



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN**  
**Y DE LA SALUD ANIMAL**

Influencia de dietas bajas en proteína en pollos de engorda Ross 308 sobre el comportamiento productivo y rendimiento en canal

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRA EN CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN Y DE LA SALUD**  
**ANIMAL**

**PRESENTA:**  
**ADRIANA HERNÁNDEZ HUESCA**

**TUTOR:**  
**ARTURO CORTES CUEVAS (FMVZ-UNAM)**

**COMITÉ TUTOR:**

**ERNESTO ÁVILA GONZÁLEZ (FMVZ-UNAM)**  
**JUAN CARLOS DEL RÍO GARCÍA (FES- CUAUTITLÁN)**

Ciudad Universitaria, Cd. Mx.

Junio 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **DEDICATORIA**

A mis padres porque siempre me apoyan y acompañan, por sus enseñanzas, su amor y por alentarme a seguir estudiando.

En memoria de mi hermano David por apoyarme, por darme el ejemplo para tener sentido de determinación, valentía, generosidad, dignidad, justicia, pero sobretodo alegría y amor por la vida. Te recordaré siempre con cariño y mantendré presentes tus enseñanzas.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis asesores Dr. Ernesto Ávila González y Dr. Arturo Cortes Cuevas y por brindarme la confianza y la oportunidad de realizar nuevamente un trabajo de investigación bajo su asesoría, permitiéndome el seguir aprendiendo de ustedes, por las sugerencias y el tiempo que me dedicaron, así como la paciencia que tuvieron para permitirme el concluir este estudio, a pesar de los contratiempos, gracias.

Al el Dr. Juan Carlos del Río que también formó parte de mi asesoría por sus comentarios sobre la investigación y por su amabilidad, paciencia y confianza.

Al Dr. Roberto Santiago y a la empresa EVONIK INDUSTRIES quienes me apoyaron para para la realizar esta investigación de manera conjunta.

A las doctoras María del Pilar Castañeda y Silvia Carillo, así como al doctor José Arce por aceptar formar parte de mi jurado y brindarme parte de su tiempo para la revisión de la tesis y por sus comentarios para mejorarlo.

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT por el apoyo que brinda a los investigadores para continuar generando desarrollo científico que impulsen al país, incluyendo el presente trabajo.

Al Centro de Enseñanza en Investigación y Extensión en Producción Avícola (CEIEPAv).

A mis amigos Inés, David, Jesús, Fedro, Gloria, Luis Miguel y Víctor, gracias por sus consejos y por darme ánimos, por su amistad y afecto.

A mi gran amiga Aida con quien tuve la fortuna de compartir nuestro conocimiento y tiempo en la maestría. Eres una gran persona, te agradezco tu sinceridad, tu presencia y tu gran ayuda en momentos difíciles.

A José Luis, por escuchar mis ideas al escribir este trabajo, por animarme para seguir adelante, por estar en momentos difíciles y también por ser parte de los momentos más felices de mi vida. Gracias por ser el motivo de mi inspiración para ser mejor cada día como persona y como profesionalista. Te amo, gracias por estos años a tu lado.

A mis hermanos Ramón, Rodrigo, y mis sobrinos por brindarme su cariño y momentos de alegría.

## RESUMEN

El objetivo de la presente investigación, fue evaluar el efecto de la reducción de proteína cruda (PC) en dietas suplementadas con aminoácidos AA (DL-Metionina, HCl-Lys, L-Thr, L-Val, L-Arg y L-Trp) con porcentajes similares con respecto a una dieta estándar en PC sobre los parámetros productivos; ganancia de peso (GP), conversión alimenticia (IC), consumo de alimento (CA) y mortalidad así como el rendimiento en canal (RC), peso vivo (PV), peso en canal caliente (PCC), rendimiento de pechuga (RP), rendimiento de piernas (muslo y pierna) (RP y M), pigmentación amarilla (b) de la piel y el porcentaje de grasa en cavidad celómica (%GC). Se utilizaron 882 pollos machos y hembras de 1 día de edad de la estirpe Ross 308. Se emplearon dietas a base maíz-pasta de soya; se siguió un programa de alimentación de 4 fases de acuerdo a las recomendaciones de nutrientes del manual Avigen 2019. Las aves fueron asignadas de manera aleatoria en un arreglo factorial 2X3; donde un factor fue el sexo (macho y hembra) y el otro factor los 3 niveles de PC (sin reducción de PC, -1% PC+AA y -2% PC+AA), cada tratamiento tuvo 6 réplicas de 25 pollos cada una. Los datos fueron analizados usando el modelo lineal general de 2 componentes para determinar los efectos del tratamiento dietético, el sexo y el efecto de interacción. Los resultados indicaron que no hubo efecto de interacción entre el sexo y el nivel de PC ( $P>0.05$ ). Sin embargo, los machos tuvieron mejor GP, CA, ICC, PV, PCC y RPyM ( $P<0.05$ ) respecto a las hembras. Por otra parte, las hembras mostraron mayor RP, %GA y mayores valores de pigmentación amarilla en la piel al final del estudio ( $P<0.05$ ). El nivel de proteína solo tuvo efecto sobre % GA, para las dietas con -1%PC+AA y -2%PC+AA ( $P<0.05$ ). Con base a los resultados obtenidos en el presente estudio se puede concluir que el empleo de dietas bajas en proteína maíz+soya suplementadas con AAE (DL-Metionina, HCl-Lys, L-Thr, L-Val, L-Arg y L-Trp) para pollos de engorda pueden utilizarse sin afectar los parámetros productivos y el porcentaje de rendimiento de la canal; sin embargo, el porcentaje de grasa celómica en pollos alimentados con reducción de proteína fue mayor.

**Palabras clave.** Dietas bajas en proteína, aminoácidos, parámetros productivos, rendimiento productivo, pollo de engorda.

## ABSTRACT

The aim of this investigation was evaluate the effect of diets low in crude protein (CP) in 1 and 2% supplemented with amino acid AA: DL-Metionine, L-Lys, L-Thr, L-Val, L-Arg y L-Trp versus a standard diet about the productive parameters; body weight gain(BWG), feed conversion rate(FCR), intake feed (IF) and mortality as well as the carcass yield (CY): body weight before of slaughter (BWS), carcass weight in hot (CWH), breast meat yield (BMY), legs yield (drumstick and thigh) (LY), level of yellowness (b), and abdominal fat percentage (AF%) in broilers. A total number of 882 of d-old chicks Ross 308 were randomly assigned in factorial arrangement 2X3; where a factor was the sex and the other factor 3 levels of protein, with 6 replicates of 25 chicks each one. The dietary treatments were: CP+AA, -1%CP+AA and -2%CP+AA. The birds were fed diets based on corn-soybean meal during 7 weeks; a four-phase feeding program was applied for to meet the nutrient recommendations specification by Avigen 2019, except for diets low in CP. Data were analyzed using the general linear model of two-ways analysis of varianza components was performance to determine the effects of dietary treatments, sex and their interaction. No statistical difference were found for the interaction between sex and level of CP ( $P>0.05$ ). Sex had significant effect, males had better on BWG, IF, FCR, BWS, CWH, LY ( $P<0.05$ ) than females. However, the females showed better breast meat yield, abdominal fat percentage, level of b in the week six and seven and in the pigment before slaughter ( $P<0.05$ ) than males. The level of protein only had effect about %AF where -1%CP+AA and -2%CP+AA diets had the highest value ( $P<0.05$ ), for the values of b before the slaughter the SCP+AA, -1%CP+AA diets showed the values more bigger while the values b about carcass in cold with -1%CP+AA and -2%CP+AA diets had no differences ( $P<0.05$ ). Low protein diets supplemented with AA can be used under this condicions whitout affecting the productive parameters or the carcass yield being careful with the effect on the pigment and level of abdominal fat.

Key words: Low protein diets, amino acids, parameters productives, carcass yield, broilers.

## ÍNDICE GENERAL

PORTADA .....	1
DEDICATORIA .....	I
AGRADECIMIENTOS .....	II
RESUMEN .....	III
ABSTRACT .....	IV
ÍNDICE DE CUADROS .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	1
Perspectiva global y nacional de la Avicultura en México. ....	1
Las proteínas.....	2
Aminoácidos .....	5
Importancia de los aminoácidos en alimentación.....	6
Aminoácidos sintéticos.....	7
Lisina.....	8
Metionina .....	9
Treonina .....	10
Valina.....	11
Arginina .....	12
Isoleucina .....	13
Triptófano.....	14
Digestión de proteínas .....	14
Absorción de péptidos y aminoácidos .....	17
Dietas altas y estándar en proteína cruda .....	20
Dietas bajas en proteína cruda .....	21
Rendimiento productivo.....	23
Impacto ambiental.....	24
Integridad intestinal.....	26
Microbioma intestinal .....	28
Pigmentación de la piel del pollo .....	29
JUSTIFICACIÓN .....	30

HIPÓTESIS .....	31
OBJETIVOS .....	32
Objetivos generales .....	32
Objetivos específicos .....	32
MATERIAL Y MÉTODOS. ....	33
Lugar de estudio .....	33
Manejo de animales y alojamiento .....	33
Diseño de experimento y dietas .....	33
Parámetros productivos a evaluar .....	34
Análisis estadístico .....	34
RESULTADOS. ....	36
Parámetros productivos .....	36
Rendimiento en canal .....	36
Grasa en la cavidad celómica y el rendimiento de pierna y muslo .....	37
Pigmentación de la piel (b) .....	38
DISCUSIÓN .....	39
Rendimiento en canal .....	41
CONCLUSIONES .....	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	46
CUADROS .....	64
FIGURAS .....	76

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Sistemas de transporte de aminoácidos en mamíferos, su mecanismo y sustratos .....	64
Cuadro 2 Análisis del Maíz por medio de espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano NIR .....	65
Cuadro 3 Análisis de la Harina de soya por medio de espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano NIR.....	66
Cuadro 4. Composición de las dietas de iniciación (0-10 días) para pollos de engorda Ross 308 y su análisis calculado. ....	67
Cuadro 5 Composición de las dietas de crecimiento (11-24 días) en pollos Ross 308 y su análisis calculado. ....	68
Cuadro 6 Composición de las dietas de finalización 1 (25-39 días) en pollos de engorda Ross 308 y su análisis calculado. ....	69
Cuadro 7 Composición de las dietas de finalizador 2 (40-49 días) en pollos de engorda Ross 308 y su análisis calculado. ....	70
Cuadro 8 Resultados promedio de parámetros productivos en 49 días de experimentación en pollos de engorda alimentados con tres niveles de proteína cruda suplementada con aminoácidos sintéticos. ....	71
Cuadro 9 Resultados promedio del porcentaje de rendimiento de la canal, peso vivo y peso de la canal caliente en 49 días de experimentación en pollos de engorda alimentados con tres niveles de proteína cruda suplementada con aminoácidos sintéticos .....	72
Cuadro 10 Resultados promedio de los porcentajes de rendimiento de pechuga, porcentaje de grasa celómica y pierna con muslo en 49 días en pollos de engorda alimentados con tres niveles de proteína cruda suplementada con aminoácidos sintéticos .....	73
Cuadro 11 Resultados promedio de pigmentación amarilla de la piel en pollo vivo a los 35, 42 y 49 días en pollos de engorda alimentados con tres niveles de proteína cruda suplementada con aminoácidos sintéticos. ....	74
Cuadro 12 Resultados promedio de pigmentación amarilla en la piel en pollo vivo y en canal fría a los 49 días en pollos de engorda alimentados con tres niveles de proteína cruda suplementada con aminoácidos sintéticos. ....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Clasificación de los aminoácidos según su grupo R. ....	76
Figura 2 Aminoácidos esenciales en Aves .....	77
Figura 3. Sistemas transportadores de Aminoácidos .....	78
Figura 4. Transporte de dipéptidos y tripéptidos por el Sistema PepT1 .....	79

## **INTRODUCCIÓN.**

### **Perspectiva global y nacional de la Avicultura en México.**

La población mundial podría alcanzar 15,900 millones en 2050 (Gholami et al., 2020) por lo cual se estima que la producción actual de carne podría duplicarse para ese mismo año (Chrystal et al., 2020), esto junto con los salarios serán factores determinantes en el consumo de carne (Hosseintabar et al., 2015) especialmente de carne blanca de pollo de engorda (Gholami et al., 2020), motivos que impulsarán a la industria avícola a continuar con su avance en conocimiento y tecnología (Nascimento et al., 2016), para mejorar las técnicas de producción en carne de pollo para cubrir su demanda (Gholami et al., 2020; Hosseintabar et al., 2015).

En México se estimó que la avicultura crecería un 1.2% en el año 2020 debido a la emergencia sanitaria causada por el Covid-19, que ha generado un gran impacto en la salud y las actividades socioeconómicas generando la pérdida de empleos y cambios en el consumo (UNA, 2019).

La avicultura en 2019 tuvo una participación pecuaria del 62.9% que generó el 56% de la proteína animal, con un costo de producción del alimento del 61%, en el cual se consumieron 16.5 millones de toneladas de alimento balanceado; 10.38 millones de granos forrajeros, 3.30 de pastas oleaginosas y 2.8 millones de otros ingredientes (UNA, 2019). En la elaboración de dietas los nutrientes que aportan energía y proteína son los más caros (Hilliari y Swich 2019) y la proteína genera del 40-45% del costo total de la dieta (Araiza, 2013), que junto a los aminoácidos cristalinos aportan dos tercios del contenido de Proteína Cruda (PC) en la dieta de aves mientras el resto lo proporcionan los granos forrajeros (Hilliari y Swich 2019).

La industria avícola ha aumentado el número de unidades de producción (con un mayor nivel de tecnificación y especialización) e incrementado el número de aves alojadas por metro cuadrado (García, 2012) para satisfacer la demanda de proteína de origen animal, causando preocupación en temas de materia ambiental sobre la calidad de aire y agua relacionados con Nitrógeno (N) (Powers y Angel 2008; Aletor et al., 2000) y fósforo (P), implicados también en problemas de aporte de nutrientes (Powers y Angel 2008), por lo

cual es crucial desarrollar mejores técnicas para reducir la contaminación ambiental con estrategias adecuadas en nutrición y alimentación (Sirri et al., 2012; Aletor et al., 2000) además de la aplicación de nuevas tecnologías (Leinonen et al., 2014) en equipo, instalaciones y manejo (Sirri et al., 2012).

Actualmente existe un enfoque global en el desarrollo de dietas bajas en proteína cruda suplementadas con aminoácidos sintéticos que tengan resultados favorables en rendimiento productivo (Yin et al., 2020), sin embargo debe tenerse en cuenta que al formularse dietas y modificar el porcentaje de inclusión de un macronutriente cambia el contenido de los demás provocando un efecto importante en los parámetros productivos y el rendimiento de los pollos de engorda, por lo que el efecto obtenido debería atribuir a un nutriente específico (Malheriros 2003).

Los beneficios potenciales al reducir el contenido de PC son: disminuir las emisiones de nitrógeno y amoníaco en las excretas, y una disminución en los costos de producción (Rehman, 2018; Chrystal et al., 2020).

### **Las proteínas**

Las proteínas químicamente están formadas de elementos como: Carbono (51-55%), Hidrógeno (6.5-7.3%), Oxígeno (21.5-23.5%), Nitrógeno (15.5-18%), (García, 2012) Fósforo (0-1.5) y Azufre (0.5-2.0) (Chiba, 2009), mientras que estructuralmente están elaboradas por polipéptidos o polímeros de aminoácidos (AA) largos (Murray et al., 2013; García, 2012), contruidos a partir de un conjunto de 20 aminoácidos, unidos de forma covalente en una secuencia lineal diferente y característica para crear una proteína específica, con propiedades y actividades determinadas (Nelson y Cox, 2015; Cuca et al., 2016).

Las proteínas se pueden clasificar de acuerdo a su composición, su estructura y la función que desempeñan.

Por su composición las proteínas se clasifican en:

- Simples: cuando solo están constituidas por aminoácidos

- Complejas: cuando las proteínas están conformadas por aminoácidos y de un grupo prostético (de diferente naturaleza química que los aminoácidos). Se dividen en:
  - o Glucoproteínas
  - o Lipoproteínas
  - o Nucleoproteínas
  - o Metaloproteínas (López et al 2000)

En cuanto a su estructura las proteínas se clasifican en:

- Primaria:

En el cual los AA unidos por enlaces peptídicos se encuentran organizados en una secuencia lineal en una cadena proteica (Müller, 2008), que determina la forma en que se pliega una estructura tridimensional (Nelson y Cox, 2015).

- Secundaria:

Es la organización en el espacio de los AA en la cadena polipeptídica sin tener en cuenta la conformación de las cadenas laterales (López et al 2000; Müller-Esterl, 2008). Los puentes de hidrogeno son los responsables de unir el grupo amino y carboxilo de los carbonos de diferentes enlaces peptídicos, dando origen a 3 elementos importantes en la estructura secundaria (Mülle-Esterl, 2008):

- $\alpha$ -hélice.

Estructura de forma helicoidal generada por la torsión uniforme en sentido dextrógiro de la cadena polipeptídica formada mínimo por 10 residuos de AA. La cadena principal siempre construye el eje de una hélice  $\alpha$ , con los grupos R de los AA dispuestos como espinas.

- lamina  $\beta$  plegada

Estructura en forma de acordeón (Müller-Esterl, 2008) en donde los AA se acomodan de manera paralela o antiparalela uno respecto al otro conectados entre sí por puentes de hidrógeno (López et al 2000). Esta estructura se forma a partir de varias cadenas B es decir interaccionan varios fragmentos discontinuos de una o más cadenas de polipéptidos (Müller-Esterl, 2008).

- giro  $\beta$

Es el responsable de conectar 2 segmentos de cadena mediante una curva de horquilla, estabilizados con puente de hidrogeno, se encuentran en la superficie de las proteínas en donde es posible que se invierta de dirección (Müller-Esterl, 2008).

