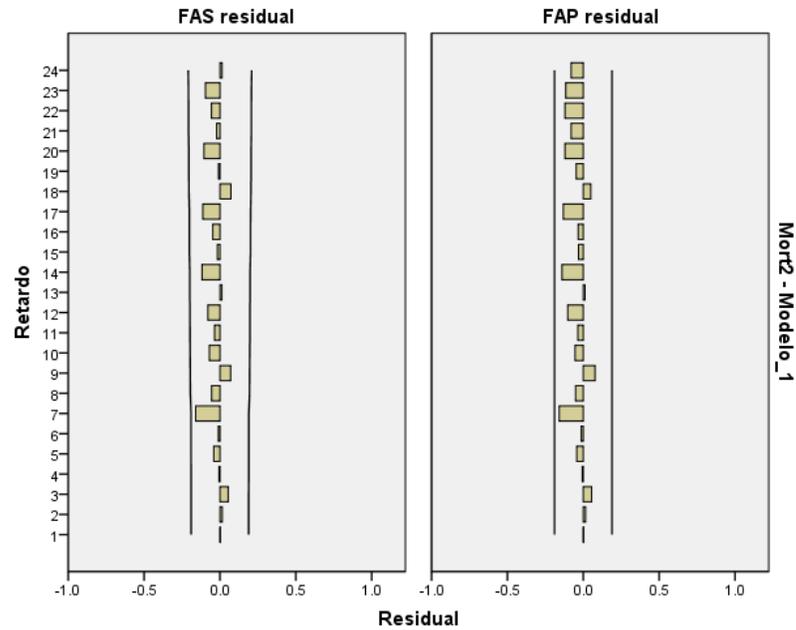


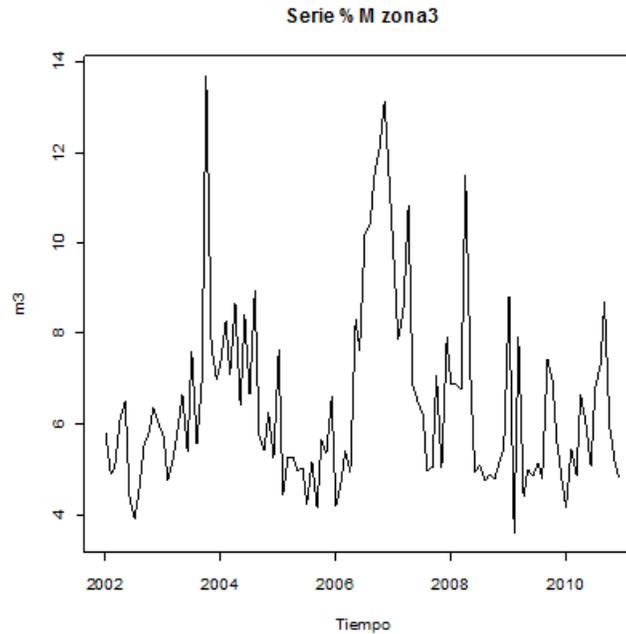
Figura 2.7: ACF y PACF residuales zona 2

$$(1 + 0,352B + 0,338B^2)(\ln(\%M_t) - 1,817) = a_t \quad (2.6)$$

La figura 2.9 muestra las autocorrelaciones *ACF* y *PACF* de los residuales, se observa que todas las autocorrelaciones están dentro de la banda y por lo tanto se puede considerar ruido blanco. La prueba de Ljung-Box para 18 autocorrelaciones muestra el *valor - p* = 0,48, esto indica que el modelo es adecuado.

## 2.4. Estimación del peso promedio

El crecimiento en pollos se ha descrito usando modelos teóricos de crecimiento generales, tales como: modelo de Gompertz, modelos logísticos, modelos de saturación de Michaelis-Menton, etc. Todos los modelos tratan de describir por medio de una función el crecimiento del pollo de engorde, pero el modelo de Gompertz por su simplicidad ha sido utilizado ampliamente en numerosos trabajos de investigación. En nuestro estudio utilizaremos el modelo de Gompertz modificado para estimar las curvas de crecimiento



**Figura 2.8:** Serie original mortalidad zona 3

de los pollos en la empresa bajo estudio. Para profundizar más sobre el tema puede ver Franses (1992) [5].

Wang (2004) [14] realizó un estudio para la estimación de la curva de crecimiento en aves considerando una varianza heterogénea en donde utiliza un modelo de Gompertz mixto no lineal.

La ecuación del modelo de Gompertz modificado se expresa a continuación.

$$W_t = W_0 e^{b - b e^{-ct^d}} \quad (2.7)$$

Donde:

- $W_0$  es el peso al nacimiento, en broilers este peso en promedio es 40 gramos.
- $b$  es el desplazamiento horizontal.
- $c$  es la tasa de crecimiento

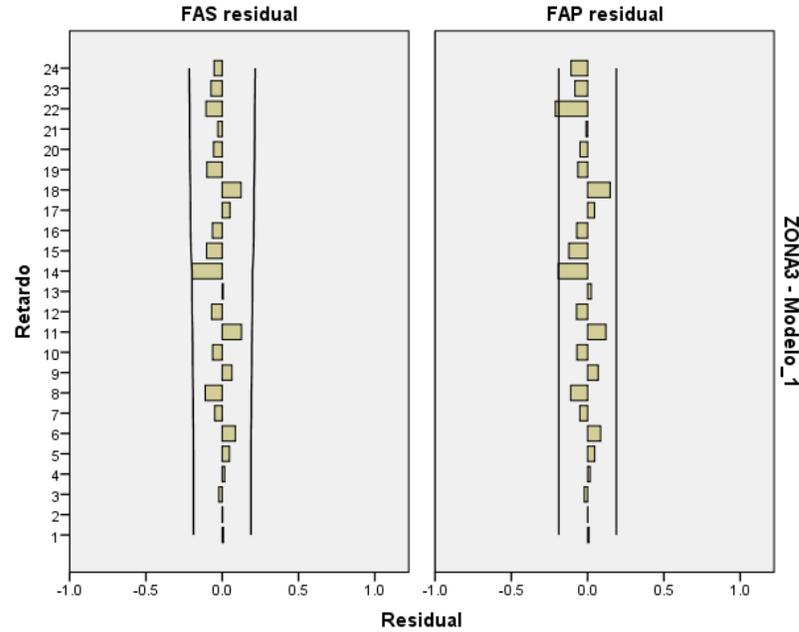


Figura 2.9: ACF y PACF residuales para zona 3

- $e$  es el número de Euler, base de los logaritmos naturales.
- $d$  constante.

Cuando  $t \rightarrow \infty$ ,  $W_t \rightarrow W_0 e^b$ , entonces el peso corporal tiende al peso máximo en la madurez del pollo.

Antes de estimar los parámetros de la ecuación 2.7 necesitamos comparar si los pesos en las semanas 1 a la 5 son estadísticamente diferentes entre las zonas. Como ya se mencionó en la sección inicial es necesario utilizar la prueba de Kruskal Wallis. La figura 2.10 muestra el resultado de la prueba realizada.

En todos los casos se determinó que la diferencia era estadísticamente significativa, esto es consistente con la realidad ya que cada zona produce para un mercado con un peso promedio específico.

De lo anterior concluimos que las tres zonas tienen una curva de crecimiento bien diferenciada. Para estimar los parámetros de la ecuación 2.7 utilizaremos SOLVER de Excel, minimizando la suma de cuadrados del error. Un modelo alternativo de ajuste

## Resumen de prueba de hipótesis

	Hipótesis nula	Test	Sig.	Decisión
1	La distribución de p7 es la misma entre las categorías de zona.	Prueba Kruskal-Wallis de muestras independientes	.000	Rechazar la hipótesis nula.
2	La distribución de p14 es la misma entre las categorías de zona.	Prueba Kruskal-Wallis de muestras independientes	.000	Rechazar la hipótesis nula.
3	La distribución de p21 es la misma entre las categorías de zona.	Prueba Kruskal-Wallis de muestras independientes	.000	Rechazar la hipótesis nula.
4	La distribución de p28 es la misma entre las categorías de zona.	Prueba Kruskal-Wallis de muestras independientes	.000	Rechazar la hipótesis nula.
5	La distribución de p35 es la misma entre las categorías de zona.	Prueba Kruskal-Wallis de muestras independientes	.000	Rechazar la hipótesis nula.

Se muestran las significancias asintóticas. El nivel de significancia es .05.

**Figura 2.10:** Prueba de Kruskal-Wallis para diferencia de medias

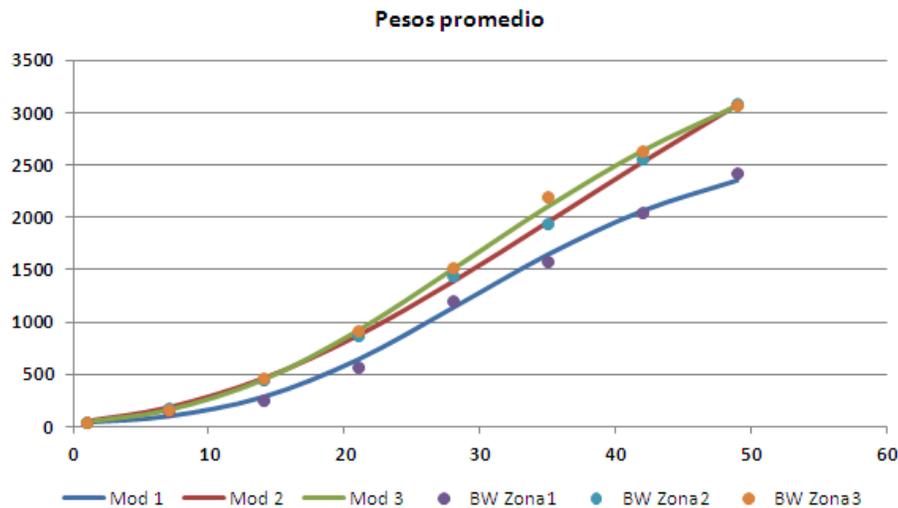
lo puede encontrar en Ritz (2005) [10], el cual utiliza el modelo estándar de Gompertz, la estimación de los parámetros lo realiza en R.

En la tabla 2.4 resumimos los estimadores de los parámetros de los tres modelos estimados para cada zona.

La gráfica 2.11 muestra las curvas de crecimiento estimadas para las tres zonas, puede verse que el ajuste es casi exacto, el coeficiente  $R^2$  es del 99%. Considerando un modelo polinomial de orden 3 se puede obtener un  $R^2$  similar, la diferencia está en que el modelo de Gompertz puede extrapolar los pesos a edades superiores a las consideradas en la muestra que hemos analizado facilitando la predicción. El caso polinomial solamente sirve para pronosticar en edades que están dentro del intervalo de edades consideradas.

Parámetro	Zona 1	Zona 2	Zona 3
$W_0$	40.00	40.00	40.00
$b$	4.23397	5.03022	4.64170
$c$	0.01869	0.06634	0.04627
$d$	1.32828	.87394	1.04814

**Tabla 2.4:** Parámetros de las curvas de crecimiento de Gompertz



**Figura 2.11:** Curvas de crecimiento zona 1, zona 2 y zona 3

## 2.5. Predicción de la conversión de alimento

La conversión de alimento es una medida que indica la cantidad de alimento que consume un pollo para ganar un kg de carne. El pronóstico de este indicador es importante ya que interviene en la planificación del consumo de alimento y a su vez incide en la planificación del abastecimiento de las materias primas como maíz, soya, etc. La conversión está influenciada por un sinnúmero de factores tales como la mortalidad de las aves, el clima, el tipo de galpón, la edad de faenamiento, el peso que alcanzan las aves, la temperatura ambiente, la densidad (aves/ $m^2$ ), la cantidad de aves por comedero, la cantidad de aves por bebedero, el manejo en la primera semana de vida, el programa de luz utilizado, el aislamiento de techo, etc. Además tiene dependencia del tiempo, pues los cambios en las dietas normalmente inciden dos o tres meses posteriores a su

formulación.

El pronóstico de la conversión es bien complicado si queremos utilizar variables explicativas determinísticas. Del párrafo anterior, las variables mortalidad y temperatura son variables aleatorias que están autocorrelacionadas, por tanto no podríamos utilizarlas como predictoras, su naturaleza estocástica nos puede conducir a una predicción errónea y en consecuencia a incurrir en altos costos de producción.

Para pronosticar la conversión podríamos utilizar modelos de series multivariantes, pero la complejidad de esta metodología por si misma ya constituye un tema de tesis. Este tema va más allá del propósito de nuestro trabajo, por lo que nos enfocaremos en la modelización de series de tiempo univariadas.

En esta etapa tenemos que hacer una distinción entre tipo de criadores. En la empresa en estudio existen dos tipos de criadores, relacionados e integrados. Dado el tipo de manejo y tecnología bien diferenciados que existen en estos dos tipos de criadores es necesario primero examinar si existen diferencias entre las conversiones para las zonas y los criadores. Para evaluar estadísticamente utilizaremos SPSS y el método ANOVA con las pruebas de Tukey. El análisis ANOVA muestra diferencias significativas para cada factor considerado. La figura 2.12 muestra el resumen de las comparaciones por pares para cada una de las zonas y tipo de criador.

La zona 1 solamente tiene Integrados. En la figura se observa que entre las zonas S (zona 1) y BINT (Zona 3 - Integrados) no hay diferencias significativas, por tanto utilizaremos un solo pronóstico para las dos. Entre las demás combinaciones se observa que hay diferencias significativas, por tanto pronosticaremos para cada una de ellas.

### **2.5.1. Conversión de alimento zonas 1 y 3 integrados**

La conversión de alimento la simbolizaremos como  $FCR_t$ , la figura 2.13 muestra la serie original y la serie diferenciada. Se observa una tendencia decreciente en los datos originales por lo que fue necesario hacer una diferenciación. La serie diferenciada  $(1 - B)FCR_t$  ya es estacionaria por tanto podemos estimar los parámetros.

Comparaciones por pares

Variable dependiente: fcr

(I)g_l	(J)g_l	Diferencia de medias (I-J)	Error típ.	Sig. <sup>a</sup>	Intervalo de confianza al 95 % para la diferencia <sup>a</sup>	
					Límite inferior	Límite superior
BINT	BP	.149 <sup>*</sup>	.021	.000	.106	.192
	S	-.034	.018	.073	-.071	.003
	SDI	.063 <sup>*</sup>	.021	.005	.020	.106
	STP	.103 <sup>*</sup>	.021	.000	.060	.146
BP	BINT	-.149 <sup>*</sup>	.021	.000	-.192	-.106
	S	-.183 <sup>*</sup>	.018	.000	-.220	-.146
	SDI	-.086 <sup>*</sup>	.021	.000	-.129	-.043
	STP	-.046 <sup>*</sup>	.021	.035	-.089	-.003
S	BINT	.034	.018	.073	-.003	.071
	BP	.183 <sup>*</sup>	.018	.000	.146	.220
	SDI	.097 <sup>*</sup>	.018	.000	.060	.134
	STP	.137 <sup>*</sup>	.018	.000	.099	.174
SDI	BINT	-.063 <sup>*</sup>	.021	.005	-.106	-.020
	BP	.086 <sup>*</sup>	.021	.000	.043	.129
	S	-.097 <sup>*</sup>	.018	.000	-.134	-.060
	STP	.040	.021	.070	-.003	.082
STP	BINT	-.103 <sup>*</sup>	.021	.000	-.146	-.060
	BP	.046 <sup>*</sup>	.021	.035	.003	.089
	S	-.137 <sup>*</sup>	.018	.000	-.174	-.099
	SDI	-.040	.021	.070	-.082	.003

Basadas en las medias marginales estimadas.

\*. La diferencia de medias es significativa al nivel .05.

a. Ajuste para comparaciones múltiples: Diferencia menos significativa (equivalente a la ausencia de ajuste).

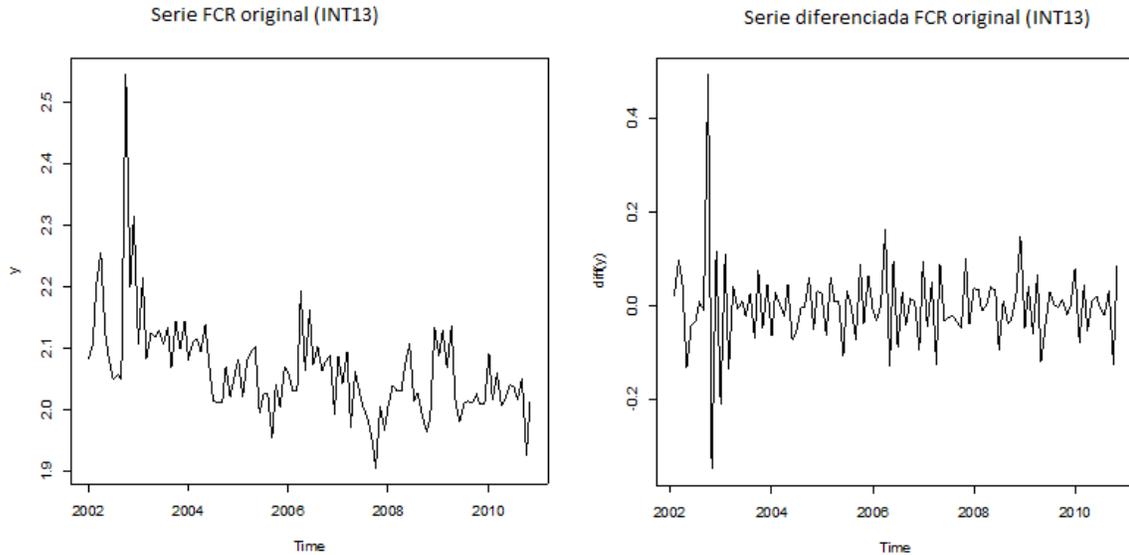
Figura 2.12: Prueba de Tukey para diferencia de medias

Del análisis de las funciones ACF y PACF probamos algunos modelos y el que mejor se ajusta a los datos es  $ARIMA(0, 1, 3)$  con  $BIC=-5.242$ . La tabla siguiente resume los estimadores de los parámetros.

Type	Coef	SE Coef	T	P
MA(1)	-0.741	0.095	7.788	0.000
MA(3)	0.310	0.095	3.278	0.001

Tabla 2.5: Estimadores de los parámetros zona 1 y 3

El parámetro para MA(2) no es significativo por tanto será considerado como 0. El modelo queda determinado por la ecuación  $(1 - B)FCR_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \theta_3 B^3)a_t$ . Reemplazando los valores de los estimadores de la tabla 2.5 nos queda la ecuación 2.8.



**Figura 2.13:** Serie FCR y  $\text{diff}(\text{FCR})$

$$(1 - B)FCR_t = (1 + 0,741B - 0,310B^3)a_t \quad (2.8)$$

Las autocorrelaciones y autocorrelaciones parciales se muestran en la figura 2.14, se observa que todas están dentro de la banda, esto significa que el modelo es adecuado. La prueba de Ljung-Box para 15 retardos muestra un valor-p =0.717. Con esto concluimos que los residuales no son significativos y se pueden considerar ruido blanco.

## 2.5.2. Conversión de alimento zona 2 relacionadas

Al igual que la sección anterior mostramos las gráficas de las series original y diferenciada. La serie  $(1 - B)FCR_t$  es estacionaria.

Analizando las funciones ACF y PACF para la serie diferenciada encontramos varios posibles modelos. Luego de algunos procesos encontramos que el mejor modelo para la conversión es  $ARIMA(0, 1, 3)$  con  $BIC=-5.976$ . La tabla muestra los estimadores para este modelo.

Nuevamente como en el caso anterior, el coeficiente de  $MA(2)$  no es significativo

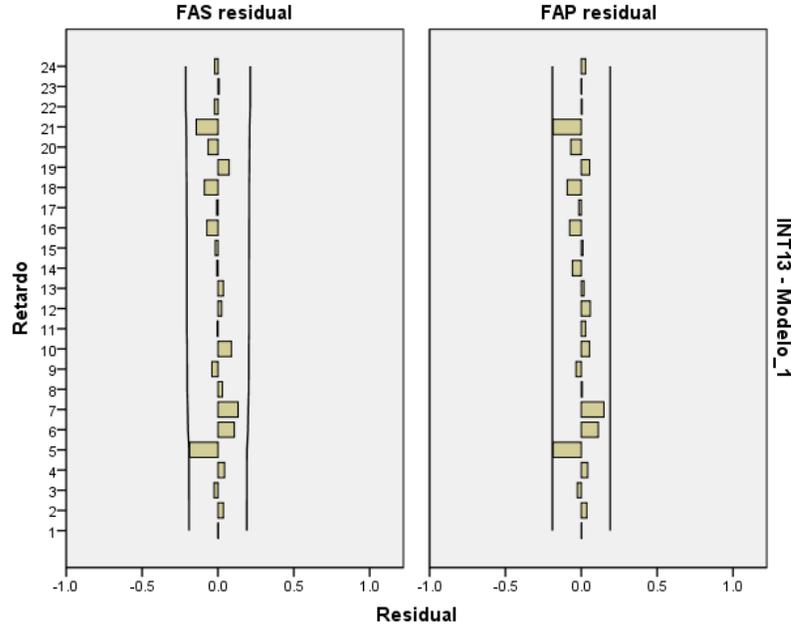


Figura 2.14: ACF y PACF de los Residuales zonas 1 y 3

Type	Coef	SE Coef	T	P
MA(1)	0.610	0.296	2.061	0.042
MA(3)	0.384	0.167	2.312	0.023

Tabla 2.6: Estimadores de los parámetros zona 2 relacionadas

por lo que lo consideraremos 0. La ecuación de este modelo es:  $(1 - B)FCR_t = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \theta_3 B^3)a_t$ . Reemplazando los valores de los estimadores de la tabla 2.6 nos queda la ecuación 2.9.

$$(1 - B)FCR_t = (1 - 0,610B - 0,387B^3)a_t \tag{2.9}$$

Las funciones ACF y PACF de los residuales se observan en la figura 2.16, todas las autocorrelaciones están dentro de la banda por lo que se pueden considerar como no significativas. La prueba de Ljung-Box para 15 autocorrelaciones tienen un valor-p = 0.466, esto nos permite concluir que los residuos se pueden considerar ruido blanco y que el modelo es adecuado.

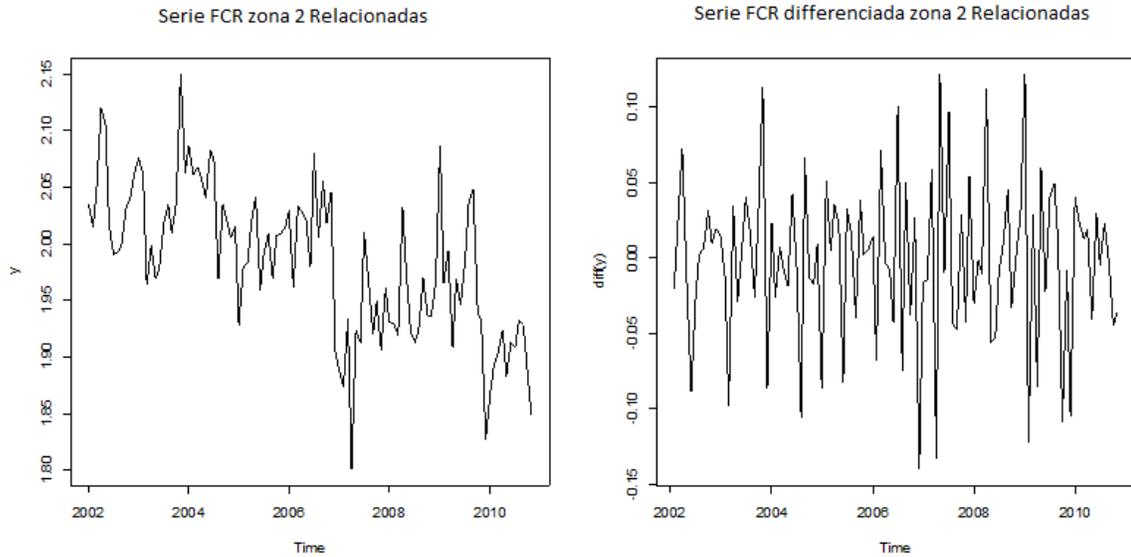


Figura 2.15: Serie FCR y diff(FCR) zona 2 relacionadas

### 2.5.3. Conversión de alimento zona 2 integrados

La figura 2.17 muestra las serie original, se puede considerar como estacionaria y analizar directamente las funciones ACF y PACF para determinar el orden de los parametros p y q.