- Terciaria

Es la conformación tridimensional de un polipéptido, en la cual las estructuras secundarias se ensamblan formando dominios que se relacionan entre sí (Murray et al., 2013; Müller-Esterl, 2008).

Las fuerzas encargadas de mantener estas interacciones entre las estructuras secundarias son: enlaces iónicos (puentes salinos), fuerzas de Van der Waals y puentes de hidrógeno (Müller-Esterl, 2008).

- Cuaternaria

Es el arreglo espacial de diferentes subunidades de polipéptidicas que componen las proteínas (López et al 2000; Müller-Esterl, 2008), en el que participan los mismos enlaces de las estructuras terciarias (Müller-Esterl, 2008).

La clasificación de las proteínas por sus funciones es la siguiente: catalítica, estructural, transporte, hormonal, defensa y de reserva (López et al 2000).

La estimación de la proteína en los alimentos se realiza a través del método Kjeldahl, en el que se asume que la proteína presente en los alimentos contiene un 16% de N, por lo que la el N medido químicamente se multiplica por el factor 6.25 (Cuca et al., 2016), en este método se infiere que todo el N está presente de forma proteica (Cuca et al., 2016 y Chiba 2009) sin tomar en cuenta el nitrógeno no proteico NNP como: amidas, glucósidos, alcaloides y sales de amonio, por lo cual la proteína obtenida de esta forma se conoce como proteína cruda PC (Chiba, 2009). Por el NNP presente en los alimentos comerciales se formulan a base de AA digestibles principalmente tomando en cuenta los aminoácidos esenciales (AEE) (Chrystal et al., 2020).

En la formulación de dietas es primordial el concepto de proteína ideal (Cuca et al., 2016); en el que la Lisina se usa como aminoácido de referencia para determinar los demás requerimientos de aminoácidos (Emmert et al., 1999, Liu et al., 2019, Plumstead et al., 2007, Naranjo 2016; Faria et al., 2005; Ospina-Rojas 2014; Bregendahl, 2002; Chrystal et al., 2020; Rochell et al., 2016). Sin existir excesos o deficiencias en un determinado

balance; modificado por la edad y el fin zootécnico de las aves (Cuca et al., 2016) para alcanzar un máximo desempeño, satisfacer las demandas de mantenimiento y producción, y reducir su uso como fuente de energía (Naranjo V, 2016).

### **Aminoácidos**

Los AA son los componentes esenciales de las proteínas, cada aminoácido está conformado por un carbono  $\alpha$  y cuatro grupos funcionales: un hidrógeno, un grupo carboxilo (COOH), un grupo amino  $\text{NH}_2$  y un grupo R o cadena lateral distinta ([Figura 1](#)) (Nelson y Cox, 2015; Cuca et al., 2016) que de acuerdo a sus propiedades (principalmente a su polaridad) ayuda a clasificar a los aminoácidos en 5 grupos: grupo R apolares alifáticos, grupo R aromáticos, grupos R polares sin carga, grupo R cargados positivamente y grupos R cargados negativamente (Nelson y Cox, 2015).

Todos los AA que constituyen las proteínas de origen animal se encuentran en forma de L-aminoácidos (Cuca et al., 2016) y son importantes para la masa e integridad intestinal, la motilidad y la función intestinal (Pestour et al., 2020), aunque los AAE tienen la posibilidad de reemplazarse por su forma ceto (análoga) con Lisina y Treonina no es posible debido a que no están involucrados en los procesos de transaminación, que ocurre en varios tejidos y algunas bacterias del intestino, para que las aves puedan producir principalmente aminoácidos no esenciales AANE como el ácido glutámico (Cuca et al., 2016).

Además de su clasificación bioquímica, los AA se clasifican de acuerdo a su capacidad de síntesis en el organismo como: aminoácidos esenciales (AAE) y no esenciales (AANE) (FAO, 2012; Cuca et al., 2016). Los AAE son aquellos que no son sintetizados por el organismo o se sintetizan muy lentamente que no satisfacen las necesidades metabólicas por lo que debe considerarse su uso durante la formulación de dietas mientras que los aminoácidos no esenciales pueden ser sintetizados a partir de otros aminoácidos (FAO, 2012).

En las aves existen 10 aminoácidos AANE y 10 aminoácidos AAE o limitantes; lisina (Lys), metionina (Met), triptófano (Trp), treonina (Thr), histidina (His), arginina (Arg),

fenilalanina (Phe), isoleucina (Ile), leucina (Leu) y valina (Val) [\(Figura 2\)](#) (Cuca et al., 2016).

La disposición de AEE en las dietas de aves de corral es Met, Lys, Thr y Trp (FAO, 2012), aunque también se consideran el siguiente orden en dietas que tienen como base maíz y harina de soya; Met, Lys, Thr, Val, Ile, Arg y Trp, y en las dietas formuladas con subproductos de origen animal la Ile se convierte en el cuarto aminoácido limitante seguido de Val, Arg y Trp (Sá L. et al., 2013). Una deficiencia de AA afecta el desarrollo intestinal y afectar el transporte y utilización de P en el intestino, porque el N y el P están relacionados entre sí (Xue et al., 2016).

### **Importancia de los aminoácidos en alimentación**

Los AA son importantes señalizadores y reguladores en la renovación de proteínas corporales (Zeitz et al., 2019); regulan la expresión de genes involucrados en los procesos antiinflamatorios, promueven la reparación intestinal e inducen los procesos mitóticos para la producción de enzimas como la ornitina-descarboxilasa que participa en la producción de poliaminas y otras moléculas como el óxido nítrico y mucina; necesarias para el adecuado funcionamiento del tracto gastrointestinal (Bortoluzzi et al., 2018) en el rendimiento productivo, la locomoción, la inmunidad, y el plumaje de las aves (Tian et al., 2019).

Aminoácidos como Thr, Arg y glutamina (Gln) son importantes en la producción de mucina, la función inmune y la proliferación epitelial respectivamente (Bortoluzzi et al., 2018).

Un equilibrio adecuado de aminoácidos en los pollos de engorda desempeña un papel importante en el rendimiento del crecimiento, reduce costos y el impacto ambiental porque disminuye la humedad y la excreción de nitrógeno en las heces (Barekatin et al., 2019; Corzo et al., 2011) y la emisión de amoníaco (Harn et al., 2019), reduciendo la eutrofización y acidificación del suelo por la producción intensiva del ganado (Macelline et al., 2019), además de tener un efecto importante en la salud intestinal (Barekatin et al., 2019).

Un desequilibrio grave de AA por la reducción de proteína un efecto negativo sobre el consumo de alimento y este a su vez sobre la tasa de crecimiento y la composición de la carne (Rama et al., 2011) y un incremento en la actividad bacteriana putrefactiva en el intestino de los pollos de engorda (Macelline et al., 2019).

### **Aminoácidos sintéticos**

La inclusión de los aminoácidos sintéticos inicio en la década de los 50's (Liu, 2017; Chrystal et al., 2020) inicialmente se incluyó Met y posteriormente Lys (Liu, 2017). La disminución de la PC en el alimento de pollos de engorda es factible gracias a la precisión de los nutricionistas al formular las dietas (Cuca et al., 2016) generando no solo beneficios al optimizar los costos de alimentación sino también disminuyendo el impacto ambiental (Aftab et al., 2006; Lesson y Summers 2008; Cuca et al., 2016; Bezerra et al., 2015).

Actualmente los aminoácidos sintéticos como: Met, Lys, Trp, Thr, etc., se usan de forma constante en dietas de aves de corral formuladas a base de harina de soya (fuente principal de proteínas y aminoácidos) y las dietas reducidas en proteína por ser los AA más limitantes (Aftab et al., 2006; Lesson y Summers 2008; Cuca et al., 2016; Bezerra et al., 2015). Sin embargo, el costo y la disponibilidad de algunos AA aun limitan la investigación en nutrición proteica (Siquiera 2013). AAE cristalinos como: L- leucina, L -histidina y L- fenilalanina disponibles en el mercado para consumo humano aun no son usados en la formulación de alimento en animales debido a su costo, aunque eventualmente estarán disponibles para su uso en la alimentación animal (Hilliar y Swich 2019).

Los AA cristalinos o sintéticos tienen una alta digestibilidad (100%) (Cuca et al., 2016, Chrystal et al., 2020; Hilliar y Swick 2019), son muy sensibles al pH estomacal y tienen una rápida absorción, por lo que deben de usarse encapsulados por una matriz que permita una liberación lenta para obtenerse una buena eficiencia metabólica (Silogo et al., 2017), debido absorción casi inmediata en las primeras porciones del intestino delgado los AA entran a la circulación de manera más rápida que los aminoácidos unidos a proteína (Liu et al., 2017). A pesar de sus ventajas los aminoácidos presentes en los ingredientes de dieta no pueden ser completamente reemplazados por aminoácidos cristalinos, aunque su biodisponibilidad sea mayor (Silogo et al., 2017).

En dietas bajas en proteína resulta más efectivo para el rendimiento productivo adicionar una mezcla balanceada de varios aminoácidos comparado con el suministro de un solo aminoácido (Silogo et al., 2017). La adición de aminoácidos sintéticos en niveles óptimos resulta en una reducción del consumo de alimento, dando lugar a la teoría aminostática; al detectarse niveles altos de aminoácidos en el plasma puede generarse una señal para el control del apetito, aunque también los niveles de estos metabolitos pueden generar la señal para regular el consumo (Namroud et al., 2010).

En la formulación de dietas que satisfacen las necesidades de AA resulta hay una menor excreción de nitrógeno, aunque la eficacia del uso de AA asciende cuando todos los AA están ligeramente por debajo de su necesidad para la acumulación y mantenimiento de proteínas (Corzo, 2004).

### **Lisina**

La lisina es con frecuencia el primer o segundo aminoácido limitante en dietas para aves de corral (Kiess et al., 2013) y es el más estudiado por ser el segundo aminoácido limitante en el crecimiento en dietas formuladas a base de maíz-soya (Tian et al., 2019; Siquiera et al., 2013).

La lisina es un AA importante para el crecimiento (principalmente en las primeras etapas del crecimiento) (Hussain et al., 2009), en el aumento de peso corporal, el consumo de alimento, el índice de conversión alimenticia, las características de la carne (Tian et al., 2019); en la tasa de acumulación de carne en la pechuga (Plumstead et al., 2007), la disminución de la grasa corporal (Liu, 2019), en las respuestas fisiológicas (Tian et al., 2019), la eficiencia de la síntesis de proteína, y la retención y excreción de N y P en los sistemas de producción de avícola (Kiess et al., 2013). Además, la suplementación de 1.4% de Lys aumenta la longitud intestinal y el peso del tracto digestivo (Hussain et al., 2018).

Se ha demostrado que su exceso reduce la ingesta de alimento, altera la utilización de la Arg, mientras que una administración restringida tiene efecto sobre el rendimiento de la grasa celómica (Tian et al., 2019).

La lisina comercialmente se produce generalmente como la sal de hidrócloruro HCl-Lisina. En América del Norte, la lisina tiende a considerarse un producto básico y su uso está directamente relacionado con el de otros ingredientes, por ejemplo, su uso es más alto cuando el precio de la harina de soya aumenta o el precio del maíz disminuye (Lesson y Summers, 2008).

### **Metionina**

La metionina es el primer aminoácido limitante en aves de corral en dietas a base de maíz y soya (Aftab y Ashraf, 2009), tiene un papel importante en la acumulación y síntesis de proteína de proteínas (Park y Kim 2019; Conde-Aguilera et al., 2016), en la donación de grupos metilo (Park y Kim 2019; Conde-Aguilera et al., 2016; Yodsaranee y Bunchasak 2012) para una variedad de aceptores que incluyen: ácidos nucleicos, proteínas, islas CpG en el ADN y aminos biológicas (Fagundes et al., 2020), además participa en la síntesis de poliaminas (Yodsaranee y Bunchasak, 2012), contribuye a la defensa antioxidante celular y la prevención de daño oxidativo (Park y Kim, 2019; Zeitz et al., 2020) al sintetizar cistina a través de la vía de la transulfuración (Conde-Aguilera et al., 2016) que produce taurina, S-adenosilmetionina y glutatión (GSH) (Yodsaranee y Bunchasak, 2012; Park y Kim, 2019).

En las aves la Met influye de manera sustancial en el rendimiento del crecimiento, el metabolismo de las proteínas séricas, mejora la eficiencia en el uso de proteínas y en el rendimiento productivo y el estado oxidativo del músculo en pollos de engorde, reduciendo la excreción de nitrógeno (Park y Kim, 2019), también influye sobre la calidad de la carne (Park y Kim, 2019) la síntesis de plumas (Tesseraud et al., 2011).

Se ha demostrado que el suministro deficiente de Met afecta la composición química de diferentes tejidos y ciertos aspectos de calidad de la carne en pollos de engorda (Conde-Aguilera et al., 2016), además de perjudicar el crecimiento (Yodsaranee y Bunchasak, 2012; Fagundes et al., 2020), aumentar la grasa en cavidad celómica y provocan alteraciones en los órganos inmunes (Fagundes et al., 2020) y metabólicos (Yodsaranee y Bunchasak, 2012), mientras que un exceso en su implementación genera depresión del consumo de alimento, de la ganancia de peso, y un aumento en la conversión alimenticia. La Met es considerado el AA más tóxico cuando se ingiere en exceso (Si et al., 2004).

El nivel de inclusión de Met está aumentando en las dietas comerciales de pollos de engorde para disminuir el impacto ambiental generado por el nivel de inclusión de proteína cruda en la dieta, sin embargo, para cumplir este objetivo es necesario realizar una actualización sobre el requisito de aminoácidos azufrados (AAS) en las aves de corral de acuerdo al sexo, la etapa de crecimiento y el rendimiento de procesamiento (Millecam et al., 2020).

En la actualidad la Met sintética se usa de manera regular en las dietas avícolas (Si et al., 2004), disponible en 2 formas: como isómero DL-Met (50% D-Met y 50% L-Met (Millecam et al., 2020) para cumplir con los requisitos del aminoácido en dietas de aves (Conde-Aguilera et al., 2016) o en forma pura de L-Met que tiene una absorción y síntesis de proteínas más eficientes mejorando el estado redox y desarrollo de la morfología intestinal (Millecam et al., 2020).

De manera comercial se encuentra principalmente en dos presentaciones DLM en polvo y MHA líquido, se utilizan ampliamente en la alimentación de aves de corral, tanto las formas líquidas como en polvo que consisten en isómeros L y D en una proporción 50-50, se transportan en el pollo por diferentes mecanismo en las células de la mucosa intestinal; la captación de DML es dependiente de Na<sup>+</sup> y la absorción de MHA se hace por difusión o por el transporte independiente de Na<sup>+</sup> (Yodsaranee y Bunchasak, 2012).

El líquido MHA en su estructura tiene un grupo hidroxilo en lugar de un grupo amino (Yodsaranee y Bunchasak, 2012) su valor biológico es de 88% (basado en su estructura química normal), la disponibilidad puede variar del 60 a 100%. La potencia de MHA se relaciona con la captación variable en el intestino, la degradación en los tejidos corporales y el grado de eliminación por el riñón, la concentración de Met en los ingredientes utilizados en la formulación y las especificaciones de la dieta para la Met y la Cis (Lesson y Summers, 2008).

### **Treonina**

Es el tercer aminoácido limitante en las dietas de aves de corral (Jiang et al., 2019) con bajo contenido de proteína a base maíz y harina de soja (Azzam et al., 2011 y Bortoluzzi et al., 2018).

Es un aminoácido importante en la integridad de la mucosa intestinal y en su función de barrera (Silogo et al., 2017), forma del 30% del contenido total de AA que constituyen la mucina (Silogo et al., 2017; Bortoluzzi et al., 2018), es un constituyente esencial de las enzimas digestivas (Silogo et al., 2017) al configurar el 11% de los aminoácidos que forman las proteínas de la amilasa (Azzam et al., 2011).

Además, la Thr tiene un papel significativo en el sistema inmune local del intestino porque es el mayor componente de las inmunoglobulinas (Ig), principalmente de la IgA (la cual es secretada por las mucosas), participa en la síntesis de proteínas y su catabolismo genera muchos metabolitos importantes como: glicina (precursor en la síntesis de ácido úrico) (Rama et al., 2011), acetil Co-A y piruvato necesarios en el metabolismo (Bortoluzzi et al., 2018).

En cultivos de tejidos de pollos se ha demostrado que la ausencia de Thr es reguladora en la expresión de IL-8, MUC2 e IgA, y regula la baja la expresión de los genes inflamatorios INF- $\gamma$  e IL-1  $\beta$  lo que explica la función esencial de la Thr en el sistema inmune y cambia el equilibrio microbiano en el intestino (Bortoluzzi et al., 2018; Jiang et al., 2019).

Una inadecuada administración de este AA puede afectar la eficiencia de la utilización de los nutrientes (Silogo et al., 2017), al proporcionar en una cantidad adecuada este AA en la dieta la producción de enzimas aumentará y mejorará la función digestiva (Azzam et al., 2011). En dietas con disminución de PC en la dieta suplementada adecuadamente con Thr mejora la salud intestinal y las funciones inmunes con impacto positivo en el rendimiento de pollos de engorda (Silogo et al., 2017).

Las deficiencias de Thr en aves de carne causa depresión en la tasa de crecimiento, el consumo de alimento y el rendimiento de canal y en aves ponedoras causa baja postura, bajo peso de huevo y una disminución de la masa de huevo (Jiang et al., 2019).

## **Valina**

La valina es un aminoácido no polar, hidrófobo (Wen et al., 2019), que forma parte del grupo de los AA de cadena ramificada (Hale et al., 2004) que influyen en las vías

metabólicas en tejidos extrahepáticos como el músculo (Zeits et al., 2019), es glucogénico (ya que su esqueleto carbónico se convierte a succinil-CoA) (Ospina-Rojas et al., 2017).