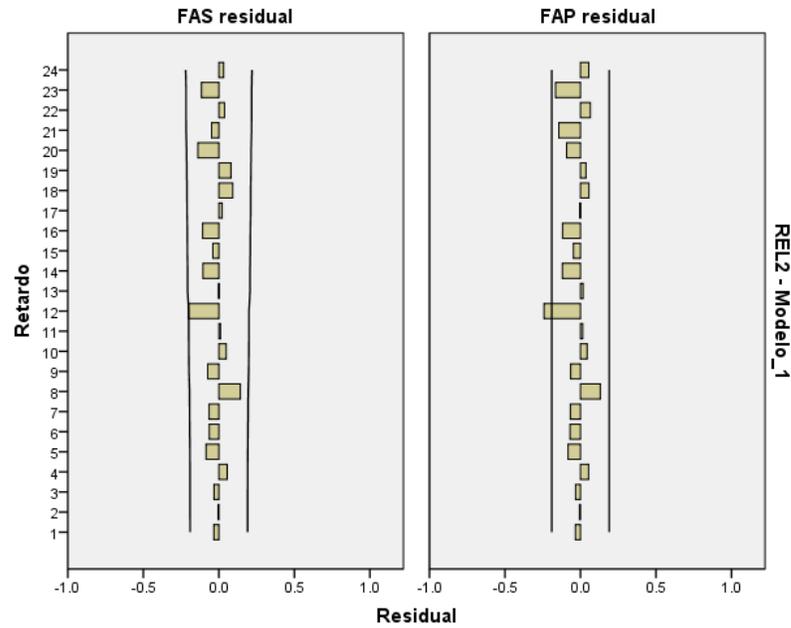
Del análisis de las funciones ACF y PACF se probaron varias alternativas y se concluye que el mejor modelo fue  $MA(2)$  con  $BIC=-5.579$ . La tabla 2.7 resume los valores estimados de los parámetros.

Type	Coef	SE Coef	T	P
Constante	1.946	0.009	214.480	0.000
$MA(1)$	-0.247	0.090	-2.733	0.007
$MA(2)$	-0.396	0.092	-4.306	0.000

Tabla 2.7: Estimadores de los parámetros zona 2 integrados

La ecuación de este modelo se expresa como:  $FCR_t - \mu = (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2)a_t$ . Reemplazando por los estimadores de la tabla 2.7 nos queda la ecuación 2.10

$$(FCR_t - 1,946) = (1 + 0,247B + 0,396B^2)a_t \tag{2.10}$$



**Figura 2.16:** ACF y PACF de los Residuales zona 2 relacionadas

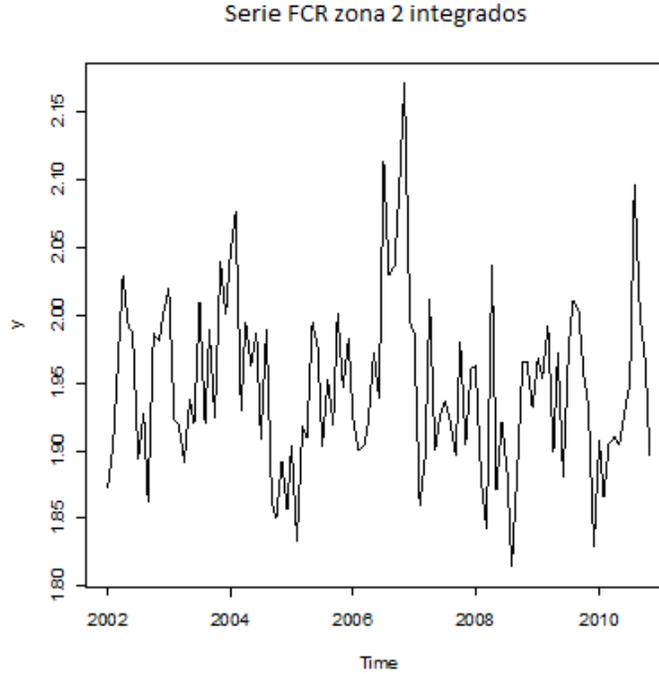
Las funciones ACF y PACF de los residuales se muestran en la figura 2.18. Las autocorrelaciones están dentro de la banda por lo que concluimos que no son significativas. La prueba de Ljung-Box para 15 autocorrelaciones nos da un valor-p = 0.258 por tanto el modelo es adecuado y los residuales se pueden considerar ruido blanco.

#### 2.5.4. Conversión de alimento zona 3 relacionadas

Para la zona 3 granjas relacionadas procedemos en forma similar a las secciones anteriores. Examinamos las figuras de las series original y diferenciada que se muestran en la figura 2.19. La serie diferenciada ya se puede considerar como estacionaria.

Para determinar el orden de los parámetros del modelo analizamos las funciones ACF y PACF. Observando las dos funciones probamos dos alternativas, AR(1) o MA(1). El criterio BIC nos muestra que el mejor modelo es AR(1) con BIC = -6.061. Los estimadores de los parámetros se resumen en la tabla 2.8

La ecuación de este modelo es:  $(1 - B)(1 - \phi B)FCR_t = a_t$ . Reemplazando los estimadores de la tabla 2.8 llegamos a la ecuación 2.11.



**Figura 2.17:** Serie FCR zona 2 integrados

Type	Coef	SE Coef	T	P
AR(1)	-0.266	0.094	-2.822	0.006

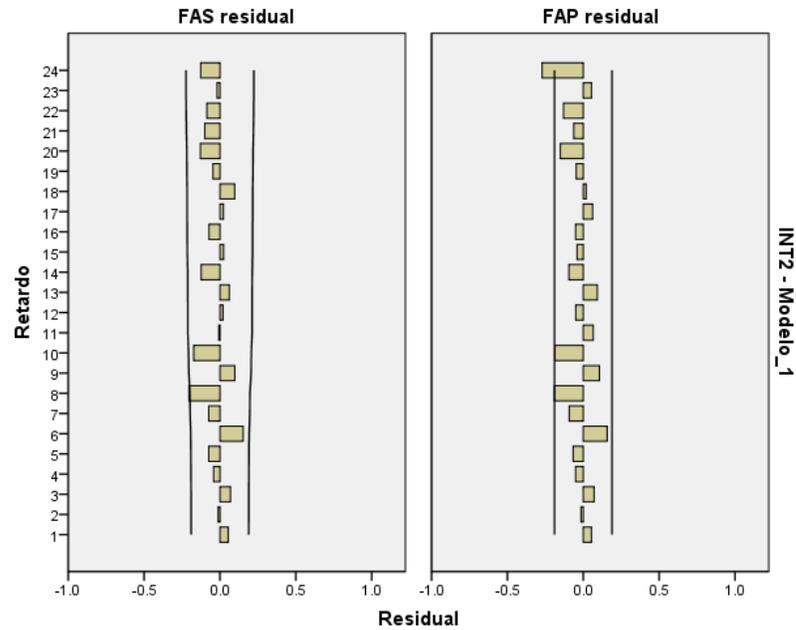
**Tabla 2.8:** Estimadores de los parámetros zona 3 relacionadas

$$(1 - B)(1 + 0,266B)FCR_t = a_t \tag{2.11}$$

Las autocorrelaciones ACF y PACF de los residuales se muestran en la figura 2.20. La prueba de Ljung-Box para 15 retardos nos da un valor-p = 0.814, esto nos permite concluir que el modelo es adecuado y que los residuales se pueden considerar ruido blanco.

## 2.6. Estimación del porcentaje de nacimiento

El porcentaje de nacimiento se define como la cantidad de pollos nacidos dividido por la cantidad de huevos fértiles cargados, se representa como  $\%N_t$  al porcentaje de



**Figura 2.18:** Funciones ACF y PACF de los residuales zona 2 integrados

nacimientos del periodo  $t$ . Para la estimación de los porcentajes de nacimiento disponemos de los datos mensuales del 2002 al 2010 para las tres plantas de incubación, a las que llamaremos INC1, INC2 e INC3.

Como se procedió para los parámetros anteriores vamos primero a examinar si existen diferencias significativas entre los porcentajes de nacimiento entre las incubadoras. Para ello realizamos una ANOVA de dos factores considerando la planta de incubación como factor con tres niveles y el año con 9 niveles. Utilizaremos la prueba de Tukey para probar si hay diferencias entre la medias de cada planta.

El análisis ANOVA indica que hay diferencia significativa para cada factor, la figura 2.21 muestra el resumen de la comparación de medias con la prueba de Tukey.

Se observa que las medias entre las incubadoras INC1 e INC3 no hay diferencias significativas, por lo que utilizaremos un solo promedio para estas dos plantas de incubación. La media de la incubadora INC2 es diferente significativamente de las medias de las incubadoras INC1 e INC3.

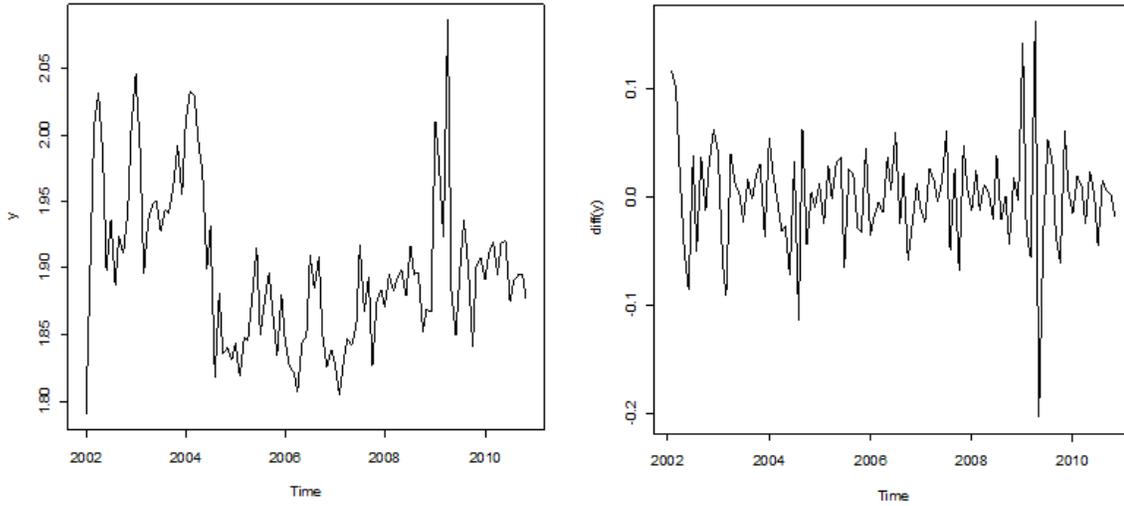


Figura 2.19: Serie FCR zona 3 relacionadas

### 2.6.1. Predicción de nacimientos INC1 e INC3

En la gráfica 2.22 se observa la serie  $Y_t = \ln(\%N_t)$  (logaritmo natural del porcentaje de nacimientos).

Para estimar los parámetros del mejor modelo utilizaremos el modelizador automático de SPSS bajo el criterio BIC. El mejor modelo sugerido es ARMA(2,0,1) con BIC=-7.297. Los estimadores de los parámetros de este modelo se resumen en la tabla 2.9.