Se considera como el cuarto aminoácido limitante (Sá L et al., 2013) y en dietas reducidas en proteína cruda junto con la isoleucina se vuelven limitantes (Agostini et al., 2019).

La valina es un importante precursor en la síntesis de proteínas (Wen et al., 2019); en el músculo influye sobre el diámetro de las fibras musculares de aves, es necesaria para el mantenimiento y crecimiento de los tejidos (Ospina-Rojas 2017). Además de ser un sustrato significativo en la síntesis de glutamina (involucrada en el ciclo de Krebs) (Wen et al., 2019) que puede afectar las concentraciones séricas de triglicéridos, cuerpos cetónicos, ácido úrico y glucosa en sangre (Ospina-Rojas et al., 2017).

Su disminución provoca deficiencias en ganancia de peso con alta incidencia de anomalías en plumas y patas (Chrystal et al., 2020), y repercute negativamente en el peso del timo y la bolsa de Fabricio junto con los otros AA de cadena corta (Hale et al., 2004).

### **Arginina**

La arginina se considera el quinto aminoácido limitante en dietas para pollos de engorda (DeGroot et al., 2019) y el cuarto cuando la temperatura del ambiente excede la temperatura de confort en los pollos de engorda (Sirathopong et al., 2019), es importante para apoyar la síntesis de proteínas, el crecimiento, el emplumado (Khajali et al., 2010) y mejora la calidad ósea (Dao et al., 2020). Este aminoácido representa del 40 al 60% de la urea excretada por las aves (Ruiz-Feria et al., 2001).

Los productos comerciales que aportan actividad arginina en dietas para pollos son: L-Arginina, ácido guanidinoacético y la L-citrullina (Dao et al., 2020).

En las aves debido a la deficiencia o falta de la síntesis de enzimas clave del ciclo de la urea como: carbamoil fosfato sintasa I, arginasa hepática y ornitina carbamoil-transferasa (Castro et al., 2019) dependen de la dieta para satisfacer sus requerimiento y funciones asociados a este AA (Sirathopong et al., 2019). Existen reportes de que este aminoácido representa del 40 al 60% de la urea excretada por las aves (Ruiz-Feria et al., 2001).

Es un aminoácido importante: en el crecimiento (Sirathopong et al., 2019; D'Amato y Humphrey, 2010), en el sistema inmune estimula la proliferación, la migración y apoptosis de células intestinales al apoyar el proceso mitótico en la región de las criptas intestinales para aumentar el número y tamaño de las microvellosidades (Bortoluzzi et al., 2018), en la respuesta inmune (D'Amato y Humphrey, 2010), tiene efecto antiinflamatorio al disminuir la expresión lineal de TLR4 (a través de la supresión de la vía TLR4 al ser estimuladas por polisacáridos) (Bortoluzzi et al., 2018).

La arginina se usa para la síntesis de proteínas (Sirathopong et al., 2019; Castro, et al., 2019), es precursor de moléculas como: creatinina, óxido nítrico (controla la lipólisis, el gasto energético, regula el flujo sanguíneo cardiopulmonar y la presión arterial) ((Khatun et al., 2020; Khajali et al., 2010) y poliaminas (Khatun et al., 2020; Castro et al., 2019, Bortoluzzi et al., 2018), importantes para el desarrollo, morfología y rendimiento del intestino delgado en pollos de engorda de 1 semana de edad. Interviene en la síntesis de prolina e hidroxiprolina vitales para la producción de tejido conectivo (Khatun et al., 2020).

También es sustrato para la biosíntesis de otros compuestos como: ornitina, glutamato, glutamina; agmatina y dimetilargininas importantes en las funciones biológicas de las aves de corral (Bortoluzzi et al., 2018). Estimula la liberación de la hormona del crecimiento GH, la insulina y el factor de crecimiento similar a la insulina IGF en el torrente sanguíneo (Sirathopong et al., 2019; Castro et al., 2019). Tiene efecto benéfico en el peso corporal, el rendimiento de la canal y la reducción de la deposición de grasa (Khatun et al., 2020; Castro et al., 2019; Dao et al., 2020).

### **Isoleucina**

La isoleucina es el cuarto aminoácido limitante (Park y Austic, 2002) en dietas bajas en proteína a base de maíz o soya (Harms y Rusell, 2000) en dietas para pollitos en crecimiento, pero es menos limitante que la valina en dietas de pollos de engorde bajas en proteínas (Park y Austic, 2002).

La isoleucina se clasifica como un aminoácido cetogénico y glucogénico (Farran et al., 2003) porque se degrada en el organismo para producir acetil-CoA y succinato, también se cataloga como un AA cadena ramificada (Farran et al., 2003, Hale et al., 2002); junto con

la valina y la leucina, los cuales comparten muchas enzimas utilizadas en su degradación, la cual comienza con la transaminación seguida de una desaminación oxidativa de los cetoácidos (Hale et al., 2002).

Una disminución de la isoleucina puede causar una reducción en el número de linfocitos que expresan el anticuerpo monoclonal citotóxico 8 (CT8) en sangre periférica.

### **Triptófano**

El triptófano no suele ser un aminoácido limitante hasta que se reduce los niveles de proteína cruda de las dietas (Lesson y Summers, 2008), su concentración en el organismo está entre las más bajas de todos los AA, se encuentra presente en alta concentración en las proteínas de membrana (Corzo et al., 2005).

L-triptófano está implicado en varias funciones nutricionales, neurológicas e inmunes (Yildirim et al., 2020).

Es esencial para la síntesis de proteínas, mejora el rendimiento del crecimiento, la ingesta del alimento, es un regulador de la masa ósea (Khattak y Helmbrecht, 2019), precursor de serotonina (importante en la regulación de sistema nervioso central para inhibir el comportamiento de ansiedad y controlar las respuestas al estrés, por lo que se ha planteado que un incremento en la dieta mejora el rendimiento productivo de las aves al atenuar la agresividad o el picaje) (Yildirim et al., 2020; Goo et al., 2019; Corzo et al., 2005), niacina (compuesto químico que desempeña una función importante en la respiración celular, y en el metabolismo de: proteínas, carbohidratos y lípidos) (Khattak y Helmbrecht, 2019) y melatonina (Yildirim et al., 2020) Además al ser un aminoácido aromático genera compuestos de indol e indólicos involucrados en la actividad del eje intestino cerebral (Yildirim et al., 2020).

### **Digestión de proteínas**

El tracto gastrointestinal consume al menos 20% de la energía dietética (generada en gran medida de la digestión de los aminoácidos) para la digestión y absorción de nutrientes (Liu, 2017). Corzo et al. (2011) plantearon que la desnaturalización de las proteínas se inicia antes de la ingestión de alimentos, debido a los procesos térmicos (80 y 90°C) a los que son

sometidos los nutrientes durante la elaboración de alimentos, por lo que de alguna manera el alimento puede digerirse más fácilmente por las aves.

En las aves la estimulación del nervio vago provoca la liberación de histamina y gastrina (Chiba, 2009), dando inicio a la digestión de las proteínas en el proventrículo (Angulo et al., 2009) generando la secreción de ácido clorhídrico con un pH menor a 5 por las células parietales (McDonald et al., 2013; Wu, 2017), el cual activa el pepsinógeno de las células principales a pepsina (Cuca et al., 2016 y Chiba, 2009) por medio de un proceso de hidrolisis que activa el enlace Glu-Ile liberando de péptido del extremo N-terminal de la molécula (Chiba, 2009) y, además desnaturaliza las proteínas de la dieta para exponer sus enlaces peptídicos a las proteasas activas (Wu, 2017).

La pepsina actúa con preferencia sobre los enlaces peptídicos contiguos a los aminoácidos aromáticos y posteriormente en los enlaces del ácido glutámico y la cisteína (Wu, 2017; McDonald et al., 2013), su actividad se ve afectada por la cantidad de proteínas ingeridas en la dieta, la liberación de acetilcolina por el nervio vago, concentración de ácido en el estómago, y la secreción de CCK, gastrina y otros péptidos gastrointestinales (Wu, 2017).

La digestión de proteínas posteriormente continúa en la molleja debido al pH bajo (2 a 3.5), (Cuca et al., 2016), los productos obtenidos de la digestión estomacal son principalmente polipéptidos de cadena variable y algunos aminoácidos (McDonald et al., 2013).

Por último y en mayor proporción la digestión de proteínas termina en el lumen del intestino delgado con la liberación del jugo pancreático compuesto por zimógenos como: tripsinógeno, quimiotripsinógeno, procarboxipeptidasa A y B y proeleastasas de las células acinares y, el agua y electrolitos de las células del conducto pancreático al duodeno (Wu, 2017; Cuca et al., 2016; McDonald et al., 2013), así como la secreción de aminopeptidasas, dipeptidasas y oligopeptidasas provenientes de la mucosa de los enterocitos del duodeno, yeyuno e íleon de la superficie del borde de cepillo hacia la luz intestinal (Wu, 2017; Chiba, 2009).

Las enzimas pancreáticas son activadas por medio de una cascada proteolítica limitada, regulada por los ácidos biliares y la CCK, que inicia con la enteroquinasa o enteropeptidasa

secretada por los enterocitos del duodeno (Wu, 2017). La enteroquinasa activa el tripsinógeno a tripsina por hidrolisis del enlace Lys-Ile (Chiba, 2009) con la eliminación de un hexapéptido N-terminal (Wu, 2017), esta enzima solo funciona en los enlaces donde el grupo carboxilo es dado por Lys o Arg (McDonald et al., 2013).

La tripsina es responsable de la activación del resto de enzimas (Wu, 2017):

El quimiotripsinógeno es activado a un pH de 8, actúa con mayor facilidad sobre los enlaces donde el grupo carboxilo es aportado por aminoácidos aromáticos Phe, Try, Trp (McDonald et al., 2013) o Leu sin ser activo en los enlaces Pro (Chiba, 2009).

Las proelastasas al ser activadas funcionan sobre los AA no polares de las proteínas y en los sustratos de la quimiotripsina produciendo péptidos (Chiba, 2009).

Las procarboxipeptidasas son activadas a pH de 7.5 a 8.5 actúa sobre los péptidos producidos por las quimiotripsinas y las elastasas, hidrolizando los AA en el extremo C-terminal (Chiba, 2009).

La etapa final de la digestión de proteínas ocurre en la membrana externa de la mucosa intestinal (borde de cepillo), las aminopeptidasas hidrolizan proteínas o péptidos grandes en el extremo N-terminal (Wu, 2017), adyacente al grupo amino libre de péptidos simples, algunas de estas aminopeptidasas tienen una amplia afinidad de sustratos, mientras que otras son altamente específicas hacia el AA del extremo N-terminal, las oligopeptidasas hidrolizan los enlaces peptídicos de oligopéptidos con 2-20 residuos de AA (Wu, 2017), y las dipeptidasas completan la degradación de los dipéptidos en aminoácidos (McDonald et al., 2013).

Aunque la mayoría de la hidrólisis enzimática de las proteínas ocurre en el lumen del intestino delgado obteniéndose 20% de AA libres y 80% de péptidos (Wu, 2017; Cuca et al., 2016), una pequeña porción ocurre de forma intracelular, en el que algunos péptidos son absorbidos por los enterocitos antes de ser degradados por las enzimas del citoplasma (McDonald et al., 2013). Además, en las aves el microbioma intestinal puede ser una fuente importante de proteasas y peptidasas para la hidrólisis de proteínas del alimento para su uso en la síntesis proteica (Wu, 2017).

## **Absorción de péptidos y aminoácidos**

La absorción de los péptidos y aminoácidos ocurre a diferentes velocidades; en mayor medida en las células epiteliales intestinales del duodeno y yeyuno (Wu, 2017) por medio de dos vías: la absorción transcelular (Chrystal et al., 2020; Wu, 2017) que incluye transportadores y antiportadores acoplados a glucosa por medio  $\text{Na}^+$  o  $\text{H}^+$  (Chrystal et al., 2020) en el que los AA y péptidos van directamente desde la membrana apical del enterocito hasta su membrana basolateral para alcanzar el torrente sanguíneo (Blachier et al., 2013; Wu, 2017), y absorción paracelular en donde los AA pueden moverse a través de uniones estrechas al espacio lateral con la ayuda de receptores (Wu, 2017).

El transporte de aminoácidos y péptidos en los mamíferos se realiza en su mayoría por medio de transporte facilitado (Wu, 2017) secundario (D'Mello, 2000), el cual usa proteínas portadoras que facilitan el traslado de uno (uniporter) o más sustratos (cotransporte) en una misma dirección (symporter) o en diferentes sentidos (antiporte) (Müeller-Esterl, 2008), utilizando diferencias en los gradientes electroquímicos de los sustratos o de los iones transportadores (Müeller-Esterl, 2008; D'Mello, 2000) para ingresar dentro de la membrana apical del enterocito (D'Mello, 2000). Para el transporte secundario de AA están los sistemas independientes y dependientes de  $\text{Na}^+$  (Wu, 2017).

El sistema transportador dependiente de  $\text{Na}^+$  (D'Mello, 2000), absorbe el 60% de los AA (Wu, 2017) es un sistema de transporte activo secundario (sinporte) que utiliza proteínas transportadoras, en el que el AA aprovecha la transferencia de  $\text{Na}^+$  al espacio intracelular para la translocación de AA (D'Mello, 2000).

El sistema independiente de  $\text{Na}^+$  capta el 40% de los AA (Wu, 2017) también utilizan la energía derivada del gradiente electroquímico de uno o más iones cotransportados (Müeller-Esterl, 2008; D'Mello 2000), intercambiando generalmente un ion impulsor por otro ion o sustrato (D'Mello, 2000).

La difusión simple; es sistema pasivo donde no se requiere el uso de proteínas, no es saturable (Müeller-Esterl, 2008; D'Mello 2000) y tiene una baja participación en el transporte de AA (Wu, 2017). En cuanto al transporte activo no colabora de manera directa en la absorción de los AA pero desempeña un rol importante en la homeostasis celular al sacar iones utilizados para el transporte de AA (D'Mello 2000; Wu. 2017).

Si bien, para la absorción de aminoácidos existen más de 20 tipos de sistemas de transporte (Corzo et al., 2011) en mamíferos solo se han reconocido los siguientes: A, asc, ASC,  $b^{0,+}$ , B<sup>0</sup>, B<sup>0+</sup>,  $\beta$ , Gly, IMINO, L, N, T, X<sup>AG</sup>, xc,  $y^+$ ,  $y^+L$  (cada uno con sus respectivas isoformas), utilizando diferentes mecanismos de transporte (Gassol, 2004; Barrera, 2010; Hyde et al., 2003), propiedades reguladoras y su especificidad de sustrato (Hyde et al., 2003) como: aminoácidos catiónicos (sistemas  $b^{0,+}$ , B<sup>0</sup>, B<sup>0+</sup>,  $y^+$ ,  $y^+L$ ), ácidos o aniónicos (sistemas X<sup>AG</sup>, xc) (Avila-Chávez et al., 1997) y neutros (A, N, L, ASC, Gly,  $\beta$ , asc y T) (Avila-Chávez et al., 1997; Gassol 2004), ejemplificados en la [Cuadro 1](#), [Figura 3](#).

Los sistemas transportadores activos secundarios de aminoácidos como los sistemas A, X<sup>AG</sup>, N e  $y^+$ , acoplan el transporte de AA a los cambios en los gradientes electro-químicos generados por el transporte activo primario de la bomba Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> ATPasa, mientras que los sistemas intercambiadores de aminoácidos como los sistemas ASC,  $y^+L$  y L se transportan por mecanismos antiportadores (Hyde et al., 2003).

En el intestino los principales sistemas transportadores de AA en la membrana apical de enterocito son  $b^{0,+}$ , B<sup>0</sup>; para aminoácidos catiónicos y neutros respectivamente mientras que en la membrana basolateral del intestino delgado se expresa el transportador  $y^+L$ . Los transportadores  $b^{0,+}AT$  y  $y^+L$  funcionan como intercambiadores de AA catiónicos (Lys) por AA neutros (Leu) (Buenabad et al., 2014).

En el tracto gastrointestinal de los pollos se encuentra una actividad transportadora de aminoácidos y péptidos similar al de los mamíferos por ejemplo en pollos se ha demostrado que el transporte de metionina depende de los sistemas B,  $b^{0,+}$ ,  $y^+$ ,  $y^+L$  en la membrana del borde de cepillo en yeyuno, mientras que la absorción de lisina se realiza por medio de los sistemas;  $b^{0,+}$ , o  $y^+$ ; un aumento de lisina en la dieta incrementa la velocidad del sistema  $y^+$  mientras que el sistema  $b^{0,+}$  aumenta la velocidad y especificidad en el transporte de Lys y

para el transporte de aminoácidos aniónicos dependiente de  $\text{Na}^+$  hay transportadores con una actividad similar al sistema  $\text{X}^{\text{AG}}$  de mamíferos (D'Mello, 2000).

En cuanto al transporte de dipéptidos y tripéptidos del borde de cepillo al interior del enterocito solo se conoce el transportador de péptidos 1 (PepT1) ([Figura 4](#)); este transportador en dietas con desequilibrios o deficiencias en AA no afecta su función, ya que es capaz de autoregularse (Corzo et al., 2011). El sistema intercambiador  $\text{NH}_3$ ; cambia 3  $\text{Na}^+$  por un  $\text{H}^+$  (Daniel et al., 2006), este sistema se activa cuando aumenta la concentración de  $\text{H}^+$  en el citosol del enterocito, activando la proteína PepT1 (Daniel et al., 2006; D'Mello 2000; Wu, 2017). La proteína PepT1 utiliza el sistema antiporte; cuando se saca  $\text{H}^+$  del citosol. PepT1 transporta dipéptidos y tripeptidos desde la membrana apical del enterocito hasta el citosol, en donde los péptidos son hidrolizados por peptidasas citosolicas, formando aminoácidos libres que atraviesan la membrana basal con ayuda de sistemas transportadores alcanzando la circulación portal en aves (D'Mello 2000; Wu, 2017).

Los efectos de los diferentes niveles de proteína sobre algunos de los transportadores de AA y di y tri-péptidos fueron publicados recientemente por Barekatin et al. (2019) quienes publicaron que en pollos alimentados con dietas bajas de proteína se ha provocado una sobreexpresión del transportador  $\text{y}^{\text{+}}\text{LAT1}$  comparado con dietas estándar en yeyuno, o comparado con dietas altas en proteína en íleon, de igual forma la expresión del gen transportador SGLT1 o GLUT (transporte de glucosa) se incrementó con dietas bajas en proteína en íleon (permitiendo la apertura de uniones estrechas para la transferencia de pequeñas moléculas y péptidos), sin embargo, la expresión de genes para el transportador PepT1 se redujo en íleon con dietas bajas en proteína en comparación con dietas estándar. El aumento de la permeabilidad causada por las dietas bajas en proteína y una función de la barrera intestinal deteriorada comparada a dietas estándar es probablemente provocado por las diferencias en las concentraciones y disponibilidad de AA en la dieta para ejercer una función deseada en la barrera intestinal.

De todos los aminoácidos absorbidos por las células del intestino dos terceras partes se realiza en forma de péptidos (Chiba, 2009). Una pequeña cantidad de los aminoácidos libres y péptidos absorbidos en la lámina propia entran en la vénula (Wu, 2017) o a la vena

porta, hasta el hígado donde algunos aminoácidos son retenidos y otros liberados a la circulación para ser utilizados como componentes de proteínas tisulares o para la formación de otros componentes como hormonas, enzimas, mediadores químicos o distintos compuestos nitrogenados (García, 2012).

La proteína que no se absorbe en el intestino delgado en su mayoría es utilizada por microorganismos presentes en el intestino grueso (generando proteínas microbianas, amoniaco H<sub>2</sub>S, AA, urea, nitritos, nitratos, CO<sub>2</sub>, metano y SCFA) dado que las células epiteliales del ciego y colon tiene niveles bajos de transportadores de péptidos y proteínas (Wu, 2017).

Finalmente, los aminoácidos que no son aprovechados por el organismo de las aves para la síntesis de proteínas y sus demás usos, son excretados a través de la formación de ácido úrico (Namroud et al., 2010; Bezerra et al., 2015) proceso que demanda alta cantidad de energía y causa un gran desperdicio de N generando grandes consecuencias en lugares donde la densidad de población animal es alta (Bezerra et al., 2015).

Los factores que influyen en las pérdidas ileales de AAE en las aves de corral son la edad, la tensión de las aves, los niveles de aminoácidos y proteínas, la tasa de renovación de mucina endógena, la salud intestinal y el nivel de electrolitos en la dieta (Adedokun y Applegate, 2014).

### **Dietas altas y estándar en proteína cruda**

Las desventajas de emplear dietas altas en proteína cruda se deben a que requieren de una mayor cantidad de enzimas y energía; para la digestión, absorción y excreción del exceso de aminoácidos (Hilliar y Swich, 2019), provocando un aumento en la humedad de las heces que genera un aumento en la incidencia y gravedad de lesiones en las almohadillas de las patas y ampollas en la pechuga (Hilliar et al., 2019). Además, el exceso de PC en la dieta puede limitar el uso del primer aminoácido limitante en pollos (Chrystal et al., 2020).

Aumentar la cantidad de aminoácidos en la dieta influye en la reducción de la atrofia en la mucosa intestinal, al estimular la inmunidad local y mantener un equilibrio en la microbiota (Bortoluzzi et al., 2018).

Dietas altas en proteína pueden generar una sobrecarga de AA, péptidos y proteínas no digeridas en el tracto gastrointestinal que sirven como sustrato para bacterias patógenas como *Clostridium perfringens* causante de enteritis necrótica (Hilliari y Swich, 2019).

Wang et al. (2014), señalan que la alimentación de pollos de engorda de 8 a 21 días de edad en dietas con altas cantidades de aminoácidos (AA) o altas cantidades de energía metabolizable aparente (AME) mejoran la tasa de conversión alimenticia.

Se ha demostrado que el consumo de proteínas, genera una mayor producción de calor que el consumo de carbohidratos o grasa. En pollos alimentados con alta cantidad de proteína cruda sometidos a estrés se han reportado efectos perjudiciales sobre el aumento de peso, eficiencia alimenticia y la composición de la carne (Zulkifli et al., 2018), sin embargo en pollos con estrés por calor se ha reportado efecto positivo al aumento de consumo de AA (Aftab y Ashraf, 2009) aunque las dietas bajas en proteína podrían mejorar el rendimiento productivo de pollos con estrés calórico si hay una adición adecuada de AAE y ANNE (Zulkifli et al., 2018).

Las concentraciones más altas de proteína pueden causar deficiencia de biotina y disminuir su concentración en sangre, así como la síntesis de acetil-coenzima A carboxilasa causando interrupción de la generación de lípidos cutáneos lo que predispone a lesiones cutáneas, hematomas y dermatitis (Liu, 2017).

### **Dietas bajas en proteína cruda**

La PC a pesar de ser importante en la formulación de dietas en aves de corral; sobre todo en la acumulación de carne en los pollos de engorda, resulta más significativo una cantidad y equilibrio específico de aminoácidos esenciales (AAE) en las dietas, con suficiente N disponible para la síntesis de aminoácidos no esenciales (AANE) (Bezerra et al., 2015 Aftab et al., 2006).

Distintos investigadores coinciden que dietas bajas en proteína aun cuando cumplen con los requisitos establecidos de AAE, provocan una disminución del rendimiento en el crecimiento (Namroud et al., 2010; Ospina-Rojas 2014; Bregendahl, 2002; Furlan et al., 2004) y la composición corporal, y también se nota este efecto en dietas reducidas en

proteína suplementadas con AAE y AANE comparados con pollos de engorda o cerdos en crecimiento alimentados con dietas estándar en niveles de PC, por lo que se ha llegado a la conclusión de no reducir el contenido de proteína cruda en más de 3 a 4 puntos porcentuales (Ospina-Rojas 2014; Bregendahl, 2002; Furlan et al., 2004); en comparación con dietas convencionales los pollos alimentados con menos de 3% de PC que requieren una mayor cantidad de lisina y metionina (Jariyahatthakij et al., 2018).

Una mayor reducción del 3% de proteína cruda afecta el rendimiento productivo en pollos de engorda a pesar de cumplirse con el requerimiento de AAE, que podría deberse a diferencias entre la proporción de calorías y proteínas presentes en la dieta causando diferentes consumos de alimento o a la proporción de aminoácidos esenciales y no esenciales (Liu et al., 2017).

A pesar de la formulación adecuada de dietas entre el 10 y 43% de PC en el alimento no es digerida por los pollos de engorda y es fermentada por las bacterias cecales que producen compuestos como aminas, índoles, fenoles, cresol y amoníaco, que generan pobres condiciones en el TGI causando un retraso en el crecimiento (Macelline et al., 2019), una mayor cantidad de N excretado en el medio ambiente por lo que al reducirse el contenido de PC se disminuye la excreción de nitrógeno (Kriseldi et al., 2018; Barekatain et al., 2019; De Cesare et al., 2019; Harn et al., 2019), la humedad en las excretas (Barekatain et al., 2019) y la emisión de amoníaco de las casetas de pollos de engorde (Kriseldi et al., 2018; Harn et al., 2019), se reduce el costo de alimentación (Kriseldi et al., 2018; Jariyahatthakij et al., 2018) y se eficientiza el uso de las proteínas (Jariyahatthakij et al., 2018).

Las dietas bajas en proteína alteran la concentración de proteína total (disminuye hasta un 9%) probablemente asociado a la reducción AANE, y podrían afectar los parámetros de referencia de algunos metabolitos sanguíneos como: albumina, globulina, ácido úrico y glucosa (Corzo et al., 2011).

Macelli et al. (2019) reportaron que las dietas reducidas en proteína incrementan los niveles de nitrógeno ureico en pollos de engorda al día 14 de edad, comparados con pollos alimentados con dietas altas en proteína y dietas reducidas en proteína suplementadas con aminoácidos sintéticos mientras que Kamran et al. (2016) reportaron incrementos sobre las

concentraciones de glucosa y triglicéridos en pollos alimentados con dietas reducidas en proteína, asociando estos niveles a una mayor retención de grasa en la canal.

### **Rendimiento productivo**

La disminución de la PC en la dieta ha permitido minimizar los excesos de aminoácidos (Faria et al., 2005; Ospina-Rojas 2014; Bregendahl, 2002; Chrystal et al., 2020; Rochell et al., 2016), y en las dietas de pollo se han obtenido resultados favorables hasta cierto punto ya que la reducción de PC del 19 al 15% suplementada con AA sintéticos en la dieta mejora la eficiencia del N del 60 al 70%, porque se aumenta la proporción de proteína digestible (Hilliar y Swich, 2019), pero la mayoría de los investigadores han señalado que la reducción de PC tiene algunos efectos perjudiciales en el rendimiento productivo, (Namroud et al., 2008; Si et al., 2004), el rendimiento de la pechuga (Corzo et al., 2011) y el apetito, aun proporcionando los requisitos de AAE (Namroud et al., 2008) porque los AANE se convierten en limitantes (Harn et al., 2019) o debido al cambio de disponibilidad de AA que promueven procesos negativos entre los AA (Nascimento et al., 2016).

La falta para obtener un resultado óptimo en el rendimiento se puede atribuir a las siguientes causas: falta de N para sintetizar los aminoácidos no esenciales (Si et al., 2004; Chrystal et al., 2020), insuficiencia del ave para sintetizar los NEAA especialmente Gly, Ser, Pro y Glu (Namroud et al., 2008), desequilibrio de electrolitos (Waguespak et al., 2009; Si et al., 2004; Chrystal et al., 2020), generalmente disminución del nivel de potasio aportado por la harina de soja (Waguespak et al., 2009; Namroud et al., 2008) así como desequilibrios o al contenido subóptimo de entre ciertos AA esenciales (Kriseldi et al., 2018) como Arg a Lys (Si et al., 2004; Namroud et al., 2008), Lys a Thr, y entre aminoácidos de cadena ramificada, y Trp a aminoácidos neutros grandes (Namroud et al., 2008).

Las dietas reducidas en proteína cruda aumentan la cantidad de grasa fijada en los tejidos mientras se disminuye la deposición de proteína, con dietas altas en proteína ocurre el efecto contrario reduciendo la deposición de la grasa y aumentándose la fijación de proteína (Jariyahatthakij et al., 2018; Hilliar y Swich 2019). Jariyahatthakij et al. (2018) sugirieron suplementar durante la etapa de crecimiento AA en la dieta, y posteriormente reducir el

contenido energético para mejorar (probablemente) el aprovechamiento de las proteínas y reducir la acumulación de grasa a través de un aumento de la lipólisis y / o la interrupción del transporte de los triglicéridos en pollos de engorda.

Las dietas bajas en proteína también tienen beneficios sobre las características organolépticas de la carne a causa de producir carne más tierna debido a la disminución de la fibra muscular en la pechuga (Kobayashi et al., 2012). Sin embargo, es más importante un balance adecuado de energía y proteína para mantener un adecuado rendimiento durante el crecimiento, el costo de producción y la composición corporal de los pollos de engorda en dietas reducidas en proteína (Jariyahatthakij et al., 2018).

Se ha reportado que dietas reducidas en PC disminuye el consumo de agua, porque se tiene una menor necesidad de excretar el excedente de nitrógeno (Law et al., 2019; Harn et al., 2009), reduciendo el riesgo de cama húmeda y la exposición a irritantes no identificados en los materiales fecales (Harn et al., 2009), y al amoníaco (Harn et al., 2009; Law et al., 2019); disminuyendo la incidencia de enfermedades e infecciones (Hilliar et al., 2019); como las entéricas al mejorar la salud intestinal restringiendo la proliferación de patógenos (Law et al., 2019) también se disminuyen los casos de dermatitis en la piel, lesiones en la almohadilla de las patas, quemaduras y ampollas en el corvejón, ampollas en pechuga (Kriseldi et al., 2018; Harn et al., 2009; Hilliar et al., 2019; Law et al., 2019), mejorando el bienestar animal (Harn et al., 2009) y disminuyéndose el decomiso en el rastro (Harn et al., 2009).

### **Impacto ambiental**

La contaminación ambiental para la producción pecuaria es un desafío (Powers y Angel, 2008) en todo el mundo sobre todo en los países desarrollados, en los cuales las emisiones ambientales generan una progresiva preocupación en las unidades de producción intensivas (Hernández et al., 2012; Aletor, 2000), debido a las presiones gubernamentales y sociales que demandan todavía más medidas para reducir la potencial contaminación ambiental (Powers y Angel, 2008). Las emisiones provenientes del estiércol de la producción avícola representan un 20% en la producción de huevo mientras que en pollos de engorda un 6% (Roma, 2013).

En la producción animal las estrategias principales para limitar la contaminación ambiental son:

- La disminución de proteína cruda en la dieta de pollos de engorda con la suplementación de aminoácidos sintéticos (Aletor et al., 2000; Bregendahl et al., 2002; Siegert et al., 2016; Sirri, 2012; Lu et al., 2017)
- La implementación de aditivos como las enzimas, los probióticos y ácidos orgánicos en la dieta para mejorar la utilización del N (Lu et al., 2017)
- La alimentación en fases (Pope et al., 2004) y por sexos separados (Hernández et al., 2012). Lu et al. (2017) informaron que la implementación de hasta 2 fases de alimentación reduce la excreción de N en el ganado un 10% comparado al uso de una sola dieta para el ciclo productivo
  - o En los pollos de engorda el empleo de las fases de alimentación durante 7 semanas ha limitado el exceso de AA en la dieta y como resultado la excreción de nitrógeno disminuyó (Pope et al., 2004). En cuanto al requerimiento de energía y AA por sexo son distintos entre hembras y machos (Hernández et al., 2012).
- Disminución de la cantidad de animales que pueden criarse por unidad de tierra, debido a que grandes cantidades del nitrógeno presente en la proteína cruda de las dietas no es aprovechada por los animales y se excreta al medio ambiente (Hernández et al., 2012 y Harn et al., 2019)

Los programas nutricionales implementados para cubrir los requerimientos de la especie de acuerdo a la edad (Lu et al., 2017; Powers y Angel, 2008) y fin zootécnico han mostrado efectos favorables en la reducción de la excreción de nutrientes además de implicar una disminución o equilibrio en los costos de producción (Powers y Angel, 2008).

Las necesidades de AA en la dieta se reducen constantemente a lo largo del tiempo en un intento por disminuir el impacto asociado con el exceso de proteínas (Pope et al., 2004). Sirri et al. (2012) mencionan que la Unión Europea estableció en el año 2000; 170 kg de Nitrógeno como cantidad máxima de estiércol que puede dispersarse por año por hectárea. Un exceso de estiércol como fertilizante puede generar niveles excesivos de minerales traza como cobre y zinc que resulta tóxico para las plantas y microorganismos además las

concentraciones altas de N pueden causar contaminación de los mantos acuíferos al filtrarse por el suelo (Liu et al., 2017). Ospina-Rojas et al. (2012) describieron que del 70 a 75% del N que ingieren los animales se pierde por una ineficiencia en la absorción de los AA o a causa de una oxidación de AA al administrarse por encima de los requerimientos en la dieta.

En la nutrición de cerdos se ha demostrado que, por cada punto porcentual de proteína cruda disminuida en la dieta suplementada con aminoácidos sintéticos, la cantidad de N excretado se redujo hasta un 8% (Bregendahl et al., 2002), mientras que en aves la reducción de un punto porcentual de proteína en la dieta suplementada con aminoácidos sintéticos (para mantener el crecimiento en los pollos de engorda) disminuye hasta un 10% la excreción de nitrógeno (Macellini et al., 2019) aunque otros estudios concluyen que por cada 10g/kg de reducción en el nivel de proteína en la dieta de pollos de engorda las emisiones de amoníaco se reducen un 10%. Van Emous et al. (2019) reportan de una manera más detallada que una reducción de 15g/kg de proteína cruda en la dieta disminuye un 8% el nivel de nitrógeno en las heces, un 9% la emisión de amoníaco y un total de nitrógeno de 11% sin afectar el consumo de agua y alimento.

### **Integridad intestinal**

El tejido intestinal representa alrededor del 5% del peso corporal y consume el 20% de la energía y entre el 15 y 30% del O<sub>2</sub> y las proteínas del organismo, debido a su rápida regeneración epitelial y su intensa actividad metabólica, es imprescindible proporcionar y optimizar el uso de nutrientes en pollos de engorda de acuerdo a sus necesidades y al entorno sanitario (Bortoluzzi et al., 2018), por lo que al administrar dietas con altas cantidades de energía y proteína se mantiene una regeneración rápida de las células intestinales (Wang et al., 2014).

Una buena integridad del epitelio intestinal favorece la absorción de nutrientes y controla mejor la permeabilidad (por medio de las uniones estrechas que incluyen: claudinas, ocludinas y moléculas de adhesión) para evitar la entrada de microorganismos y toxinas en el organismo (Barekatian et al., 2019).

Debido a la importancia de la inclusión de la proteína en la dieta se debe evaluar el efecto de las dietas bajas en proteínas sobre la integridad intestinal. Incharoen et al. (2010) evaluaron el efecto una dieta baja en proteína comparándola con una dieta balanceada que contenía 18.1% de proteína cruda en materia seca (con la misma cantidad de energía), en pollos machos de 9 a 16 semanas de edad en donde se encontró que la dieta baja en proteína provocó una disminución en: la altura y el área de la vellosidades, y las áreas celulares epiteliales de duodeno y yeyuno así como en la mitosis celular de yeyuno e íleon, comprobando que una dieta baja en proteína genera una disminución en la síntesis de proteínas especialmente en intestino afectando la morfología intestinal.