Type	Coef	SE Coef	T	P
Constante	-0.227	0.005	-49.138	0.000
AR(1)	1.682	0.099	16.924	0.000
AR(2)	-0.780	0.077	-10.081	0.000
MA(1)	0.811	0.126	6.451	0.000

Tabla 2.9: Estimadores de los parámetros para INC1 e INC3

La ecuación en diferencias queda determinada por la expresión  $(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2)Y_t = (1 - \Theta B)a_t$ , reemplazando por los estimadores de la tabla 2.9 nos queda la ecuación 2.12

$$(1 - 1,682B + 0,780B^2)(\ln(\%N_t + 0,227)) = (1 - 0,811B)a_t \tag{2.12}$$

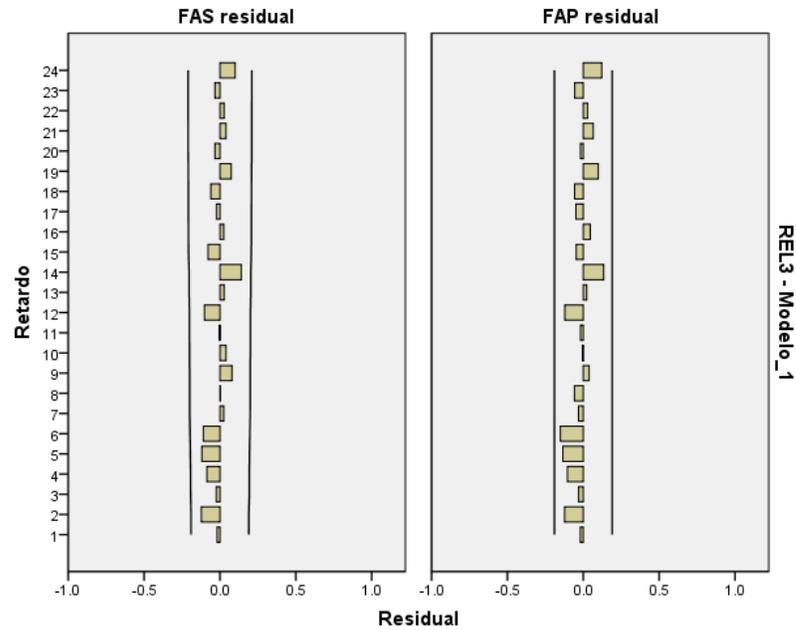


Figura 2.20: ACF y PACF de los residuales zona 3 relacionadas

donde,  $a_t$  es ruido blanco .

Para finalizar analizamos los residuales. Las funciones ACF y PACF de la figura 2.23 muestran que no hay correlaciones significativas, la prueba de Ljung-Box para 15 autocorrelaciones muestra un  $valor - p = 0,140$  con lo que concluimos que el modelo es adecuado.

## 2.6.2. Predicción de nacimientos INC2

En la gráfica 2.24 se observa la serie original del porcentaje de nacimientos, esta serie presenta un comportamiento estacional, haciendo una transformación  $Y_t = (1 - B)(1 - B^{12})$  llegamos a la serie diferenciada que también se muestra en la gráfica 2.24.

Analizando las funciones *ACF* y *PACF* podemos sugerir los modelos *SMA(2)* o *SAR(2)* en la parte estacional. El mejor modelo considerando el criterio *BIC* es el modelo *SMA(2)*. Los estimadores de los parámetros de este modelo se resumen en la tabla 2.10.

**Comparaciones múltiples**

nac  
DHS de Tukey

(I)planta	(J)planta	Diferencia de medias (I-J)	Error típ.	Sig.	Intervalo de confianza 95%	
					Límite inferior	Límite superior
INC1	INC2	-.022921*	.0056373	.000	-.036200	-.009643
	INC3	-.002732	.0056373	.879	-.016011	.010546
INC2	INC1	.022921*	.0056373	.000	.009643	.036200
	INC3	.020189*	.0056373	.001	.006910	.033468
INC3	INC1	.002732	.0056373	.879	-.010546	.016011
	INC2	-.020189*	.0056373	.001	-.033468	-.006910

Basadas en las medias observadas.  
El término de error es la media cuadrática(Error) = .002.

\*. La diferencia de medias es significativa al nivel .05.

**Figura 2.21:** Prueba de Tukey para nacimientos

Type	Coef	SE Coef	T	P
SMA(1)	0.947	0.117	8.084	0.000
SMA(2)	-0.348	0.125	-2.775	0.007

**Tabla 2.10:** Estimadores de los parámetros para INC2

La ecuación en diferencias queda determinada por la expresión  $Y_t = (1 - \Theta_1 B^{12} - \Theta_2 B^{24})a_t$ , reemplazando por los estimadores de la tabla 2.10 nos queda la ecuación 2.13

$$(1 - B)(1 - B^{12}) \%N_t = (1 - 0,947B^{12} + 0,348B^{24})a_t \tag{2.13}$$

donde,  $a_t$  es ruido blanco .

Para finalizar analizamos los residuales. Las funciones ACF y PACF de la figura 2.25 muestran que no hay correlaciones significativas, la prueba de Ljung-Box para 18 autocorrelaciones muestra un *valor - p* = 0,436 con lo que concluimos que el modelo es adecuado.

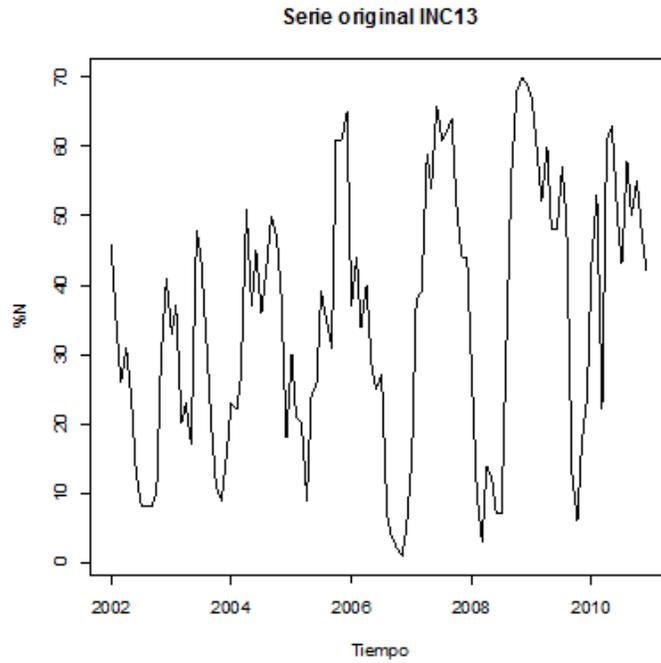


Figura 2.22: Serie original y diferenciada para INC1 e INC3

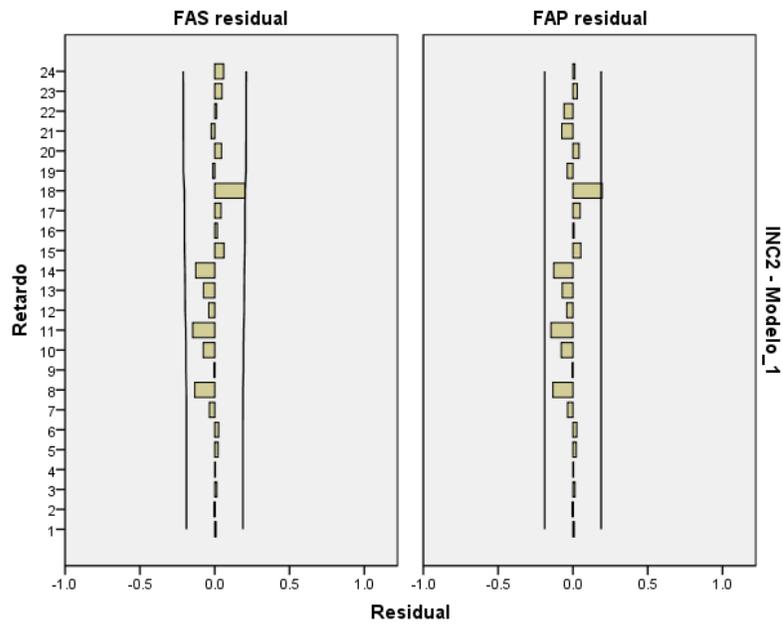


Figura 2.25: Serie ACF y PACF de los residuales

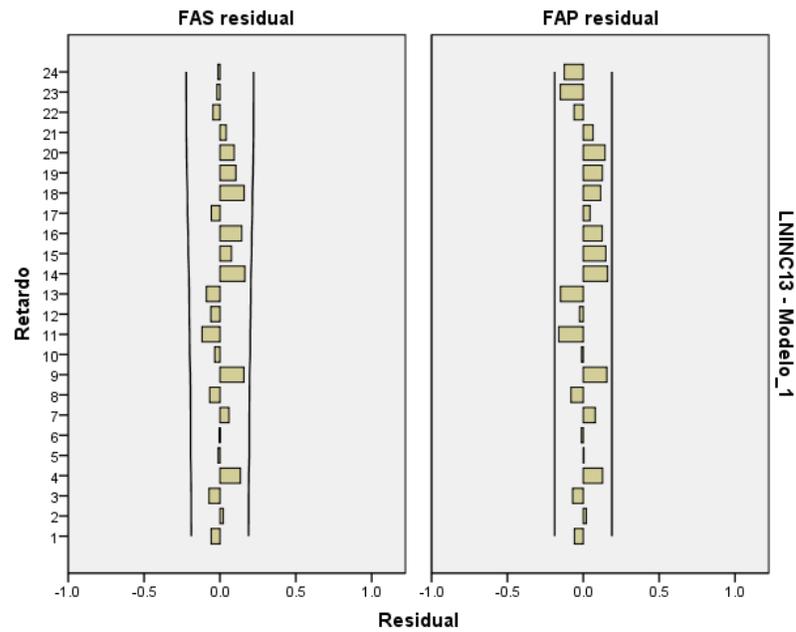


Figura 2.23: Serie ACF y PACF de los residuales

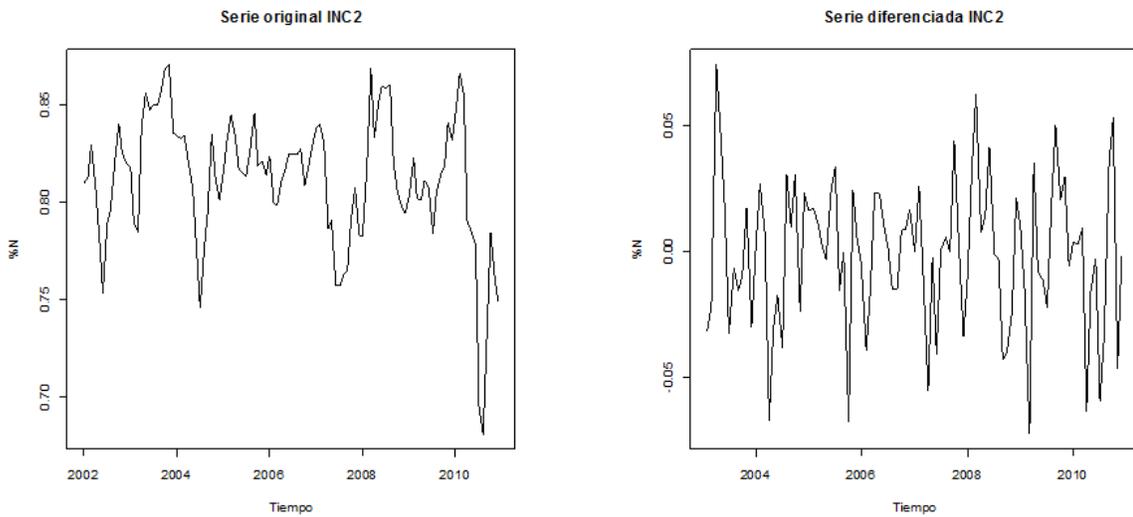


Figura 2.24: Serie original y diferenciada para INC2

## CAPITULO 3

# Formulación del modelo matemático

### 3.1. Introducción

La formulación del modelo matemático es el desafío más grande de este trabajo ya que en el problema intervienen un sinnúmero de factores y variables. Por el tamaño del problema la solución manual o aproximaciones mediante programación convencional son solamente esfuerzos vanos. El impacto de una mala decisión en la programación involucra millones de dólares ya que de por medio existen decisiones derivadas de la planeación como son: importación de reproductoras, importación de huevo fértil, etc.

La programación de entrega de pollos bb a granjas de engorde se realiza mensualmente, por tanto nos enfocaremos en este horizonte de planeación, aunque el modelo permite extender el horizonte fácilmente hasta 12 meses o más, sin embargo por las condiciones cambiantes del entorno no vale la pena extenderse a un horizonte tan lejano.

Como se mencionó en el capítulo introductorio la planeación inicia con el secuenciamiento de las granjas para las regiones de proceso consideradas. En el caso de la compañía en estudio las granjas están agrupadas en dos vueltas independientes a las que llamaremos región B y región A. La región A actualmente tiene 49 granjas y la región B tiene 61 granjas. Para mejorar la secuencia actual de granjas utilizaremos un

algoritmo glotón y posteriormente mejoraremos la solución encontrada utilizando la heurística 2-Opt, los dos métodos se detallan en la sección 3.2.

Una vez resuelto el problema de la secuenciación nos enfrentamos a un problema mayor que es el de la programación de la entrega de pollitos a las granjas, esto lo abordaremos en la sección 3.3. Un problema intermedio es la programación de las entregas de pollitos desde las incubadoras, este problema se abordará en la sección 3.5. Finalmente debemos programar el envío de los pollos a las faenadoras, este problema se abordará en la sección 3.6. Se cierra el capítulo con el cálculo del consumo de alimento, esta sección es solamente una consecuencia de los resultados obtenidos en la optimización.

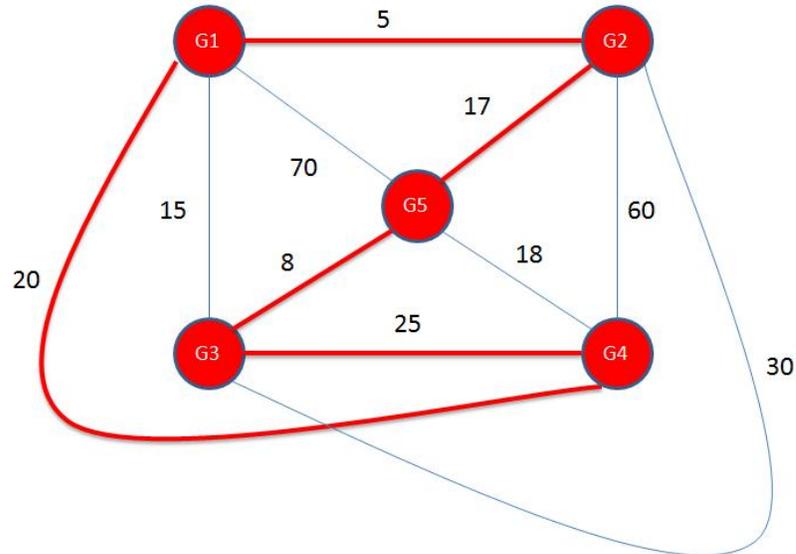
## 3.2. Secuenciamiento de granjas

Iniciamos este capítulo recordando algunas definiciones de teoría de grafos ya que utilizaremos estos conceptos para el desarrollo de las heurísticas a utilizar. Para ampliar las definiciones de las heurísticas expuestas vea [6].

**Definición 3.2.1.** Un grafo  $G$  es un par  $(V, E)$  donde  $V$  es un conjunto (llamado conjunto de vértices o nodos) y  $E$  un subconjunto de  $V \times V$  (conjunto de aristas). Para observar la representación de un grafo vea la figura 3.1

**Definición 3.2.2.** Sean  $x, y \in V$ , se dice que hay un camino en  $G$  de  $x$  a  $y$  si existe una sucesión finita no vacía de aristas  $\{x, v_1\}, \{v_1, v_2\}, \dots, \{v_n, y\}$ , donde:

- $x$  e  $y$  se llaman los extremos del camino.
- Cuando los dos extremos de un camino son iguales, el camino se llama circuito o camino cerrado o ciclo (sin aristas repetidas).
- Un vértice  $a$  se dice accesible desde el vértice  $b$  si existe un camino entre ellos. Todo vértice es accesible respecto a si mismo



**Figura 3.1:** Representación de un grafo

**Definición 3.2.3.** Dado un grafo  $G = (V, E)$ , se dice que el grafo  $G$  tiene un ciclo Hamiltoniano si existe un camino que pasa por todos los vértices de  $G$  exactamente una vez y regresa al vértice de donde partió.

La definición 3.2.3 es importante ya que nos concentraremos en encontrar ciclos Hamiltonianos para la solución del problema de secuenciación. La figura 3.1 resalta un ciclo Hamiltoniano.

### 3.2.1. Heurística Glotona

El primer paso para construir una ruta o tour del problema del agente viajero (TSP) es desarrollar una heurística voraz que proporcione la solución inicial, luego mejoraremos éste Tour con la aplicación de la heurística 2-Opt. El algoritmo 1 permite encontrar el tour mejorado. Vea [9] para ampliar el estudio de heurísticas glotonas.

---

**Algoritmo 1** Algoritmo glotón

---

**Entrada:**  $G = (V, E)$ , grafo no dirigido completo

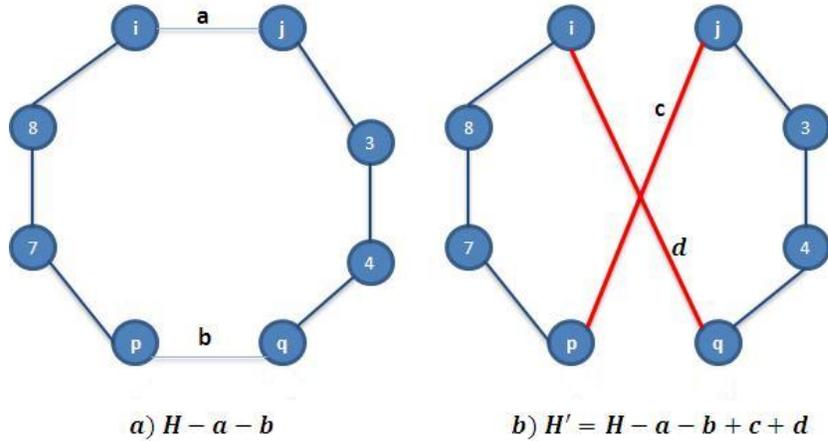
- 1:  $X = \{1, 2, \dots, n\}$   
 $w : E \rightarrow R$   
 $(i, j) \rightarrow w(i, j)$
  - 2: una ponderación de las aristas
  - 3: INICIO
  - 4:  $G' = (X, C)$  Solución,  $X' = \{1\}$  nodos visitados
  - 5:  $i = 1$
  - 6: **mientras**  $X' \neq X$  **hacer**
  - 7:    Calcular  $j$  tal que
  - 8:     $w_{ij} = \text{Min}\{w_{ik}/k \in X - X'\}$
  - 9:     $C = C \cup \{(i, j)\}$
  - 10:     $X' = X' \cup \{j\}$
  - 11:     $i = j$
  - 12: **fin mientras**
  - 13:  $C = C \cup \{\text{Arista que completa el ciclo}\}$
- 

**3.2.2. Heurística 2-Opt**

Una heurística más eficaz que mejora la secuencia de las granjas es el método 2-Opt, vea [4] para profundizar más sobre el tema. Este algoritmo inicia con un ciclo Hamiltoniano  $H$ , se borran dos aristas de  $H$ , produciendo así 2 caminos desconectados, se reconectan estos caminos de tal forma que producen otro ciclo Hamiltoniano  $H'$  que contiene aristas diferentes de la eliminadas de  $H$ , así  $H$  y  $H'$  difieren en 2 aristas, las restantes aristas son comunes a los dos ciclos. La figura 3.2 muestra el proceso gráficamente. El algoritmo 2 detalla el pseudo código para la ejecución del proceso 2-Opt.

Se calcula el peso total  $w(H')$  de la ruta  $H'$  y si  $w(H') < w(H)$  reemplazar  $H$  con  $H'$ , se continua el proceso hasta que no se pueda hacer otra mejora por intercambio de aristas. Hay  $\binom{n}{2}$  subconjuntos de 2 aristas un un ciclo de  $n$  aristas.

Sea  $H = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  un camino Hamiltoniano en el orden  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , sea  $X = \{x_i, x_j\}$  el conjunto de dos aristas en  $H$ , las cuales serán borradas y reemplazadas por las aristas  $Y = \{y_p, y_q\}$ , si hay una mejora, es decir  $H' = (H - X) \cup Y$  es la nueva ruta y mejorada. En total hay:



**Figura 3.2:** Unión de vértices para formar un camino 2-Opt

$$\frac{n(n - 3)}{2} \tag{3.1}$$

rutas posibles para  $H'$ , dada una ruta  $H$ . Para cualquiera de estas rutas se denotará la mejora como:

$$\delta = w(H) - w(H') = w(x_i) + w(x_j) - w(y_p) - w(y_q) \tag{3.2}$$

Se examinarán todas las  $\frac{n(n-3)}{2}$  rutas  $H'$  y se retendrá una de ellas, aquella cuya  $\delta$  sea la máxima, si  $\delta_{max}$  es negativa o cero entonces se ha encontrado una solución 2-Opt. Los algoritmos 1 y 2 se implementaron en Excel para el ruteo de las granjas.

### 3.3. Programación de entrega de pollitos bb a granjas

La sección 3.2 nos permitió encontrar la mejor secuencia de ingreso de las granjas. En esta sección utilizaremos esta secuencia para programar el ingreso de pollitos bb a cada una de las granjas para las dos zonas consideradas. El modelo es el mismo para las dos zonas, así que solamente describiremos el modelo en general y el capítulo siguiente mostraremos los resultados de la aplicación del modelo matemático a las dos zonas.

Para un detalle de la modelización con programación entera puede referirse a [12].

El problema a resolver en esta sección es la planificación de ingreso de pollitos bb a las granjas de engorde. Para plantear el modelo necesitamos definir las variables de decisión y los índices que se utilizarán en la modelización, por facilidad utilizaremos la terminología de GAMS.

### SETS

- $t$ , día de ingreso de pollito bb,  $t = 1, 2, \dots, T$ , donde  $T$  es el horizonte de planeación, en nuestro caso puede ser 30 o 31 días.
- $i$ , granjas de producción de pollos,  $i = 1, 2, \dots, n$ , donde  $n$  es el número de granjas que entran en la secuencia de las granjas que reciben en el periodo de planificación. Por ejemplo  $n = 33$ .
- $e$ , edades de faenamiento,  $e = 40, 41, 42, 43$ .

### VARIABLES

- $Z$  Costo de ingresar los pollos a las granjas
- $X_{ti}$ , cantidad de envíos a la granja  $i$  en el día  $t$
- $Y_{tie}$ , cantidad de pollos de la granja  $i$  que se faenarán en el día  $t + e$

La variable  $X$  es entera y la variable  $Y$  es positiva,  $Z$  es la función a minimizar.

### PARAMETERS - TABLES

- $I_t$ , capacidad disponible de pollitos bb en el día  $t$ .
- $Dmin_i$ , días de descanso mínimos antes de ingresar el nuevo lote de producción en la granja  $i$
- $cG_i$ , capacidad de encasamiento total de la granja  $i$
- $L_i$ , tamaño del lote de pollos a enviar a la granja  $i$ .