Estudios más recientes realizados por Macelline et al. (2019) encontraron que pollos de engorda machos Ross 308 criados del día 1 al 35, alimentados con 3 niveles de proteína cruda: alta 23.5 y 20.5% y baja 18 y 17% y baja suplementada con AA 18 y 17% (Met, Lys, Thr, Val, Ile, Arg, Trp, Gly y Ser, para cubrir los requerimientos de los pollos de engorda) con dos fases de alimentación inicio y crecimiento respectivamente, tuvieron efecto sobre la integridad intestinal; la altura de las vellosidades y la profundidad de la cripta en donde las aves alimentadas con la dieta alta en proteína y baja en proteína suplementada con AA fueron mejores ( $P < 0.05$ ) que las dietas bajas en proteína, sin efecto de los niveles de proteína sobre la relación entre la altura de las vellosidades con la profundidad de la cripta.

Mientras que los investigadores antes mencionados encontraron efecto al reducir la cantidad de proteína en las dietas, Barekatin et al. (2019) no encontraron diferencias para la altura o el ancho de las vellosidades, la profundidad de la cripta o en la relación entre la altura de las vellosidades y la profundidad de la cripta ( $P > 0.001$ ) en yeyuno e íleon en pollos machos Ross 308 del día 9 al 35 alimentados con 3 niveles de proteína: alta, baja y estándar, en donde los tratamientos dietarios contenían los siguientes niveles de proteína cruda: baja en proteína 170/150 g/kg, estándar en proteína 202/190 g/kg y alta en proteína 220/210 g/kg para la fases de crecimiento y finalización respectivamente, sin embargo, el área de superficie de las vellosidades intestinales fue mejor en las dietas estándar ( $P < 0.05$ ) que en las dietas con baja y alta cantidad de proteína cruda únicamente en yeyuno. De igual manera Cowieson et al. (2016) no encontraron diferencias sobre la altura de las

vellosidades, la profundidad de la cripta, el grosor epitelial o el número de las células de Goblet en pollos de engorda machos, Ross 308 divididos en 2 grupos experimentales; control positivo que cubría los requerimientos de proteína y un control negativo reducida en 4% de proteína cruda y aminoácidos digestibles (respecto a la dieta basal en proteína durante todo el experimento).

Macellini et al. (2019) indican que el efecto negativo de las dietas bajas en proteína sobre la arquitectura intestinal puede ser atribuida a la reducción de AANE como glutamina, glicina y prolina, necesarios en desarrollo del epitelio intestinal y en la producción de secreciones digestivas como la mucina de igual forma Barekattain et al. (2019) explican que no existe diferencia sobre la integridad intestinal en dietas con diferentes niveles de proteína si son suplementadas con aminoácidos sintéticos.

### **Microbioma intestinal**

La microbiota intestinal formada por diferentes bacterias arqueas metanogénicas, hongos y virus (Xiao et al., 2016) depende de la nutrición del huésped (dietas reducidas con 2 a 3 % de aminoácidos ha modificado la estructura, composición y función de la microbiota cecal de los pollos) (Bortoluzzi et al., 2018), que junto con la mucosa intestinal forman la primera línea de defensa del animal, para regular la permeabilidad celular y la secreción de péptidos antimicrobianos (Bortoluzzi et al., 2018) por lo cual desempeñan un papel importante en la salud, pero también en el crecimiento corporal a través de la modulación en la morfología de las vellosidades y criptas intestinales, la digestión de los alimentos y la absorción de nutrientes, el desarrollo del sistema inmunitario, la producción de ácidos grasos de cadena corta en energía, la síntesis de vitaminas, así como la inhibición de la proliferación de bacterias patógenas intestinales (Xiao et al., 2016).

Por lo cual la alteración en la composición del microbioma puede provocar mala salud intestinal mediante un aumento a la susceptibilidad de enfermedades infecciosas provocando limitaciones en el crecimiento y la producción (Xiao et al., 2016). También el rendimiento productivo se ve afectado por la profundidad de las criptas; criptas intestinales con poca profundidad pueden disminuir el mantenimiento intestinal, reservando energía y proteína para su uso en la deposición intestinal (Wang et al., 2014).

Van Harn et al. (2019) reportaron que los bajos niveles de PC en las dietas de pollos de engorde pueden reducir el riesgo de problemas de digestión y enteritis necrótica, al limitar la cantidad de AA no absorbidos en el intestino (Rochell et al., 2016). Bortoluzzi et al., 2018 hallaron que las dietas reducidas en 2 a 3 % de aminoácidos han modificado la estructura, composición y función del microbioma cecal de los pollos, lo que confirmaron. De Cesare et al. (2019) demostraron que la reducción de 7% PC con respecto a la dieta basal en proteína en los pollos de engorda aumenta las colonias de *Lactobacillus* en el ciego a lo largo del tiempo, lo que está relacionado con una mejor tasa de conversión alimenticia.

### **Pigmentación de la piel del pollo**

En México las dietas balanceadas para pollos de engorda deben de contener altas concentraciones de pigmento debido a los ciclos cortos de producción y obtener una pigmentación adecuada de la piel para cubrir la demanda que exige el consumidor (Hernández, 2013). Aunque los carotenoides siguen el mismo proceso de digestión que los lípidos, las proteínas juegan un papel importante en su transporte, ya que las lipoproteínas de alta densidad (HDL) y las de baja densidad (LDL) transportan aproximadamente del 90% y 10% de los carotenoides, respectivamente, dentro del enterocito, y posteriormente ambas lipoproteínas ligan a los carotenoides a la alipoproteína A-1 para su transporte en la circulación sanguínea (Montoya, 2015).

A pesar de la importancia de las proteínas en el transporte de pigmento, solo existe un reporte en donde se evaluó el efecto sobre la fijación del pigmento a causa de las dietas bajas en proteína cruda.

## **JUSTIFICACIÓN**

La reducción de proteína cruda con la adición de aminoácidos sintéticos en la dieta de aves, es una opción atractiva para mantener los parámetros productivos, implicando un menor costo económico de las dietas. Hay muy pocos estudios, en donde adicionaron más de seis aminoácidos sintéticos esenciales en las dietas bajas en proteína, evaluando el efecto sobre los parámetros productivos y el rendimiento en canal. Bajo estas consideraciones, se realizó la siguiente investigación, empleando pollos de la estirpe Ross 308 alimentados con dietas formuladas a base de maíz-harina de soya bajas en proteína cruda suplementadas con aminoácidos sintéticos; DL-Metionina, L-Lys, L-Tre, L-Val, L-Arg y L-Trp para comparar la respuesta en los parámetros productivos y el rendimiento en canal, así como la pigmentación de la piel de los pollos. Lo anterior atendiendo a las recomendaciones del manual de la estirpe, utilizando los aminoácidos sintéticos ya mencionados de uso comercial en la industria avícola por su disponibilidad. Esto permite evaluar las ventajas y desventajas de emplear dietas con menor porcentaje de proteína cruda cumpliendo lo establecido en el concepto de proteína ideal.

## **HIPÓTESIS**

La reducción de hasta dos unidades porcentuales de proteína cruda en dietas maíz-pasta de soya en pollos de engorda Ross 308, en crianza por sexo separados suplementadas con aminoácidos esenciales DL-Metionina, L-Lys, L-Tre, L-Val, L-Arg y L-Trp (para cumplir con los requerimientos de la estirpe) en cuatro etapas de alimentación (inicio, crecimiento, finalizador 1 y finalizador 2), no afecta los parámetros productivos, el rendimiento de la canal y el grado de amarillamiento de la piel.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivos generales**

Se evaluó el efecto de dietas bajas en proteína cruda en pollos de engorda Ross 308 en machos y hembras, en cuatro etapas de alimentación: inicio (1-10 días), crecimiento (11-24 días), finalizador 1 (25-39 días) y finalizador 2 (40-49 días) sobre los parámetros productivos (consumo de alimento, ganancia de peso, conversión alimenticia y mortalidad), el rendimiento de la canal y la pigmentación amarilla de la piel.

### **Objetivos específicos**

Se llevaron semanalmente el peso y consumo de alimento para determinar la ganancia de peso, e índice de conversión alimenticia, uniformidad y mortalidad de pollos Ross de 1-49 días.

Se obtuvo el peso de las aves antes y después del sacrificio de los pollos criados de 1 a 49 días para determinar el rendimiento en canal.

Se calculó el rendimiento de pechuga, así como el de pierna y muslo.

Se determinó el grado de amarillamiento en la zona aptérica de la piel de los pollos a los 49 días de edad, antes y después del sacrificio.

## **MATERIAL Y MÉTODOS.**

### **Lugar de estudio**

La investigación se realizó en el Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión en Producción Avícola (C.E.I.E.P.Av.) de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México, ubicado en la calle Manuel M. López s/n, colonia Zapotitlán, delegación Tláhuac, en la Ciudad de México, a una altura 2250 msnm, con una temperatura media anual de 18°C y una precipitación pluvial anual de 747mm (Domínguez et al., 2019).

### **Manejo de animales y alojamiento**

Los métodos de manejo de las aves en el presente estudio se realizaron de acuerdo a lo establecido por el Subcomité Institucional para el Cuidado y Uso de los Animales Experimentales (SICUAE-FMVZ-UNAM).

Se utilizaron 882 pollos de la estirpe Ross 308, desde el día 1 hasta el día 49 de edad, provenientes de una incubadora comercial, los cuales se alojaron por sexos separados, en casetas experimentales de ambiente natural, en corrales de 3.73m<sup>2</sup>, con cama de viruta de madera de un espesor de 10cm.

El agua y el alimento se ofrecieron *ad libitum*; en la fase de iniciación se emplearon comederos tipo microtolva y bebederos de vitrolero, posteriormente para las siguientes fases se usaron bebederos de campana y tolvas manuales.

Al día 10 de edad se aplicó la vacuna de Newcastle, y la vacuna emulsionada de Newcastle+Influenza aviar a todas las aves.

### **Diseño de experimento y dietas**

Las aves fueron distribuidas en un diseño experimental completamente al azar con un arreglo factorial 2x3: donde un factor fue el sexo de las aves y el otro factor dietas maíz+soya con 3 niveles de proteína (dieta sin reducción de PC, menos 1% de proteína cruda y menos 2% de proteína cruda, con cantidades similares de los aminoácidos más limitantes), cada tratamiento con 6 réplicas de 25 aves.

Las dietas se formularon a base de maíz–pasta de soya (análisis previo de las materias primas realizado por NIR mostrados en la [Cuadro 2](#) y [Cuadro 3](#), respectivamente), con el paquete NUTRION Windows TM versión 5 Pro®, y se elaboraron en forma de harina en la planta de alimentos del C.E.I.E.P.Av.; de acuerdo a las recomendaciones de la casa genética (Aviagen, 2019), utilizando 4 fases de alimentación: Iniciador (0-10 días) ([Cuadro 4](#)), Crecimiento (11-24 días) ([Cuadro 5](#)), Finalizador I (25-39 días) ([Cuadro 6](#)) y Finalizador II (40-49 días) ([Cuadro 7](#)).

### **Parámetros productivos a evaluar**

Se evaluaron durante 7 semanas los siguientes parámetros productivos: peso corporal (g), ganancia diaria de peso (g), consumo de alimento (g), índice de conversión alimenticia (kg:kg), porcentaje de mortalidad, la pigmentación de las aves (a partir de la quinta semana de edad y hasta finalizar el experimento).

Al concluir el experimento se determinó la pigmentación cutánea de las aves antes y después del procesamiento, utilizando el colorímetro de reflectancia (Minolta CR 400®), midiendo los valores de luminosidad, amarillamiento (b) en la piel de las aves sobre la zona aptérica lateral izquierda (región de la vena de la grasa de la pechuga) (García, 2012).

El rendimiento en canal se determinó al día 49 de edad de las aves, bajo las condiciones comerciales del módulo de procesamiento avícola del C.E.I.E.P.Av. Las aves se sometieron a un ayuno de 8 horas, con agua a libre acceso. La captura de las aves se hizo de acuerdo al método brasileño, posteriormente las aves se pesaron de manera individual antes de ser colgadas y aturcidas en la línea de procesamiento por un electro aturdimiento en tanque de agua (120V), el método de sacrificio se hizo de manera manual por degüello bilateral (corte de las venas yugulares y arterias carótidas). Se pesaron las canales con y sin vísceras para determinar el rendimiento en canal.

### **Análisis estadístico**

Antes del análisis estadístico se realizó la prueba de Shapiro-Wilk para comprobar la normalidad de las muestras, así como la prueba de homogeneidad de varianzas Levene,

para comprobar las condiciones que supone la prueba del estadístico con una significancia del 5%.

Los datos obtenidos para los parámetros productivos, rendimiento de la canal y pigmentación amarilla de la piel, se compararon por medio de un análisis de varianza ANOVA, para un diseño factorial de 2 factores; siendo el primer factor el sexo y el segundo factor el nivel de proteína en la dieta, mediante el siguiente modelo:

$$X_{jkl} = \mu + \alpha_j + \beta_k + Y_{jk} + \varepsilon_{jkl}$$

Donde:

$X_{jkl}$  = variables de respuesta

$\mu$  = media general

$\alpha_j$  = Efecto del tratamiento (macho, hembra)

$\beta_k$  = Efecto del tratamiento (dieta balanceada en proteína, dieta con 1% menos de proteína y dieta con 2% menos de proteína)

$\varepsilon_{ijk}$  = error experimental

$Y_{jk}$  = interacción del j-ésimo tratamiento y el k-ésimo tratamiento

j = j-ésimo tratamiento

k = k-ésimo tratamiento

l = l-ésima repetición (Spiegel y Stephens 2009)

En caso de encontrarse diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, se realizó una prueba de comparación de medias con la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5%.

Todo el análisis estadístico para las variables evaluadas en el siguiente estudio se analizó por el medio del paquete estadístico IBM SPSS Statistics® versión 22.

## **RESULTADOS.**

### **Parámetros productivos**

Los resultados de los parámetros productivos en pollos de engorda Ross 308 a los 49 días de edad se muestran en la [Cuadro 8](#). Para la ganancia diaria de peso no se encontró interacción entre el sexo y el porcentaje de proteína ( $P > 0.05$ ). Tampoco se encontraron diferencias en cuanto a los niveles de proteína ( $P > 0.05$ ), donde la dieta balanceada tuvo una ganancia de peso acumulada de 3290 gramos, mientras que las dietas con menos 1% y 2% de PC tuvieron en promedio 3214 y 3228g respectivamente. En cuanto al factor Sexo los machos presentaron una ganancia de peso de 3505, la cual fue superior en 17.5% a la ganancia de peso de las hembras (2983g), esta diferencia fue significativa ( $P < 0.05$ ).

El análisis para el consumo de alimento no mostró interacción entre el sexo y el nivel de proteína ( $P > 0.05$ ), de igual modo no se encontraron diferencias para los niveles de proteína ( $P > 0.05$ ), donde la dieta balanceada tuvo un consumo de 5739 gramos y las dietas reducidas en 1% y 2% de PC (5778 y 5583g respectivamente). Para el factor sexo se encontraron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ), siendo superior el consumo de alimento en machos (6080g) en comparación con las hembras (5320g).

Para el índice de conversión alimenticia no hubo diferencia ( $P > 0.05$ ) de interacción entre el sexo y el nivel de proteína ( $P > 0.05$ ), donde la conversión alimenticia en la dieta balanceada fue de 1.75 y en las dietas reducidas con 1 y 2% de PC de 1.80 y 1.73 respectivamente. El índice de conversión alimenticia para el factor sexo presentó diferencia estadística ( $P < 0.05$ ); donde los machos obtuvieron la mejor conversión (1.73) en comparación con las hembras (1.78).

La mortalidad no demostró diferencias estadísticas para el porcentaje de proteína ( $P > 0.05$ ) ni para el factor sexo ( $P > 0.05$ ); así como efecto de interacción entre el sexo y el nivel de proteína ( $P > 0.05$ ).

### **Rendimiento en canal**

Los resultados de rendimiento en canal en pollos Ross 308 a los 49 días de edad se resumen en la [Cuadro 9](#), en donde se puede observar que para la variable peso vivo no se encontró

efecto de interacción entre el sexo y el nivel de proteína en la dieta ( $P > 0.05$ ), en cuanto al porcentaje de proteína no se registraron diferencias ( $P > 0.05$ ) entre tratamientos con un promedio de 3336 gramos para la dieta balanceada y 3273 gramos para dieta con menos 1% de proteína así como 3274 gramos en la dieta con menos 2% de proteína. Para el factor sexo se encontraron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) donde los machos presentaron mayor peso (3612g) en relación a las hembras (2977g).

En el peso de la canal en caliente no se obtuvo interacción entre el sexo y el nivel de proteína ( $P > 0.05$ ). En la dieta balanceada las canales pesaron en promedio 2438g y las dietas con menos 1% y 2% de PC (2376 y 2386g respectivamente), sin encontrar diferencia estadística ( $P > 0.05$ ) entre los tratamientos. En cuanto al factor sexo existió diferencia ( $P < 0.05$ ), donde los machos obtuvieron el mayor peso (2636g) respecto a las hembras (2164g).

En el porcentaje de rendimiento de la canal no se encontró efecto de interacción entre sexo y nivel de proteína ( $P > 0.05$ ), así como para el porcentaje de proteína ( $P > 0.05$ ). Por último, no se hallaron diferencias estadísticas para el factor sexo ( $P > 0.05$ ) con 73% para machos y 72.76% hembras.