- $V_i$ , la viabilidad de la granja  $i$
- $F_t$ , la faena requerida en el día  $t$
- $d_{ti}$ , número de días entre el último ingreso de la granja  $i$  y el próximo ingreso en el día  $t$ .
- $C_{ti}$ , costo de enviar los pollos a la granja  $i$  en el día  $t$

## EQUATIONS

El costo queda determinado por la ecuación (3.3).

$$Z = \sum_t \sum_i C_{ti} X_{ti} \quad (3.3)$$

La ecuación (3.3) será la función objetivo a minimizar.

El problema tiene las siguientes restricciones:

## CAPACIDAD DE INCUBACION

Las incubadoras tienen una capacidad limitada de producción de pollito bb, por tanto debemos restringir la entrega de bb a las granjas de manera que no sobrepase la capacidad máxima. Se debe satisfacer la restricción (3.4).

$$\sum_i L_i X_{ti} \leq I_t \quad (3.4)$$

## CAPACIDAD DE GRANJA

Los pollos a ingresar tienen que satisfacer la restricción de capacidad de granjas. Debemos exigir que las granjas completen toda su capacidad, entonces se debe cumplir la desigualdad (3.5).

$$\sum_t L_i X_{ti} = cG_i \quad (3.5)$$

Hay que tener cuidado con las restricciones (3.5) ya que en los extremos no siempre va a satisfacer la igualdad, en algunos casos se considera la desigualdad “ $\leq$ ”.

### DIAS DE DESCANSO

Para garantizar que las granjas ingresen después de un periodo mínimo de descanso se debe satisfacer la desigualdad (3.6).

$$d_{ti}X_{ti} \geq Dmin_i \times X_{ti} \quad (3.6)$$

Normalmente en granjas de pollos de engorde el periodo de descanso mínimo es de 15 días, considerando que los pollos pasarán en granja un máximo de 45 días, el periodo mínimo entre ingresos será de 60 días. Dependiendo de la capacidad instalada este periodo podría disminuir en ciertos casos muy aislados hasta 10 días.

### FAENAMIENTO

El ingreso de pollos bb deben satisfacer los requerimientos de pollo en pie que deben ser enviados a la planta procesadora en el día de faenamiento  $t+e$ . La desigualdad (3.7) garantiza que se cumpla el faenamiento.

$$\sum_i \sum_e Y_{(t+e)ie} \leq F_{t+e} \quad (3.7)$$

### RESTRICCIÓN DE FLUJO

Naturalmente es necesario considerar la restricción de flujo, es decir, que lo que ingresó, menos la mortalidad, debe ser igual a lo que salió, la restricción (3.8) refleja esta condición.

$$\sum_e Y_{(t+e)ie} = V_i L_i X_{ti} \quad (3.8)$$

La restricción (3.8) debe satisfacerse  $\forall t$  y  $\forall i$ .

Nuevamente aquí consideramos la relación entre los días de faena  $k$  y de ingreso

$t$ , obviamente el día de faena será igual al día de ingreso más la edad de faena  $e$  considerada.  $k = t + e$ .

## 3.4. Modelo integrado para toda la cadena

Finalmente hemos llegado a la integración de todo el modelo para la cadena de producción. En esta sección juntaremos las ecuaciones definidas anteriormente en un modelo consolidado que nos permite programar la producción de pollos.

### 3.4.1. Modelo general

La función objetivo a considerar es la minimización de costo, esta función se definió en la sección 3.3. El costo que se considera no es el costo contable o financiero, sino un costo simbólico que nos ayuda a secuenciar el ingreso de pollo bb a las granjas. El modelo matemático formal queda expresado mediante las siguientes ecuaciones y desigualdades:

$$\text{Min}Z = \sum_t \sum_i C_{ti} X_{ti} \quad (3.9)$$

sujeto a las restricciones

$$\sum_i L_i X_{ti} \leq I_t \quad (3.10)$$

$$\sum_t L_i X_{ti} = cG_i \quad (3.11)$$

$$d_{ti} X_{ti} \geq Dmin_i \times X_{ti} \quad (3.12)$$

$$\sum_{ie} Y_{(t+e)ie} \leq F_{t+e} \quad (3.13)$$

$$\sum_e Y_{(t+e)ie} = V_i L_i X_{ti} \quad (3.14)$$

$$X_{ti} \text{ integer } \forall t, i \quad (3.15)$$

$$Y_{tie} \geq 0 \quad \forall t, i, e \quad (3.16)$$

En la siguiente sección abordamos el problema de asignación de las incubadoras, es decir, debemos resolver el problema de decidir qué incubadora entregará los pollos a la granja  $i$ .

### 3.5. Programa de incubación

De la misma manera que en la sección anterior procedemos con la formulación del modelo para la planificación de las entregas de pollito bb a granjas desde las incubadoras.

#### SETS

- $t$ , día de ingreso de pollo bb,  $t = 1, 2, \dots, T$ , donde  $T$  es el periodo de planificación, en nuestro caso  $T = 30$  o  $T = 31$ .
- $i$ , granjas,  $i = 1, 2, \dots, n$ , donde  $n$  es el número de granjas que entran en la secuencia de las granjas que reciben en el periodo de planificación
- $j$ , incubadoras,  $j = 1, 2, 3$

#### VARIABLES

- $X_{tij}$ , la cantidad de pollos bb a entregar en el día  $t$  a la granja  $i$  desde la incubadora  $j$ .

## PARAMETERS

- $BB_{ti}$ , la cantidad de pollito bb requerido por la granja  $i$  en el día  $t$
- $I_t$ , capacidad total de incubación en el día  $t$
- $H_{tj}$ , capacidad de la incubadora  $j$  en el día  $t$
- $C_{ij}$ , costo de transporte de la incubadora  $j$  a la granja  $i$

### 3.5.1. Modelo matemático

El objetivo es determinar qué incubadora debe entregar los pollitos bb a las granjas, para solucionar el problema utilizamos el modelo del transporte generalizado, minimizando el costo total de distribución. Como proveedores tenemos las incubadoras y como clientes están las granjas.

El modelo queda expresado mediante el siguiente conjunto de ecuaciones y desigualdades.

$$\text{Min}Z = \sum_t \sum_i \sum_j C_{ij} X_{tij} \quad (3.17)$$

Sujeto a las restricciones:

$$\sum_i X_{tij} \leq H_{tj} \quad (3.18)$$

$$\sum_j X_{tij} = BB_{ti} \quad (3.19)$$

$$\sum_i \sum_j X_{tij} \leq I_t \quad (3.20)$$

$$X_{tij} \geq 0 \quad (3.21)$$

## 3.6. Programa de faenamiento

De la misma manera que en la sección anterior es necesario programar la entrega de pollo en pie a las plantas faenadoras y al centro de ventas en pie. En esta sección nuevamente debemos decidir que granjas deben entregar a las plantas de faena y cuales enviarán a venta en pie. El problema es del tipo transporte generalizado.

### SETS

- $t$ , día de faenamiento,  $t = 1, 2, \dots, T$ , donde  $T$  es el periodo de planificación, en nuestro caso  $T = 30$  o  $T = 31$ .
- $i$ , granjas,  $i = 1, 2, \dots, n$ , donde  $n$  es el número de granjas que entran en la secuencia de las granjas que reciben en el periodo de planificación
- $j$ , destinos (plantas de faena o venta pie),  $j = 1, 2, 3, 4, 5$

### VARIABLES

- $X_{tij}$ , la cantidad de pollos pie a entregar en el día  $t$  al centro  $j$  desde la granja  $i$ .

### PARAMETERS

- $F_{tj}$ , la cantidad de pollo en pie requerido por el centro  $j$  en el día  $t$
- $G_{ti}$ , cantidad de pollos en pie disponibles en el día  $t$  en la granja  $i$
- $FT_t$ , la cantidad total de pollo en pie requerida en el día  $t$
- $C_{ij}$ , costo de transporte desde el centro  $j$  a la granja  $i$

### 3.6.1. Modelo matemático

El modelo queda determinado por el siguiente conjunto de ecuaciones y desigualdades.

$$\text{Min}Z = \sum_t \sum_i \sum_j C_{ij} X_{tij} \quad (3.22)$$

Sujeto a las restricciones:

$$\sum_i X_{tij} = F_{tj} \quad (3.23)$$

$$\sum_j X_{tij} = G_{ti} \quad (3.24)$$

$$\sum_i \sum_j X_{tij} = FT_t \quad (3.25)$$

$$X_{ijk} \geq 0 \quad (3.26)$$

Para finalizar la modelización debemos determinar el consumo de alimento para los pollos que estamos programando. La siguiente sección se encarga de proyectar este rubro que será de vital importancia en la planificación del abastecimiento de las materias primas. El tema de materias primas no se abarca en esta tesis ya que es un problema de gran dimensión y sale fuera de los alcances del presente trabajo.

### 3.7. Consumo de alimento

Para la planificación del consumo de alimento utilizaremos las variables mencionadas en el capítulo de forecasting, peso y conversión alimenticia.

#### PARAMETERS

- $BW_{ti}$  el peso promedio de faenamiento del pollo de la granja  $i$  en el periodo  $t$ .
- $FCR_{ti}$  la conversión de alimento de la granja  $i$  en el periodo  $t$ .
- $X_{ti}$  la cantidad de pollos a ingresar en la granja  $i$  en el periodo  $t$ .
- $FPB_{ti}$  el consumo de alimento por pollo en la granja  $i$  en el periodo  $t$ .
- $V_{ti}$  la viabilidad de la granja  $i$  en el periodo  $t$ .
- $CA_{ti}$  el consumo de alimento por pollo de la granja  $i$  en el periodo  $t$ .

El consumo de alimento por cada pollo queda determinado por el producto de la conversión por el peso promedio del pollo. La siguiente relación nos permite expresar matemáticamente esta definición.

$$FPB_{ti} = BW_{ti} \times FCR_{ti} \quad (3.27)$$

Para encontrar el consumo total de alimento bastaría multiplicar el consumo por pollo por la cantidad de pollos que llegan vivos al faenamiento, este cálculo se expresa en la siguiente relación matemática.

$$CA_{ti} = BW_{ti} \times FCR_{ti} \times V_i \times X_{ti} \quad (3.28)$$

El capítulo siguiente es la culminación de este trabajo con el resumen de los resultados obtenidos en el proceso de planificación.

---

**Algoritmo 2** Procedimiento 2-Opt

---

**Entrada:**  $H = \{x_1, \dots, x_n\}$ , ruta inicial

```

1: Best=TRUE
2:  $Cost_1 = C_0, k = 1$ 
3: Repeat
4:  $\delta_{max} = 0$ 
5: para  $i = 1, i = n - 2$  hacer
6:   para  $j = i + 2, j = n$  hacer
7:     /* Busca los vértices a intercambiar
8:      $d = (w(x_{i1}, x_{i2}) + w(y_{j1}, y_{j2})) - (w(x_{i1}, y_{j2}) + w(y_{j1}, x_{i2}))$  (Ver fig. 3.2)
9:     si  $d > \delta_{max}$  entonces
10:      /* Se ha encontrado un mejor par de aristas
11:      devolver  $\delta_{max} = d;$ 
12:      Guardar tanto  $i$  como  $j$  para intercambio
13:      y reordenamiento de vértices
14:    fin si
15:  fin para
16:  si  $\delta_{max} > 0$  entonces
17:    /* Intercambia un par de aristas porque
18:    /* la ruta ahora es más corta
19:    devolver  $H = H - \{a, b\} \cup \{c, d\}$ 
20:     $Cost_k = Cost_{k-1} + \delta_{max}$ 
21:     $\delta_{max} = 0$ 
22:  fin si
23: fin para
24: si  $Cost_k < Cost_{k-1}$  entonces
25:   Best=TRUE
26:    $k = k + 1$ 
27: si no
28:   Best=FALSE
29:   /* Fin del algoritmo
30:   /* Ha llegado a una solución 2-Opt mejorada
31: fin si
32: Until Best=FALSE

```

---

# CAPITULO 4

## Resultados

### 4.1. Secuenciamiento de granjas

Iniciamos el proceso de planeación con la optimización de la secuencia de ingreso de granjas. La secuencia actual presenta serios inconvenientes logísticos durante la recolección de los pollos para el faenamiento. El grupo de recolección debe realizar un recorrido (**tour**) de tal manera que visite cada granja exactamente una vez. Este recorrido lo debe realizar aproximadamente 5.5 veces en el año. Como la secuencia está totalmente desordenada, el grupo tiene que desplazarse largas distancias entre cada par de granjas que visita. Esto ocasiona muchas paras en las plantas de proceso, lo que a su vez generan retrasos en la producción.