### **Grasa en la cavidad celómica y el rendimiento de pierna y muslo**

En la [Cuadro 10](#) se muestran los resultados para el porcentaje de grasa en cavidad celómica, porcentaje de rendimiento de pechuga y de pierna con muslo. Para el porcentaje de grasa en la cavidad celómica no se encontró efecto ( $P > 0.05$ ) de interacción entre el nivel de proteína y el factor sexo. En cuanto a los niveles de proteína se encontraron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ); las dietas con menos 1 y 2 % de PC presentaron un mayor porcentaje de grasa en la cavidad celómica (6.87b y 6.35b) con respecto a la dieta balanceada (5.57a). También se hallaron diferencias significativas para el factor sexo ( $P < 0.05$ ) en donde los machos presentaron un menor porcentaje de grasa (5.20a), en comparación a las hembras (6.17b).

Para el rendimiento de pechuga, no se observó efecto de interacción entre el nivel de proteína y el sexo de los pollos ( $P > 0.05$ ). En cuanto al nivel de proteína en la dieta, no se encontraron diferencias ( $P > 0.05$ ) entre tratamientos. Sin embargo, en el factor sexo existió

diferencia ( $P < 0.05$ ), mostrando mayor porcentaje de rendimiento en las hembras (24.6%) respecto a los machos (23.4%).

Para el rendimiento de pierna y muslo no se encontró efecto de interacción entre el factor sexo y el factor nivel de proteína ( $P > 0.05$ ). Para el porcentaje de proteína no se observó efecto ( $P > 0.05$ ) entre tratamientos (21.3, 21.6 y 21.0% respectivamente). Sin embargo, para el factor sexo hubo diferencia ( $P < 0.05$ ) donde los machos mostraron tuvieron mayor porcentaje de rendimiento (21.5a) respecto a las hembras (20.7b).

### **Pigmentación de la piel (b)**

Los resultados de la pigmentación de la piel en las semanas 5, 6 y 7 se pueden apreciar en la [Cuadro 11](#), donde se ver que el efecto de interacción entre el nivel de proteína y el factor sexo, así como al nivel de PC en la dieta, no existió efecto sobre la pigmentación de la piel ( $P > 0.05$ ). Sin embargo, el sexo influyó en el nivel de amarillamiento de la piel ( $P < 0.05$ ); donde las hembras tuvieron mejores valores de pigmentación (16.36 y 19.01) en las semanas 6 y 7 respectivamente, mientras que los machos tuvieron menores valores de pigmentación (14.49 y 17.02).

Los resultados de amarillamiento de la piel en canal fría, se muestran en la [Cuadro 12](#), donde se aprecia que no existió efecto de la interacción (sexo y nivel de PC) ( $P > 0.05$ ). Para el nivel de PC, la pigmentación amarilla de la piel en canal fría fueron similares entre tratamientos.

En cuanto al factor sexo no existió diferencia ( $P > 0.05$ ) entre el macho y la hembra sobre la pigmentación amarilla de la piel en canal fría.

## DISCUSIÓN

En la presente investigación no se encontraron diferencias estadísticas para los niveles de proteína utilizados en la dieta durante las 4 fases de alimentación en ganancia de peso, consumo de alimento, conversión alimenticia y porcentaje de mortalidad en 49 días de experimentación. La información obtenida concuerda en parte con lo obtenido por De Cesare et al. (2019) quienes no hallaron efecto en ganancia diaria de peso, consumo diario de alimento, conversión alimenticia y mortalidad en pollos de engorda Ross 308 alimentados con una dieta basal comparándola con la reducción del 7% del total de proteína cruda en diferentes fases de alimentación suplementadas con 3 aminoácidos sintéticos (DL-Metionina, sulfato de L-Lisina y L-Treonina). Estos autores concluyeron que los pollos alimentados con dietas bajas en proteína no tienen que ajustar su consumo de alimento para compensar la baja cantidad de proteína en el alimento.

Otras investigaciones como la de Hilliar et al. (2019) evaluaron en pollos machos Ross 308 de 10 a 35 días de edad el efecto de 3 niveles de proteína cruda para las fases de crecimiento (20%, 18.5% y 17%) y finalización (18%, 16.5% y 15%) suplementadas con aminoácidos cristalinos (acorde a la limitación de AA): D-L metionina, L-lisina SO<sub>4</sub>, L-treonina, L-valina, L-arginina, L-isoleucina, L-fenilalanina L-leucina, L-histidina y L-triptófano, encontrando un efecto similar en todos los tratamientos para la ganancia de peso, la conversión alimenticia, la ganancia de peso final en los pollos y el porcentaje de viabilidad ( $P > 0.05$ ) excepto en el consumo de alimento en donde la dieta con menor cantidad de proteína mostró una menor ingesta de alimento ( $P < 0.05$ ). Sin embargo, Awad et al. (2018) alimentaron hembras de la estirpe Cobb 500 del día 1 al 42, con dietas que contenían dos niveles de proteína: normal (inicio 222g/kg y crecimiento 195g/kg) y baja en proteína (inicio 173g/kg y crecimiento 147 g/kg) adicionada con AA sintéticos (L-Leu, L-Arg, L-Ile, L-Phe, L-His y Gly). A pesar de las diferencias en proteína; estos autores no encontraron diferencias al disminuir la cantidad de proteína en la mayoría de los parámetros productivos, ya que al suministrar las cantidades ideales de AA se obtuvo la misma ganancia de peso y conversión alimenticia que las aves alimentadas con proteína estándar (Hilliar et al., 2019)

Barekattain et al. (2019) concuerdan en que no existe una diferencia en cuanto al consumo de alimento entre dietas bajas en proteína suplementadas con AEE (170g/kg) y dietas con un nivel estándar de proteína (220g/kg), pero las dietas bajas en proteína mostraron una alta conversión alimenticia con respecto a una dieta balanceada, mientras tanto Harn et al., (2019) señalaron que pollos de engorde en crecimiento con dietas reducidas de 2.2–2.3% de PC (22–23 g/kg), con una suplementación adecuada de aminoácidos (lisina, metionina, treonina, arginina, isoleucina, valina y glicina), no produjeron efectos adversos en el crecimiento de los pollos.

Macellini et al. (2019) reportaron que dietas bajas en proteína cruda tienen una ganancia promedio de peso y una conversión alimenticia con valores similares a pollos alimentados con dietas altas en proteína cruda.

Otras fuentes bibliográficas difieren con la presente investigación al reportar diferencias estadísticas al disminuir la cantidad de proteína cruda en la dieta, aun suplementándolas con aminoácidos esenciales respecto a una dieta basal, tal es el caso de Hilliar et al. (2019) concluyeron que las dietas reducidas en 3 puntos porcentuales de PC suplementada con 6 AA esenciales (HCL-Lisina, D,L Metionina, L-treonina, L-isoleucina, L-arginina y L-valina) durante la fase de crecimiento, causaron un mayor consumo de alimento y un incremento en la conversión alimenticia frente a una dieta estándar en proteína (suplementada solo con HCL-Lisina, D,L Metionina y L-treonina) también observaron diferencias para la fase de finalización donde las dietas reducidas en proteína, tuvieron un mayor índice de conversión alimenticia. En cuanto al porcentaje de mortalidad y la ganancia de peso no se encontraron diferencias significativas entre las dietas. La disminución en el rendimiento de los pollos de engorda con dietas bajas en proteína generalmente se debe a una disponibilidad reducida de aminoácidos, a pesar de la suplementación de AAE en la dieta (Hilliar et al., 2019).

Cowieson et al. (2016), encontraron que machos alimentados con una dieta baja en proteína cruda y aminoácidos digestible en 4% afectaron la ganancia de peso e incrementó el consumo de alimento y la conversión alimenticia comparada a una dieta estándar o balanceada en proteína y aminoácidos, y que estos resultados están relacionados a una baja administración de AA esenciales en la dieta para pollos de rápido crecimiento.

Hilliar y Swich (2019) en un trabajo de revisión bibliográfica concluyen que en la mayoría de los estudios los parámetros productivos de los pollos muestran diferencia cuando consumen dietas bajas en proteína comparadas con dietas balanceadas tales como la ganancia de peso corporal y la conversión alimenticia, con discrepancias en el consumo de alimento (sin cambios o con disminución del consumo) (Hilliar y Swich, 2019). Liu et al. (2017) observaron que el 76% de la variación en los resultados asociados a la conversión alimenticia se asocia a las tasas de digestión de almidón y proteínas.

El bajo rendimiento en los parámetros productivos en pollos tratados con dietas reducidas en proteína cruda aún suplementadas con AA cristalinos, se debe a la reducción de otros nutrientes que se encuentran presentes en los alimentos (sobre todo en las harinas proteicas) como AA no esenciales, compuestos de N no proteico, equilibrio de electrolitos, disponibilidad de minerales, fibra y carbohidratos, donantes de grupos metilo y polifenoles (Jariyahatthakij et al., 2018; Hilliar y Swich, 2019) también las interacciones antagonistas de los AA pueden afectar el crecimiento de los pollos, algunos autores indican que un exceso de lisina en la dieta, puede disminuir la absorción de arginina causando un crecimiento deficiente y que un desbalance en las concentraciones de leucina en la dieta, pueden reducir las concentraciones musculares de isoleucina y valina, afectando también el crecimiento (Hilliar y Swich, 2019)

Varios investigadores sugieren que es mejor reducir la cantidad de proteína solamente en las dietas de desarrollo y finalización, debido a que a mayor edad de los pollos disminuyen su requerimiento de AA (Hilliar y Swich, 2019). Por otro lado, Cristal et al. (2019) explicaron que la biodigestibilidad de aminoácidos y de glucosa se realiza de forma bilateral, lo que puede impactar en el rendimiento productivo de los pollos de engorda.

### **Rendimiento en canal**

En esta investigación no se encontró efecto de interacción entre el nivel de proteína cruda y el sexo para el peso en vivo, peso de la canal, rendimiento de la canal, de la pechuga o el rendimiento de la pierna y muslo. Estos resultados fueron similares a los mencionados por Tossaporn et al. (2010) estos autores encontraron que el rendimiento de pechuga, así como de pierna y muslo se comportaron de manera similar tanto en dietas balanceadas en proteína

como en dietas bajas en proteína cruda cuando se suplementan con AA sintéticos acorde al requerimiento del pollo.

Harn et al. (2019), encontraron resultados similares a los del presente estudio sin encontrar efecto al disminuir la proteína cruda en la dieta (-1, -2 y -3%) suplementadas con AA sobre el peso vivo, peso de la canal o el rendimiento corporal de los pollos. Sin embargo, en el estudio al reducir 3% de PC se obtuvo un menor rendimiento de pechuga y rendimiento en pierna con muslo comparado a una dieta estándar en proteína.

Mandilindi et al. (2018) encontraron al igual que en el presente estudio, que el peso vivo y el rendimiento de pierna fue significativamente más alto en machos que en hembras, sin embargo; difieren sobre el rendimiento de la canal, en el cual las hembras tuvieron un mejor rendimiento de la pechuga respecto a los machos, pero en muslo no hallaron diferencias debido al sexo. De igual manera Atta et al. (2017) no obtuvieron efecto significativo al factor sexo para rendimiento de la pechuga y pierna con muslo.

Por otro lado, Goo et al. (2019) concuerdan en que el rendimiento de pechuga en las hembras mostró mejores resultados respecto a los machos como lo que se obtuvo en la presente investigación.

Scheuermann et al. (2003) mencionan que las diferencias causadas por el sexo sobre el rendimiento del musculo de la pechuga en pollos pueden deberse a variaciones relacionadas entre el número y el tamaño de las células musculares. Además, informan que los machos alcanzan pesos más altos, pero con tasas de crecimiento a edades más avanzadas respecto a las hembras. Para el peso corporal y el peso de la pechuga (que pudiera estar predeterminado durante el desarrollo embrionario cuando se establecen el número de miofibras), las tasas de crecimiento más rápidas en hembras para el peso de la pechuga respecto al peso corporal, se apoya en la hipótesis de que altos niveles de aminoácidos en la dieta que al no contribuir sobre el peso corporal, continúan aumentando la deposición en el musculo de la pechuga.

Moran y Bilgili (1990) encontraron que las hembras requieren una menor cantidad de lisina que los machos, mostrando una mejor eficiencia sobre el crecimiento y la conversión

alimenticia, causando un cambio sobre la deposición muscular y de la grasa, aunado a esto Han y Baker (1994) describieron que los machos tienen mayores requerimientos de aminoácidos en la dieta debido a una tasa de crecimiento más rápida en comparación a las hembras con un mayor peso de pechuga debido a una mayor ingesta de aminoácidos sin implicar un mayor porcentaje de rendimiento de la pechuga

Chrystal et al. (2020) indican que la variabilidad en los resultados del rendimiento productivo se debe a diferentes factores como diferencias en las líneas genéticas de las aves, edad del ave y a la concentración de nutrientes utilizados en la formulación de las dietas. Además de otras variables como la dinámica digestiva en el cual la velocidad de digestión de proteínas y la tasa de absorción de péptidos, tripéptidos y aminoácidos libres son distintas en dietas reducidas en proteína comparadas a una dieta convencional.

En este estudio los porcentajes de grasa en la cavidad celómica fueron significativamente más alto en los pollos tratados con dietas bajas en proteína cruda, lo que concuerda con Aletor et al. (2000) y una revisión bibliográfica realizada por Harn et al. (2006) quienes encontraron que en todos los casos donde se disminuyó la proteína cruda se incrementó la cantidad de grasa corporal. Por otro lado, Jariyahatthakij et al. (2018), indican que al reducir la cantidad de proteína cruda en las dietas se incrementa la cantidad de grasa en los tejidos. Chrystal et al. (2020) mencionan en su investigación que una reducción de proteína cruda de 40 a 50g/kg compromete el rendimiento de pollos de engorda y aumenta la deposición de lípidos. Namroud et al. (2008) observaron que el aumento de grasa y el bajo rendimiento corporal en pollos alimentados con dietas reducidas en PC puede evitarse con la suplementación óptima de AEE y ANEE. Por otra parte, Hilliar y Swich, (2019) explicaron que los pollos que reciben dietas reducidas en PC suplementadas con AA sintéticos presentan un mayor depósito de grasa en los tejidos, debido a una alta biodisponibilidad de AA que ingresan desde el yeyuno a la vena porta; además también se genera un aumento en la absorción de almidón ya que existe una interacción entre la absorción de proteínas y almidón, promoviendo de manera potencial la lipogénesis.

En cuanto a la cantidad de grasa en la cavidad celómica asociada al sexo, las hembras depositaron más grasa que los machos en este estudio, lo que concuerda en parte con Atta et al., en 2017 quienes obtuvieron resultados similares en pollos Cobb 500 durante 6 semanas de experimentación con mayor porcentaje de grasa en hembras respecto a los machos.

En la presente investigación se encontró que las hembras tuvieron mayores valores de pigmentación de la piel en canal fría respecto a los machos, estos resultados coinciden con lo informado por Chodová et al. (2021) quienes observaron que el amarillamiento de la piel puede deberse a que las hembras tienen una mayor deposición de grasa en el tejido subcutáneo respecto a los machos, tanto en aves de rápido crecimiento como en aves de mediano y lento crecimiento.

Se sugiere realizar más estudios para evaluar el costo beneficio al disminuir la PC en las dietas, así como el impacto ambiental y la integridad intestinal. Por lo que se recomienda medir la excreción de N en la dieta y excretas, medir la longitud intestinal y realizar estudios del microbioma intestinal, así como el análisis de muestras sanguíneas (glucosa plasmática, proteína total, albúmina, globulina y niveles de nitrógeno ureico) y poder medir su repercusión en la contaminación del medio ambiente por nitrógeno.

## CONCLUSIONES

De acuerdo a las condiciones experimentales de esta investigación se puede concluir:

La disminución de 1 y 2% de PC en las 4 fases de alimentación con dietas maíz-soya con cantidades similares de los aminoácidos más limitantes (Metionina, Lisina, Treonina, Valina, Arginina y Triptófano) en pollos de engorda Ross 308 durante 7 semanas, no afectó el rendimiento productivo y el porcentaje de rendimiento de la canal.

La disminución de 1 y 2% de PC en las 4 fases de alimentación incrementó el porcentaje de grasa en la cavidad celómica.

El rendimiento productivo, rendimiento de la canal fue mayor en los machos respecto a las hembras. Se obtuvo un mejor rendimiento de pechuga y mayor cantidad de grasa celómica en las hembras en comparación con los machos.

Finalmente, los niveles de proteína utilizados en las dietas no afectaron la coloración de la piel, únicamente se vio influenciada por el sexo, donde las hembras tuvieron un mayor grado de amarillamiento de la piel.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adedokun, S. A., y Applegate, T. J. (2014). Dietary electrolyte balance influences ileal endogenous amino acid losses in broiler chickens. *Poultry Science*. 93(4):935-42. doi:10.3382/ps.2013-03661.
- Aftab, U., y Ashraf, M. (2009). Methionine+cystine requirement of broiler chickens fed low-density diets under tropical conditions. *Trop Anim Health Prod*. 49(3):363-369. doi: 10.1007/s11250-008-9197-3.
- Aftab, U., Ashraf, M., y Jiang, Z. (2006). Low protein diets for broilers. *World's Poultry Science*. 62(4):688-701. <https://doi.org/10.1017/S0043933906001218>.
- Agostini, P. S., Santos, R. R., Khan, D. R., Siebert, D., y van der Aar, P. (2019). The optimum valine: lysine ratios on performance and carcass traits of male broilers based on different regression approaches. *Poultry Science*, 98 (3), pp 1310-1320. <https://doi.org/10.3382/ps/pey454>.
- Ahmad, I., Qaisrani, S. N., Azam, F., Pasha, T. N., Bibi, F., Naveed, S., y Murtaza, S. (2020). Interactive effects of threonine levels and protein source on growth performance and carcass traits, gut morphology, ileal digestibility of protein and amino acids, and immunity in broilers. *Poultry Science*. 99:280-89. doi: 10.3382/ps/pez488.
- Aletor, V. A., Hamid, I., Nieß, E., y Pfeffer, E. (2000). Low-protein amino acid-supplemented diets in broiler chickens: effects on performance, carcass characteristics, whole-body composition and efficiencies of nutrient utilisation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 80(5):547-554. doi: 10.1002/(SICI)1097-0010(200004)80:5<547::AID-JSFA531>3.0.CO;2-C.
- Araiza, G. M. (2013). *Aminoácidos limitantes en dietas sorgo-pasta de soya con 13% de proteína cruda para gallinas de postura ISA Brown (tesis licenciatura)*. D. F., México: FMVZ-UNAM.

- Avila Chavez, E., Torres y Torres, N., y Tovar Palacio, A. (1997). Transporte de aminoácidos zwitterionicos en células de mamíferos. *Revista de Investigación Clínica*. 49(4):323-338.
- Avila Chavez, E., Torres y Torres, N., y Tovar Palacio, A. R. (1997). Nuevos conocimientos del transporte de aminoácidos aniónicos y catiónicos. *Revista de Investigación Clínica*. 49(5):411-424.
- Awad, E. A., Idrus, Z., Soleimani, A. F., Bello, A. U., y Jahromi, M. F. (2018). Growth performance, duodenal morphology and the caecal microbial population in female broiler chickens feed glycine-fortified low protein diets under heat stress conditions. *British Poultry Science*. 59(3): 340-348. <https://doi.org/10.1080/00071668.2018.1440377>.
- Awad, E. A., Zulkifli, I., Soleimani, A. F., Law, F. L., Ramiah, S. K., Mohamed-Yosif, I. M., Hussein E.A., y Khalil, E. S. (2019). Response of broilers to reduced-protein diets under heat stress conditions. *World's Poultry Science Journal*. 75(19): 483-598. <https://doi.org/10.1017/S0043933919000576>.
- Awad, E. A., Zulkifli, I., Soleimani, A. F., y Chwen, T. L. (2014). Amino Acids Fortification of Low-protein Diet for Broilers Under Tropical Climate. 2. Nonessential Amino Acids and Increasing Essential Amino Acids. *Italian Journal of Animal Science*. 13(3). <https://doi.org/10.4081/ijas.2014.3297>.
- Azzam, M. M., Zou, X. T., Dong, X. Y., y Xie, P. (2011). Effect of supplemental L-threonine on mucin 2 gene expression and intestine mucosal immune and digestive enzymes activities of laying hens in environments with high temperature and humidity. *Poultry Science*. 90(10):2251–2256. <https://doi.org/10.3382/ps.2011-01574>.
- Barekatin, R., Nattrass, G., Tilbrook, A. J., Chousalkar, K., y Gilani, S. (2019). Reduced protein diet and amino acid concentration after intestinal barrier function and performance of broiler chickens with of without synthetic glucocorticoid. *Poultry Science*. 98(9):3662-3675. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pey563>.

- Barrera, S. M. (2010). *Genes relacionados con la síntesis de proteína en cerdos (Tesis doctorado)*. Mexicali.: Universidad Autónoma de Baja California. Instituto de Ciencias Agrícolas.
- Bezerra, R. M., Costa, F. G. P., Givisiez, P. E. N., Freitas, E. R., Goulart, C. C., Santos, R. A., Souza, J. G., Brandao, P. A., Lima, M. R., Melo, M. L., Rodríguez, V. P., Nogueira, E. T., y Vieira, D. V. G. (2015). Effect of l-glutamic acid supplementation on performance and nitrogen balance of broilers fed low protein diets. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 100(3):590-600. <https://doi.org/10.1111/jpn.12405>.
- Bortoluzzi, C., Rochell, S. J., y Applegate, T. J. (2018). Threonine, arginine, and glutamine: Influences on intestinal physiology, immunology, and microbiology in broilers. *Poultry Science*. 97(3): 937-945. <https://doi.org/10.3382/ps/pex394>.
- Bregendahl, K., Sell, J. L., y Zimmerman, D. R. (2002). Effect of low-protein diets on growth performance and body composition of broiler chicks. *Poultry Science*, 81(8):1156–1167 <https://doi.org/10.1093/ps/81.8.1156>.
- Buenabad, C. L., Castillo, L. G., Arce, V. N., Cota, M. M., Araiza, P. B. A., Morales, T. A., y Cervantes, R. M. Dietas bajas en protehina adicionadas con aminoácidos libres: Comportamiento y expresión de transportadores de aminoácidos en cerdos. *Tropical and subtropical agroecosystems*. 17(2):271-275.
- Castro, F. S., Choi, H., Kim, W. K., Su, S., y Koo, E. (2019). L-Arginine supplementation enhances growth performance, lean muscle, and bone density but not fat in broiler chickens. *Poultry Science*. 98(4):1716-1722. <https://doi.org/10.3382/ps/pey504> .
- Chiba, L. (2009). *Animal Nutrition Handbook. Second Revision*.
- Chrystal, P. V., Moss, A. F., Khoddami, A., Naranjo, V. D., Selle, P. H., y Liu, S. Y. (2020). Effects of reduced crude protein levels, dietary electrolyte balance, and energy density on the performance of broiler chickens offered maize-based diets

with evaluations of starch, protein, and amino acid metabolism. *Poultry Science*. 99(3):1421-1431. doi: 10.1016/j.psj.2019.10.060.

Chrystal, P. V., Moss, A. F., Yin, D., Khoddami, A., Naranjo, V. D., Sellea, P. H., y Liu, S. Y. (2020). Glycine equivalent and threonine inclusions in reduced-crude protein, maize-based diets impact on growth performance, fat deposition, starch-protein digestive dynamics and amino acid metabolism in broiler chickens. *Animal Feed Science and Technology*. 261:1-14. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2019.114387.

Conde-Aguilera, J. A., Cholet, J. G., Lessire, M., Mercier, Y., Tesseraud, S., y van Milgen, J. (2016). The level and source of free-methionine affect body composition and breast muscle traits in growing broilers. *Poultry Science*, 95 (10), pp. 2322–2331. <https://doi.org/10.3382/ps/pew105>.

Corzo, A., Loar, I. R., Kidd, M. T., y Burgess, S. C. (2011). Dietary protein effects on growth performance, carcass traits and expression of selected jejunal peptide and amino acid transporters in broiler chickens. *Revista Brasileira de Ciência Avícola*. 13(2):139-146. doi: 10.1590/S1516-635X2011000200008.

Corzo, A., Fritts, C. A., Kidd, M. T., y Kerr, B. J. (2005). Response of broiler chicks to essential and non-essential amino acid supplementation of low crude protein diets. *Animal Feed Science and Technology*. 118(3-4):319-327. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2004.11.007.

Corzo, A., Moran, J. E., Hoehler, D., y Lemmell, A. (2005). Dietary Tryptophan Need of Broiler Males from Forty-Two to Fifty-Six Days of Age. *Poultry Science*. 84(2):226–231. doi: 10.1093/ps/84.2.226.

Cowieson, A. J., Zaefarian, F., Knap, I., y Ravindran, V. (2016). Interactive effects of dietary protein concentration, a mono-component exogenous protease and ascorbic acid on broiler performance, nutritional status and gut health. *Animal Production Science*. 57(6):1058-1068. <http://dx.doi.org/10.1071/AN15740>.

- Cuca, G. M., Ávila, G. E., y Pro, M. A. (2016). *Alimentación de las aves. 1a reimpresión*. Texcoco (México): Universidad Autónoma de Chapingo. Dirección de Patronato Universitario. Departamento de Zootecnia.
- D'Amato, J. L., y Humphrey, B. D. (2010). Dietary arginine levels alter markers of arginine utilization in peripheral blood mononuclear cells and thymocytes in young broiler chicks. *Poultry Science*, 89 (5), 938-947. <https://doi.org/10.3382/ps.2009-00611>.
- D'Mello, J. F. (2000). *Farm animal metabolism and nutrition*. United Kingdom: CABI Publishing.
- Daniel, H., Spanier, B., Kottra, G., y Weitz, D. (2006). From bacteria to man: archaic proton-dependent peptide transporters at work. *Int. Union Physiol. Sci/Am. pshysiol.soc.* 21(2):93-102. <https://doi.org/10.1152/physiol.00054.2005>.
- Dao, H. T., Sharma, N. K., Bradbury, E. J., y Swick, R. A. (2020). Response of meat chickens to different sources of arginine in low-protein diets. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 18(414):1-16. [doi.org/10.1111/jpn.13486](https://doi.org/10.1111/jpn.13486).
- De Cesare, A., Faria, V. I., Sala, C., Sirri, F., Astolfi, A., Castellani, G., y Manfreda, G. (2019). Effect of a low protein diet on chicken ceca microbioma and productive performances. *Poultry Science*. 98:3963-3976. [doi: 10.3382/ps/pez132](https://doi.org/10.3382/ps/pez132).
- DeGroot, A. A., Braun, U., y Dilger, R. N. (2019). Guanidinoacetic acid is efficacious in improving growth performance and muscle energy homeostasis in broiler chicks fed arginine-deficient or arginine-adequate diets. *Poultry Science*, 98(7):2896-2905. <https://doi.org/10.3382/ps/pez036>.
- Emmert, J. L., Douglas, M. W., Boling, D. S., Parson, C. M., y Baker, D. H. (1999). Bioavailability of Lysine from a Liquid Lysine Source in Chicks. *Poultry Science*, 78(3), pp 383-386. <https://doi.org/10.1093/ps/78.3.383>.
- Fagundes, N. S., Milfort, M. C., Williams, S. M., Da Costa, M. J., Fuller, A. L., Menten, J. F., Reyaca, R., y Aggrey, S. E. (2020). Dietary methionine level alters growth,

- digestibility, and gene expression of amino acid transporters in meat-type chickens. *Poultry Science*. 99:67-75. doi: 10.3382/ps/pez588.
- Faria Filho, D. I., Rosa, P. I., Vieira, B. S., Macari, M., y Furlan, R. L. (2005). Protein levels and environmental temperature effects on carcass characteristics, performance, and nitrogen excretion of broiler chickens from 7 to 21 days of age. *Revista Brasileira de Ciência Avícola*. 7(4):247-253. doi: 10.1590/S1516-635X2005000400009.
- Farran, M. T., Barbour, E. K., y Ashkarian, V. M. (2003). Effect of excess leucine in low protein diet on ketosis in 3-week-old male broiler chicks fed different levels of isoleucine and valine. *Animal Feed Science and Technology*. 103(1-4):171-176. doi: 10.1016/S0377-8401(02)00289-4.
- Furlan, R. L., Faria Filho, D. E., de Rosa, P. S., y Macari, M. (2004). Does Low-Protein Diet Improve Broiler Performance under Heat Stress Conditions?. *Revista Brasileira de Ciência Avícola*. 6(2):71-79. doi: 10.1590/S1516-635X2004000200001.
- García, R. A. (2012). *Rendimiento productivo y de la canal en dos estirpes de pollo de engorda alimentados con dietas sorgo-soya con diferentes porcentajes de proteína. [tesis de licenciatura]*. DF, (MX): Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Gassol, E. E. (2004). *Transportador de Aminoácidos Heteromérico XCT. Identificación, caracterización funcional y topología.(tesis doctorado)*. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Gholami, M., Chamani, M., Seidavi, A., y Asghar, A. (2020). Effects of stocking density and climate region on performance, immunity, carcass characteristics, blood constituents, and economical parameters of broiler chickens. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 49:1-16. doi: 10.37496/rbz4920190049.

- Goo, D., Kim, J. H., Choi, H. S., Park, G. H., Han, G. P., y Kil, D. Y. (2019). Effect of stocking density and sex on growth performance, meat quality, and intestinal barrier function in broiler chickens. *Poultry Science*. 98(3):1153-1160. doi: 10.3382/ps/pey491.
- Hale, L. L., Pharr, G. T., Burgess, S. C., Corzo, A., y Kidd, M. T. (2004). Isoleucine needs of thirty- to forty-day-old female chickens: immunity. *Poultry Science*. 83(12):1979-1985. <https://doi.org/10.1093/ps/83.12.1979>.
- Han, Y., y Baker, D. H. (1994). Digestible Lysine Requirement of Male and Female Broiler Chicks During the Period Three to Six Weeks Posthatching<sup>1</sup>. *Poultry Science*, 73(11): 1739-1745. <https://doi.org/10.3382/ps.0731739>.
- Harms, R. H., y Russell, G. B. (2000). Evaluation of the Isoleucine Requirement of the Commercial Layer. *Poultry Science*. 79(8):1154–1157. <https://doi.org/10.1093/ps/79.8.1154>.
- Hernández, F., López, M., Martínez, S., Megías, M. D., Catalá, P. J., y Madrid, J. (2012). Effect of low-protein diets and single sex on production performance, plasma metabolites, digestibility, and nitrogen excretion in 1- to 48-day-old broilers. *Poultry Science*. 91(3):683-692. <https://doi.org/10.3382/ps.2011-01735>.
- Hernández, V. (2018). *Absorción y depósito de xantofilas en pollos de engorda desafiados con tres niveles de ooquistes de Eimeria acervulina*. Obtenido de Avicultura.mx: <https://www.avicultura.mx/destacado/Absorci%C3%B3n-y-dep%C3%B3sito-de-xantofilas-en-pollos-de-engorda-desafiados-con-tres-diferentes-niveles-de-ooquistes-de-Eimeria-acervulina>
- Hilliar, M., y Swick, R. A. (2019). Nutritional implications of feeding reduced-protein diets to meat chickens. *Animal Production Science*. 59:2069-2081. <https://doi.org/10.1071/AN19221>.
- Hilliar, M., Keerqin, C., Girish, C. K., Barekatin, R., Wu, S. B., y Swick, R. A. (2019). Reducing protein and supplementing crystalline amino acids, to alter dietary amino

- acid profiles in birds challenged for subclinical necrotic enteritis. *Poultry Science*. 99(4):2048-2060. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.11.042>.
- Hilliar, M., Hargreave, G., Girish, C. K., Barekatin, R., Wu, S. B., y Swick, R. A. (2019). Using crystalline amino acids to supplement broiler chicken requirements in reduced protein diets. *Poultry Science*: 99(3):1551-1563. doi: 10.1016/j.psj.2019.12.005.
- Hilliar, M., Huyen, N., Girish, C. K., Barekatin, R., Wu, S., y Swick, R. A. (2019). Supplementing glycine, serine, and threonine in low protein diets for meat type chickens. *Poultry Science*. 98: 6857-6865. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pez435>.
- Hosseintabar, B., Dadashbeiki, M., Bouyeh, M., Seidavi, Q., van den Hoven, R., y Gamboa, S. (2015). Effect of different levels of L-carnitine and lysine-methionine on broiler blood parameters. *Revista MVZ Cordoba*. 20(3):4698-4708. doi: 10.21897/rmvz.40.
- Hussain, M., Mahmud, A., Hussain, J., Qaisrani, S. N., Mehmood, S., y Rehman, A. (2018). Subsequent Effect of Dietary Lysine Regimens Fed in the Starter Phase on the Growth Performance, Carcass Traits and Meat Chemical Composition of Aseel Chicken in the Grower Phase. *Revista Brasileira de Ciência Avícola*. 20(3):455-462. doi: 10.1590/1806-9061-2017-0681.
- Hyde. R., Taylor, P. M., y Hundal, H. S. (2003). Amino acid transporters: roles in amino acid sensing and signalling in animal cells. *Biochemical Journal*, 373(1):1-18. <https://doi: 10.1042/bj20030405>
- Jariyahatthakij, P., Chomtee, B., Poeikhampha, T., Loongyai, W., y Bunchasak, C. (2018). Effects of adding methionine in low-protein diet and subsequently fed low-energy diet on productive performance, blood chemical profile, and lipid metabolism-related gene expression of broiler chickens. *Poultry Science*, 97 (6), pp. 2021–2033. <https://doi.org/10.3382/ps/pey034>.

- Jariyahatthakij, P., Chomtee, B., Poeikhampha, T., Loongyai, W., y Bunchasak, C. (2018). Methionine supplementation of low-protein diet and subsequent feeding of low-energy diet on the performance and blood chemical profile of broiler chickens. *Animal Production Science*. 58(5):878-885. <http://dx.doi.org/10.1071/AN16258>.
- Jiang, S., El-Senousey, H. K., Fan, Q., Lin, X., Gou, Z., Li, L., Wang, Y., Mohamed, A. F., y Jiang, Z. (2019). Effects of dietary threonine supplementation on productivity and expression of genes related to protein deposition and amino acid transportation in breeder hens of yellow-feathered chicken and their offspring. *Poultry Science*. 98(12):6826-6836. <https://doi.org/10.3382/ps/pez420>.
- Jiao, Y., Park, J. H., Kim, Y. M., y Kim, I. H. Effects of dietary methyl sulfonyl methane (MSM) supplementation on growth performance, nutrient digestibility, meat quality, excreta microbiota, excreta gas emission, and blood profiles in broilers. *Poultry Science [internet] 2017 [citado]; 96(7):2168-2175. Disponible en <https://doi.org/10.3382/ps/pew480>*.
- Jr. Moran, E. T., y Bilgili, S. F. (1990). Processing Losses, Carcass Quality, and Meat Yields of Broiler Chickens Receiving Diets Marginally Deficient to Adequate in Lysine Prior to Marketing<sup>1</sup>. *Poultry Science*.69(4):702-710, <https://doi.org/10.3382/ps.0690702>.
- Kamran, Z., Sarwar, M., Nisa, M., Nadeem, M. A., Ahmad, S., Nawaz, H., Koutoulis, K., Sohail, M. U., Iqbal, Z., y Shahzad, M. I. (2016). Nutrients retention, nitrogen excretion, litter composition, and plasma biochemical profile in broilers fed low crude protein diets with constant metabolizable energy to crude protein ratio. *Archiva Zootechnica*. 19(2): 77-89.
- Khajali F, W. R., Khajali, F., y Wideman, R. F. (2010). Dietary arginine: metabolic, environmental, immunological and physiological interrelationships. *World's Poultry Science Journal*. 66(4):751-766. <https://doi.org/10.1017/S0043933910000711>.
- Khattak, F., y Helmbrecht, A. (2019). Effect of different levels of tryptophan on productive performance, egg quality, blood biochemistry, and caecal microbiota of hens housed

in enriched colony cages under commercial stocking density. *Poultry Science*, 98(5), pp. 2094–2104. <https://doi.org/10.3382/ps/pey562>.