Proponemos la reorganización de la secuencia de granjas al considerar un tour que mejore los tiempos de recolección y minimice los tiempos de paralizaciones en la planta. Primero utilizamos un algoritmo glotón para mejorar la ruta y posteriormente utilizamos la heurística 2-Opt para mejorar la secuencia obtenida.

La secuencia inicial para la zona 1 tiene un recorrido total de 13.191 km anuales, la siguiente es la secuencia actual de las granjas.

{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,

31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,1}

La secuencia mejorada es la que se muestra a continuación.

{1,3,11,7,9,48,32,12,42,37,10,25,24,31,35,39,22,26,23,15,19,18,17,20,8,43,28,36,38,4,27,49,45,16,34,13,46,29,14,30,40,2,47,44,5,33,21,41,6,1}

De igual manera se reorganizó las granjas de la zona 2 que inicialmente tiene un recorrido de 1850 Km. La ruta mejorada es la siguiente:

{1,48,51,49,30,53,2,38,33,61,21,18,55,46,7,25,17,42,28,4,10,5,40,41,15,57,23,9,3,58,43,22,36,24,26,44,35,12,37,34,54,6,60,11,20,14,29,59,8,16,56,39,31,13,47,32,50,27,52,19,45}

La tabla 4.1 muestra el resumen comparativo de las distancias recorridas y los ahorros que se obtienen al mejorar la secuencia inicial de granjas.

Distancia	Un ciclo	Año
Zona 1		
Actual	2398	13189
2-Opt	461	2537
Ahorro	1937	10654
Zona 2		
Actual	1850	10175
2-Opt	929	5110
Ahorro	921	5066
<b>Resumen</b>		
<b>Actual</b>	<b>4248</b>	<b>23366</b>
<b>2-Opt</b>	<b>1390</b>	<b>7645</b>
<b>Ahorro</b>	<b>2858</b>	<b>15721</b>

**Tabla 4.1:** Resumen secuenciación

El ahorro en el recorrido es de 15721 Km al año, pero como el viaje es redondo, el ahorro realmente es el doble, es decir, 31442 Km anuales. También debemos mencionar que las distancias fueron calculadas utilizando las coordenadas geodésicas, por tanto los Km recorridos serán mayores a los que se obtuvieron en el presente trabajo. Esto representa un ahorro significativo en el costo de transporte para el recorrido del grupo de recolección que realiza el tour y también un ahorro en el costo de paralización de la planta de proceso. El costo estimado para el recorrido del grupo de recolección es de

18.800 usd anuales aproximadamente, el costo para las plataformas por el mal diseño del circuito es aproximadamente 28.000 usd anuales. El ahorro total es de aproximadamente 46.800 usd anuales por concepto logístico.

## 4.2. Programa de ingreso de pollo bb

Basado en la secuencia de ingreso de la sección anterior realizamos la programación del ingreso de pollito bb a las granjas de engorde. Los resultados de la corrida de producción para el caso de estudio se muestra en la figura 4.1. El Ingreso de pollo bb es ordenado y mantiene la secuencia de ingreso de las granjas. A diferencia de la programación tradicional el programa optimizado permite utilizar la capacidad de las operaciones eficientemente.

## 4.3. Programa de faenamiento

El programa de faena es uno de los procesos más importantes en la cadena de producción de pollo, de su cumplimiento dependerá el nivel de servicio alcanzado. Se concluye esta etapa de planeación con la entrega de pollos desde las granjas hacia su destino, planta faenadora o venta en pie. Los resultados del proceso de optimización fueron exportados a Excel y mediante desarrollo de macros con VBA logramos obtener el **Programa de Pollos**. Este reporte es de vital importancia pues constituye la herramienta que utilizan los gerentes de producción para ejecutar operativamente el mismo.

## 4.4. Programa de cargas de huevo fértil

El programa de entrega de pollo bb descrito en la sección 4.2 proporciona la información necesaria para la programación de las cargas de huevo fértil en las incubadoras y así determinar qué planta de incubación entregará los pollos bb a las granjas. Al

igual que en la sección anterior mostraremos a continuación una fracción del reporte de incubación que se envía cada mes a los gerentes de incubación para la ejecución del programa y ponerlo en operación.

## 4.5. Análisis comparativo de los resultados

En esta sección presentamos un comparativo de pollo bb por día y por semana. En lo que sigue la programación anterior hará referencia al sistema de planificación sin utilizar la optimización, mientras que la programación actual se referirá al nuevo modelo de programación vía optimización.

En la figura 4.4 se observa la planificación de entregas de pollo bb por día. En esta figura es muy notorio como el nuevo programa se aproxima a la capacidad máxima de carga. En el sistema anterior en la entrega tiende a un límite máximo de 286, impuesto por el propio sistema. Si la demanda de pollo bb empieza a crecer, el sistema ya no podrá controlar el uso de la capacidad y mantener el rango de edades de faenamiento definidas, necesariamente tendrá que adelantar o retrasar la faena para poder cumplir con la restricción de capacidad de incubación.

Aparentemente en las condiciones actuales con capacidad de incubación superior el sistema anterior parecería adecuado, sin embargo cuando comparamos las edades de faena, es muy notoria la ineficiencia de este método, ya que tiene altas concentraciones de faena en edades mayores a las edades con el programa actual, esto lo analizaremos más adelante.

La gráfica 4.5 muestra el uso de la capacidad semanal de la incubadora, como se mencionó anteriormente, la capacidad en exceso que hoy en día se tiene de alguna manera garantiza que no se sobrepase este límite. La gran ventaja que el nuevo sistema de planificación tiene radica en la integración de los procesos propios de la planificación de las operaciones.

La figura 4.6 muestra el comparativo de las edades de faenamiento, es importante

notar la concentración en el sistema actual de planificación en la edades 41, 42 y 43 días, estas edades son las apropiadas para lograr el peso promedio objetivo al cual deben faenarse los pollos. En contraste el sistema anterior tiende a mover las edades de faena hacia los 44, 45 y 46 días. Es muy lógico que este programa mueva las edades ya que de lo contrario no podría concentrar los ingresos en los días de incubación hábiles y mantener el volumen de faena que se requiere. Por su propia naturaleza este sistema no garantizará a la faenadora el peso promedio esperado, en consecuencia habrá serios inconvenientes con el cumplimiento hacia los clientes. Por otro lado el sistema anterior ralentiza las vueltas, lo que ocasiona que el sistema tenga menor productividad, más adelante resumiremos en términos de costos este efecto.

Otro factor importante a considerar son los días de descanso. La figura 4.7 muestra el comparativo de los días de vacío de la granjas entre los dos métodos. El programa actual permite tener control de los días entre ingresos y por lo tanto controla los días de vacío de la granja. El sistema anterior en cambio al mover las edades de faena está retrasando el próximo ingreso lo que implica una ineficiencia productiva. Los días de rotación de la granja serán menores, esto se traduce al final de la cadena en un costo de producción más elevado. Al igual que en el análisis anterior, el hecho de prolongar las edades de faenamiento implica el prolongamiento de los días de vacío sanitario en las granjas lo que a su vez significa que todo el sistema se vuelva ineficiente.

Resumiendo, la capacidad instalada en pollos bb en todo el sistema es de 10.6 millones de pollos por vuelta. Si considerásemos el sistema de planificación anterior la capacidad anual de producción sería de 56.59 millones de pollos. Con el sistema de planificación actual se logró mejorar la edad de faenamiento promedio, logrando reducir en un día la edad promedio de todo el sistema, esto significó que la capacidad de producción anual se incremente a 57.35 millones de pollos. El incremento en capacidad fue de 760 mil pollos faenados anualmente. Esto implica que la utilidad de operación con la incorporación de ésta investigación a la empresa aumente en 740 mil dólares anuales.

DIA ENTREGA	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330				
1	28	165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
2	0	165	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4	0	0	120	42	0	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
5	0	0	0	0	65	0	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
8	0	0	0	0	0	0	0	34	40	54	72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36	118	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	30	60	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	108	94	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23.5	144	47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70.5	60	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	20	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37	60	94	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47	108	70	0	0	0	0	0	0		
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	120	24	0	0	0		
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	94	0	0	0	
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	141	60	0	
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	71	0	0	
Total	28	329	48	120	42	65	40	21	34	40	54	108	118	144	30	60	66	144	118	144	118	60	90	20	74	60	141	108	70	40	120	329	60	0	0		

Figura 4.1: Secuencia de ingreso de bb

Programa de pollos					Destino			
Día ingreso	Granja	Pollos bb	Día faena	edad	Venta pie	Faena	Total general	
1	1	28	44	43	26		26	
	Total 1					26		26
	2	165	43	42		85		85
			44	43	14	54		68
Total 2					14	140	154	
Total 1					40	140	180	
2	2	165	44	42		36		36
			45	43	28	90		118
	Total 2					28	126	154
	3	48	43	41	40	5	45	
Total 3					40	5	45	
Total 2					68	130	198	
4	4	120	47	43	40	72	112	
	Total 4					40	72	112
	5	42	46	42		25		25
			47	43		15		15
	Total 5						39	39
7	40	46	42		37		37	
Total 7						37	37	
Total 4					40	148	188	
5	8	21	45	40	12		12	
			46	41		8		8
	Total 8					12	8	20
	6	65	46	41	40	20	60	
Total 6					40	20	60	
Total 5					52	28	80	

Figura 4.2: Programa de pollos

			Incubadora ▾ Datos			
			inc1		inc2	
Dia ingreso ▾	Granja ▾	%N ▾	Huevos	Pollos bb	Huevos	Pollos bb
1	1	81.0%	35	28		
	Total 1		35	28		
	2	81.0%	126	102		
		85.0%			74	63
Total 2			126	102	74	63
Total 1			160	130	74	63
2	2	81.0%	101	82		
		85.0%			97	83
	Total 2		101	82	97	83
	3	81.0%	59	48		
Total 3			59	48		
Total 2			160	130	97	83
4	4	81.0%	59	48		
		85.0%			85	72
	Total 4		59	48	85	72
	5	81.0%	52	42		
	Total 5		52	42		
7	81.0%	49	40			
Total 7			49	40		
Total 4			160	130	85	72
5	6	81.0%	80	65		
	Total 6		80	65		
	8	81.0%	26	21		
Total 8			26	21		
Total 5			106	86		
8	9	81.0%	42	34		
	Total 9		42	34		
	10	81.0%	49	40		
	Total 10		49	40		
	11	81.0%	67	54		
	Total 11		67	54		
12	81.0%	2	2			
	85.0%			82	70	
Total 12			2	2	82	70
Total 8			160	130	82	70

Figura 4.3: Programa de incubación

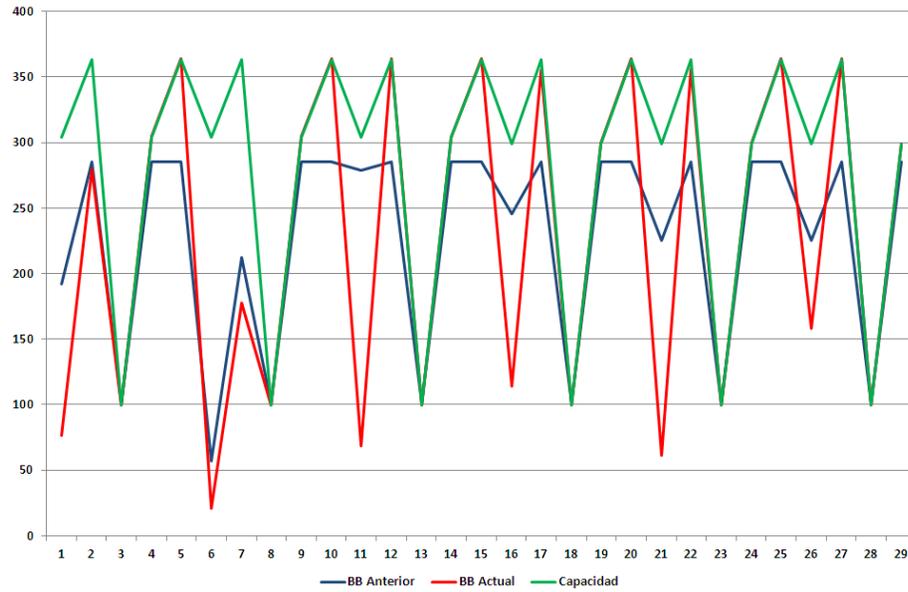


Figura 4.4: Comparativo de ingreso de pollo bb diario

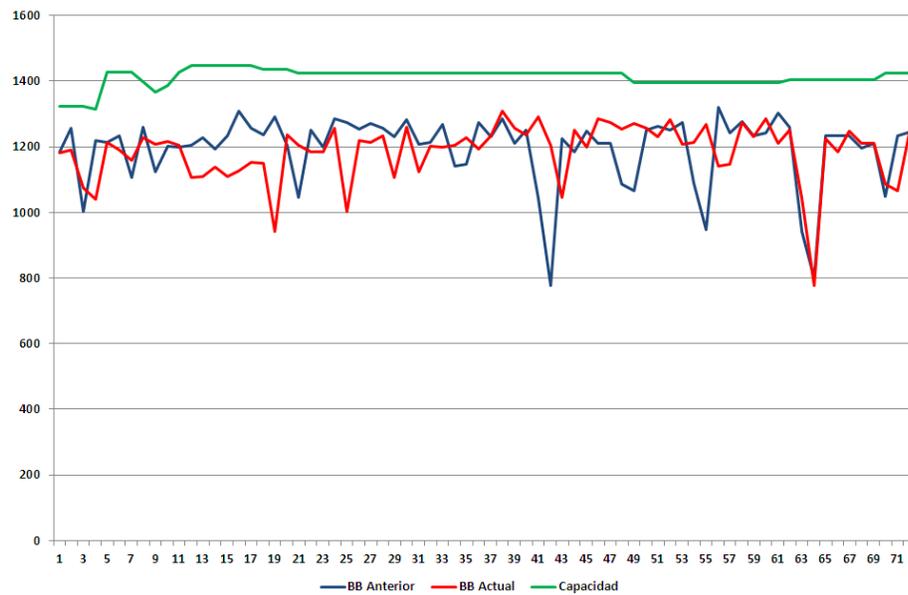


Figura 4.5: Comparativo de ingreso de pollo bb semanal

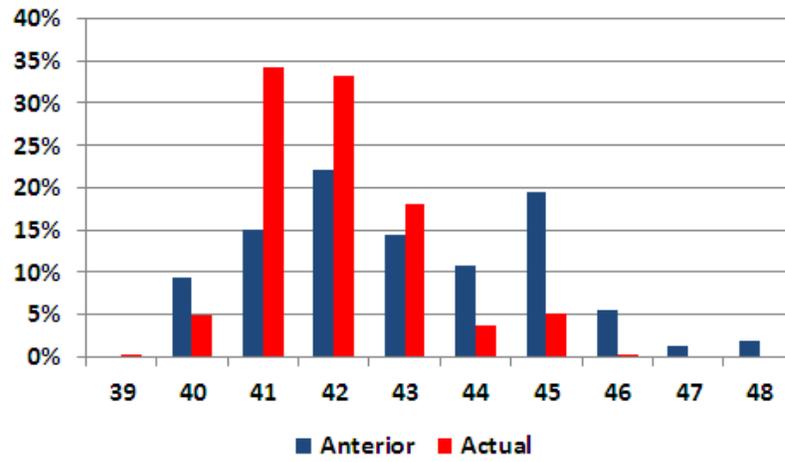


Figura 4.6: Edades de faenamiento

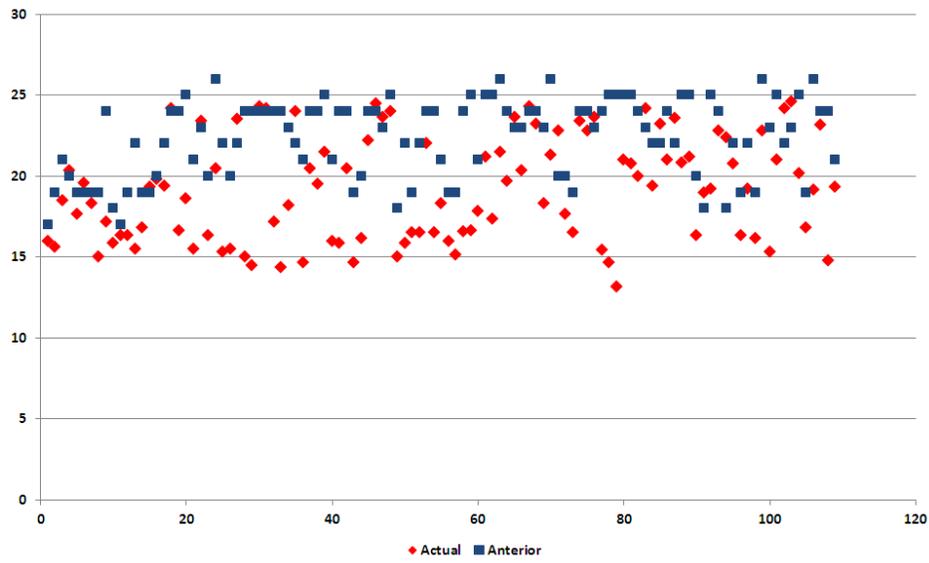


Figura 4.7: Días de descanso

# CAPITULO 5

## Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

Nuestro principal objetivo fue elaborar un modelo de planificación de la producción de pollo que integre a cada uno de los eslabones de la cadena. Los resultados que se mostraron en el capítulo 4 confirman el éxito alcanzado y la puesta en marcha del mismo nos ratifica que la decisión tomada en esa dirección fue la correcta. Hasta hace un par de años la planificación en toda la organización se realizaba en un 100 % utilizando como herramienta solamente el Excel, hoy en día el proceso de planificación ha dado un cambio radical con el sistema de planificación óptimo integral, casi todos los procesos utilizan programación matemática para planificar las operaciones. Naturalmente fue necesario emprender todo un plan de capacitación a los planificadores para que estén aptos para emprender esta magna tarea.

De los análisis realizados en el capítulo 4, el impacto económico de la propuesta es bien importante. Con la implementación del nuevo modelo de planificación, las mejoras planteadas se traducen al final en un incremento en la utilidad operativa del negocio en USD 740 mil anuales. Por otro lado la capacidad adicional de 760 mil pollos implica el ahorro neto en construcciones de granjas propias de 9 millones de dólares.

En línea con ese pensamiento, la Dirección de Operaciones de la empresa adqui-

rió software científico y profesional, como GAMS, LINDO (What'sBest), MATLAB. Con ello inicia un proceso de cambio importante en la forma de hacer las cosas, teniendo como base de todo a la optimización en general. Han pasado dos años desde que iniciamos esta transformación y los ahorros en costos han sido muy sustanciosos. El programa de producción de aves está en marcha con los resultados obtenidos en el presente trabajo y ha permitido optimizar el uso de las instalaciones muy eficazmente, reduciendo costos, rotando mejor los activos, mejorando el nivel de servicio y lo más importante manteniendo la rentabilidad de la compañía y la supervivencia en al largo plazo.

Sin temor a equivocarse podría decir que la programación matemática nos ha hecho la vida más sencilla. Un presupuesto de operaciones requería de varios días para elaborarlo, hoy en día por lo anteriormente mencionado, el mismo presupuesto puede ser elaborado en menos de 2 horas. Con mucha satisfacción se tiene que mencionar que la optimización nos ha abierto muchas puertas dentro de la organización, todo proyecto pasa por nuestras manos y en la mayoría de ellos la programación matemática es la herramienta principal para la toma de decisiones.

Finalmente el modelo propuesto puede adaptarse fácilmente a cualquier empresa productora que quiera mejorar su proceso productivo.

## **5.2. Sugerencias para trabajos futuros**

En varias ocasiones se mencionó que algunos problemas no se abordaban porque iban más allá del alcance del presente trabajo. Naturalmente este trabajo se enfocó en la parte central de la Cadena de Abastecimiento, la producción. Pero es el primer paso que dimos en la optimización de toda la cadena de suministro. Queda pendiente para futuros trabajos la optimización del proceso de reproducción, en donde el ciclo productivo es mucho más largo que en pollos. La vida de una reproductora es de 64 semanas en promedio, de las cuales 40 semanas están en producción. Bajo todas estas consideraciones hay que decidir cuantas pollitas reproductoras se debe importar semanalmente

para garantizar el abastecimiento de huevo fértil semanal que requieren las incubadoras, para a su vez enviar los pollos bb a las granjas de engorde.

Por otro lado, en el presente trabajo llegamos hasta la planta de faenamiento y no consideramos el proceso de faena en si. En este proceso deberíamos considerar la planificación de la producción en función de los requerimientos del mercado, esto implica la planificación de rangos de peso, pollo entero o despresado, etc. Nuevamente podemos sugerir para trabajos futuros desarrollar un sistema de toma de decisiones para que optimice la producción de la feanadora y maximice el nivel de servicio con los clientes. En la actualidad estamos trabajando en este modelo para mejorar el nivel de servicio que la compañía ofrece a sus clientes.

Para finalizar se debe mencionar a la planta de alimentos. El costo del alimento en la producción de pollo procesado representa aproximadamente el 60 % del costo total. En este sentido es necesario la utilización de la programación matemática para planificar el abastecimiento, la producción y la secuenciación de las máquinas para minimizar los costos de producción del alimento.

# BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Bovas and J. Ledolter. *Statistical Methods for Forecasting*. Wiley-Interscience, New Jersey, 1983-2005.
- [2] Brockwell and Davis. *Time Series: Theory and Methods*. Springer-Verlag, New York, 1987.
- [3] D. Delima. La programación matemática en la planeación de la producción: Alojamiento y salida de pollos. Master's thesis, Universidad Federal de Parana, Curitiba, Noviembre 2004.
- [4] L. R. Foulds. *Combinatorial Optimization*. Springer Verlag, New York, 1984.
- [5] P. H. Franses. *The Gompertz curve: estimation and selection*. Econometric Institute, Erasmus University Rotterdam, 1992.
- [6] B. Korte and J. Vygen. *Combinatorial Optimization, Theory and Algorithms*. Springer, Germany, 2008.
- [7] D. S. Moore. *Estadística Aplicada Básica*. Antony Bosh, Barcelona-España, 2000.
- [8] M. T. Netto. Integrated planning for poultry production at sadia. In *Proceedings of the 3rd ACM Symposium on Theory of Computing*, pages 151–158, Shaker Heights, Ohio, 1971.
- [9] C. Papadimitriou and K. Steiglitz. *Combinatorial Optimization*. Dover Publications INC., Mineola, New York, 1998.
- [10] Ritz and Streibig. Bioassay analysis using r. *Journal of Statistical Software*, 12, 2005.
- [11] B. Satir. A general production and financial planning model for integrated poultry organizations. Applied science, Middle East Technical University, Turkey, December 2003.
- [12] A. Schrijver. *Theory of Linear and Integer Programming*. John Wiley, West Sussex PO19 1UD, England, 2000.

- [13] J. Villanueva. Optimizing harvest dates in philippine comercial poultry farming. *Proceedings of the Internationalthe MultiConference of Engineers and Compuer Scientists*, Vol II(5):147–165, March 2009.
- [14] Wang and Zuidhof. Estimation of growth parameters using a nonlinear mixed gompertz model. *Poultry Science*, IX(83):847–852, Dec 2004.