Khatun, J., Loh, T. C., Akit, H., Foo, H. L., Mohamad, R., y Kareem, K. H. (2019). Dietary supplementation with L-arginine and combinations of different oil sources beneficially regulates body fat deposition, lipogenic gene expression, growth performance and carcass yield in broiler chickens. *Animal Production Science*. 60(11) 1409-1417. <https://doi.org/10.1071/AN19205>.

Kiess, A. S., Maningi, M. K., Cleveland, B. M., Wilson, M. E., y Bleming, K. P. (2013). Effect of dietary lysine on hepatic lysine catabolism in broilers. *Poultry science*, 92 (10):2705-2712. <https://doi.org/10.3382/ps.2012-02805>.

Kobayashi, H., Nakashima, K., Ishida, A., Ashihara, A., y Katsumata, M. (2013). Effects of low protein diet and low protein diet supplemented with synthetic essential amino acids on meat quality of broiler chickens. *Animal Science Journal*. 84(6):489-495. doi: 10.1111/asj.12021.

Kriseldi, R., Tillman, P. B., Jiang, Z., y Dozier, W. A. (2018). Effects of feeding reduced crude protein diets on growth performance, nitrogen excretion, and plasma uric acid concentration of broiler chicks during the starter period. *Poultry Science*. 97(5):1614–1626. doi: 10.3382/ps/pex395.

Law FL, Z. I., Law, F. L., Zulkifli, I., Soleimani, A. F., Liang, J. B., y Awad, E. A. (2019). Effects of reduced-protein diets supplemented with protease in broiler chickens under high stocking density. *Animal Production Science*. 59:2212–2221. doi: 10.1071/AN18477.

Leinonen, I., Williams, A. G., y Kyriazakis, I. (2014). The effects of welfare-enhancing system changes on the environmental impacts of broiler and egg production. *Poultry Science*. 93(2):256-266. doi: 10.3382/ps.2013-03252.

Lesson, S., y Summers, J. D. (2008). *Commercial poultry nutrition. Tercera edicion*. Reino Unido: Nottingham University Press.

- Lopez, C. M. (2000). *Bioquímica y Biología Molecular. Objetivos del curso y manual de prácticas de laboratorio, primer año*. D.F.: Mc Graw Hill Interamericana Editores, S.A. C.V.
- Lu, L., Liao, X., y Luo, X. (2017). Nutritional strategies for reducing nitrogen, phosphorus and trace mineral excretions of livestock and poultry. *Journal of Integrative Agriculture*. 16(12):2815-2833. doi: 10.1016/S2095-3119(17)61701-5.
- Macelline, S. P., Wickramasuriya, S. S., Cho, H. M., Kim, E., Shin, T. K., Hong, J. S., Kim, J. C., Pluske, J. R., Choi, H. J., Hong, Y. G., y Heo, J. M. (2019). Broilers fed a low protein diet supplemented with synthetic amino acids maintained growth performance and retained intestinal integrity while reducing nitrogen excretion when raised under poor sanitary conditions. *Poultry Science*. 99(2):949-958. doi: 10.1016/j.psj.2019.10.035.
- Madilindi, M. A., Mokobane, A., Letwaba, P. B., Tshilate, T. S., Banga, C. B., Rambau, M. D., Bhebhe, E., y Benyil, K. (2018). Effects of sex and stocking density on the performance of broiler chickens in a sub-tropical environment. *South African Journal of Animal Science*. 48(3):459-468. doi: 10.4314/sajas.v48i3.6.
- Malheiros, R. D., Moraes, V. B., Collin, A., Janssens, G. J., Decuyper, E., y Buyse, J. (2003). Dietary macronutrients, endocrine functioning and intermediary metabolism in broiler chickens: Pair wise substitutions between protein, fat and carbohydrate. *Nutrition Research*. 23(4):567-578. doi: 10.1016/S0271-5317(03)00022-8.
- McDonald, P., Edwards, R. A., Greenhalgh, J. D., Morgan, C. A., Sinclair, L. A., y Wilkinson, R. G. (2013). *Animal Nutrition. Séptima edición*. Zaragoza: Acribia.
- Millecam, J., Khan, D. R., Dedeurwaerder, A., y Saremiy, B. (2020). Optimal methionine plus cystine requirements in diets supplemented with L-methionine in starter, grower, and finisher broilers. *Poultry Science*. doi: 10.1016/j.psj.2020.11.023.

- Montolla G., V. (2019). *Estrategias nutricionales para reducir e uso de antibioticos promotores de crecimiento para pollos sobre la respuesta productiva y salud intestinal [tesis maestria]*. Ciudad de México: FMVZ UNAM.
- Muller-Ester, W. (2008). *Fundamentos para Medicina y Ciencias de la Vida*. Barcelona: Reverte, S.A.
- Murray, R. K., Bender, D. A., Botham, K. M., Kennelly, P. J., Rodwell, V. W., y Well, P. A. (2013). *Harper Bioquímica ilustrada. 29a edición*. México: MCGrall-Hill Interamericana S. A. de C. V.
- Namroud, N. F., Shivazad, M., y Zaghari, M. (2010). Impact of dietary crude protein and amino acids status on performance and some excreta characteristics of broiler chicks during 10–28 days of age. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 94(3):280–286. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2008.00907.x>.
- Namroud, N. F., Shivazad, M., y Zaghari, M. (2008). Effects of Fortifying Low Crude Protein Diet with Crystalline Amino Acids on Performance, Blood Ammonia Level, and Excreta Characteristics of Broiler Chicks. *Poultry Science*. 87(11):2250–2258. doi: 10.3382/ps.2007-00499.
- Naranjo, V. (02 de 11 de 2016). *La importancia de los aminoácidos suplementarios y la tecnología NIRS en la nutrición de aves*. Obtenido de aviNews AMERICA LATINA: <https://avicultura.info/la-importancia-los-aminoacidos-suplementarios-la-tecnologia-nirs-la-nutricion-aves/>
- Nascimento, G. R., Murakami, A. E., Ospina-Rojas, I. C., Diaz-Vargas, M., y Picoli, K. P. (2016). Digestible Valine Requirements in Low-Protein Diets for Broilers Chicks. *Revista Brasileira de Ciência Avícola*. 18(3):381-386. doi: 10.1590/1806-9061-2015-0162.
- Nelson, D. L., y Cox, M. M. (2015). *Lehninger Principles of Biochemistry. Sexta edición*. New York: W. H. FREEDMAN AND COMPANY.

- Ospina-Rojas, I. C., Murakami, A. E., Duarte, C. A., Nascimento, G. R., Garcia, E. M., Sakamoto, M. I., y Nunes, R. V. (2017). Leucine and valine supplementation of low-protein diets for broiler chickens from 21 to 42 days of age. *Poultry Science*. 96(4):914-922. doi: 10.3382/ps/pew319.
- Ospina-Rojas, I. C., Murakami, A. E., Eyng, C., Nunes, R. V., Duarte, C. A., y Vargas, M. D. (2012). Commercially available amino acid supplementation of low-protein diets for broiler chickens with different ratios of digestible glycine+serine:lysine. *Poultry Science*. 91(12):3148-3155. doi: 10.3382/ps.2012-02470.
- Ospina-Rojas, I. C., Urakami, A. E., Oliveira, C. A., y Guerra, A. F. (2013). Supplemental glycine and threonine effects on performance, intestinal mucosa development, and nutrient utilization of growing broiler chickens. *Poultry Science*, 92(10), p. 2724–2731. <https://doi.org/10.3382/ps.2013-03171>.
- Park, B. C., y Austic, R. E. (2000). Isoleucine imbalance using selected mixtures of imbalancing amino acids in diets of the broiler chick. *Poultry Science*. 79(12) 1782-1789. <https://doi.org/10.1093/ps/79.12.1782>.
- Park, J. H., y Kim, I. H. (2019). The effects of betaine supplementation in diets containing different levels of crude protein and methionine on the growth performance, blood components, total tract nutrient digestibility, excreta noxious gas emission, and meat quality of the broiler. *chickens. Poultry Science*. 98:6808-6815. doi: 10.3382/ps/pez412.
- Pestour, S., Couchet, M., Breuillard, C., Corne, C., Mathieu, N., Lamarche, F., Fontaine, E., Coëffier, M., y Moinard, C. (2020). An in vitro explant model for studies of intestinal amino acid metabolism. *Clinical Nutrition Experimental*. 29:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.yclnex.2019.12.002>.
- Plumstead, P. W., Romero-Sanchez, H., Paton, N. D., Spears, J. W., y Brake, J. (2007). Effects of Dietary Metabolizable Energy and Protein on Early Growth Responses of Broilers to Dietary Lysine. *Poultry Science*. 86(12):2639-2648. doi: 10.3382/ps.2007-00168.

- Pope, T., Loupe, L. N., Pillai, P. B., y Emmert, J. L. (2004). Growth Performance and Nitrogen Excretion of Broilers Using a Phase-Feeding Approach from Twenty-One to Sixty-Three Days of Age. *Poultry Science*. 83(4):676-682. doi: 10.1093/ps/83.4.676.
- Powers, W., y Angel, R. (2008). A Review of the Capacity for Nutritional Strategies to Address Environmental Challenges in Poultry Production. *Poultry Science*. 87(10):1929-1938. doi: 10.3382/ps.2008-00090.
- Rama Raoa, S. V., Rajua, M. L., Pandaa, A. K., Poonama, N. S., Moorthya, O. K., Srilatha, T., y Shyam Sundera, G. (2011). Performance, carcass variables and immune responses in commercial broiler chicks fed graded concentrations of threonine in diet containing sub-optimal levels of protein. *Animal Feed Science and Technology*. 169(3-4):218-223. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2011.06.013.
- Ravindran, V. (2013). Disponibilidad de piensos y nutrición de aves de corral en países en desarrollo. En A. P. FAO, *Revisión del desarrollo avícola* (págs. 61-73). FAO.
- Rehman, Z. U., Kamran, J., Abd El-Hack, M. E., Alagawany, M., Bhatti, S. A., Ahmad, G., Saleem, A., Ullah, Z., Yameen, R. M. K., y Ding, C. (2018). Influence of low-protein and low-amino acid diets with different sources of protease on performance, carcasses and nitrogen retention of broiler chickens. *Animal Production Science*. 58(9):1625-1631. doi: 10.1071/AN16687.
- Rochell, S. J., Helmbrecht, A., Parsons, C. M., y Dilger, R. N. (2016). Influence of dietary amino acid reductions and *Eimeria acervulina* infection on growth performance and intestinal cytokine responses of broilers fed low crude protein diets. *Poultry Science*. 95(11):2602–2614. doi: 10.3382/ps/pew153.
- Ruiz-Feria, C. A., Kidd, M. T., Wideman, y Wideman, J. R. (2001). Plasma Levels of Arginine, Ornithine, and Urea and Growth Performance of Broilers Fed Supplemental L-Arginine During Cool Temperature Exposure. *Poultry Science*. 80(3):358–369. <https://doi.org/10.1093/ps/80.3.358>.

- Sá, L., Guerra, E., Goulart, C., y Perazzo, C. G. (01 de 05 de 2013). *Aminoácidos en la nutrición de pollos de engorde*. Obtenido de engormix: <https://www.engormix.com/avicultura/articulos/aminoacidos-nutricion-pollos-engorde-t40165.htm>
- Scheuermann, G. N., Bilgili, S. F., Hess, J. B., y Mulvaney, D. R. (2003). Breast Muscle Development In Commercial Broiler Chickens. *Poultry Science*, 82 (10), 1648–1658. <https://doi.org/10.1093/ps/82.10.1648>.
- Si, J., Fritts, C. A., Waldroup, P. W., y Burnham, D. J. (2004). Effects of Excess Methionine from Meeting Needs for Total Sulfur Amino Acids on Utilization of Diets Low in Crude Protein by Broiler Chicks. *Journal of Applied Poultry Research*. 13(4):579-587. doi: 10.1093/japr/13.4.579.
- Siegert, W., Wild, K. J., Schollenberger, M., Helmbrecht, A., y Rodehutsord, M. (2016). Effect of glycine supplementation in low protein diets with amino acids from soy protein isolate or free amino acids on broiler growth and nitrogen utilisation. *British Poultry Science*, 57:424-434. <https://doi.org/10.1080/00071668.2016.1163523>.
- Sigolo, S., Zohrabi, Z., Gallo, A., Seidavi, A., y Prandini, A. (2017). Effect of a low crude protein diet supplemented with different levels of threonine on growth performance, carcass traits, blood parameters, and immune responses of growing broilers. *Poultry Science*. 96(8):2751-2760. doi: 10.3382/ps/pex086.
- Siqueira, J. C., Sakomura, N. K., Dourado, L. B., Ezequiel, J. B., Barbosa, N. A., y Fernandes, J. K. (2013). Diet formulation techniques and lysine requirements of 1- to 22-day-old broilers. *Revista Brasileira de Ciência Avícola*. 15(2):123–134. doi: 10.1590/S1516-635X2013000200008.
- Sirathonpong, O., Ruangpanit, Y., Songserm, O., Koo, E. J., y Attamangkune, S. (2019). Determination of the optimum arginine : lysine ratio in broiler diets. *Animal Production Science*. 59(9):1705–1710. <https://doi.org/10.1071/AN18049>.

- Sirri F, M. A., Sirri, F., y Meluzzi, A. (2012). Effect of sequential feeding on nitrogen excretion, productivity, and meat quality of broiler chickens. *Poultry Science*. 91(2):316-321. doi: 10.3382/ps.2011-01649.
- Spiegel, M. R., y Stephens, L. J. (2009). *Estadística. 4a Edición*. México: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Tesseraud, S., Eneart, N., Ezzine, S. B., Collin, A., Métayer-Coustard, S., y Berri, C. (2011). Manipulating tissue metabolism by amino acids. *World's Poultry Journal Science*. 67:243-252. doi: 10.1017/S0043933911000274.
- Tian, D. L., Guo, R. J., Li, Y. M., Chen, P. P., Zi, B. B., Wang, J. J., Liu, R. F., Min, Y. N., Wang, Z. P., Niu, Z. Y., y Liu, F. Z. (2019). Effects of lysine deficiency or excess on growth and the expression of lipid metabolism genes in slow-growing broilers. *Poultry Science*. 98(7):2927-2932. <https://doi.org/10.3382/ps/pez041>.
- Tossaporn I, Y.-e. K., Tossaporn, I., Yoh-en, K., Tomoki, E., y Hisaya, G. (2010). Histology of intestinal villi and epithelial cells in chickens fed low-crude protein or low crude fat diets. *Italian Journal of Animal Science*. 9(82):428-433. doi: 10.4081/ijas.2010.e82.
- Union Nacional de Avicultores (UNA). (2020). *Compendio de indicadores económicos del sector avícola 2020*. Ciudad de México: UNA.
- van Emous, R. A., Winkel, A., y Aarnink, J. A. (2019). Effects of dietary crude protein levels on ammonia emission, litter and manure composition, N losses, and water intake in broiler breeders. *Poultry Science*. 98(12):6618-6625. <https://doi.org/10.3382/ps/pez508>.
- van Harn, J. V., Dijkslag, M. A., y Krimpen, M. M. (2019). Effect of low protein diets supplemented with free amino acids on growth performance, slaughter yield, litter quality, and footpad lesions of male broilers. *Poultry Science*. 98(10):4868-4877. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pez229>.

- Waguespack, A. M., Powell, S., Bidner, T. D., Payne, R. L., y Southern, L. L. (2009). Effect of incremental levels of L-lysine and determination of the limiting amino acids in low crude protein corn-soybean meal diets for broilers. *Poultry Science*. 88(6):1216–1226. doi: 10.3382/ps.2008-00452.
- Wang, X., Peebles, E. D., Morgan, T. W., Harkess, R. L., y Zhai, W. (2014). Protein source and nutrient density in the diets of male broilers from 8 to 21 d of age: Effects on small intestine morphology. *Poultry Science*, 94(1):61-67. <https://doi.org/10.3382/ps/peu019>.
- Wen, J., Helmbrecht, A., Elliot, M. A., Thomson, J., y Persia, M. E. (2019). Evaluation of the Valine requirement of small-framed first cycle laying hens. *Poultry Science* 98(3):1272-1279. <https://doi.org/10.3382/ps/pey448>.
- Wu, G. (2009). *Principios of Animal Nutrition*. New York: CRC Press Taylor y Francis.
- Xiao, Y., Xiang, Y., Weidong, Z., Jinggang, C., Kaifeng, L., y Hua, Y. (2017). Microbial community mapping in intestinal tract of broiler chicken. *Poultry Science*. 96(5):1387-1393. doi: 10.3382/ps/pew372.
- Xue, P. C., Ajuwon, K. M., y Adeola, O. (2016). Phosphorus and nitrogen utilization responses of broiler chickens to dietary crude protein and phosphorus levels. *Poultry Science*. 95(11):2615–2623. doi: 10.3382/ps/pew156.
- Yıldırım, A., Kraini, N., Constantin, P., Mercierand, F., y Leterrier, C. (2020). Effects of tryptophan and probiotic supplementation on growth and behavior in quail. *Poultry Science*. 99(11):5206-5213. doi: 10.1016/j.psj.2020.07.047.
- Yin, D., Chrystal, P. V., Moss, A. F., Liu, S. Y., Yuana, J., y Selle, P. H. (2020). Effects of reducing dietary crude protein and whole grain feeding on performance and amino acid metabolism in broiler chickens offered wheat-based diets. *Animal Feed Science and Technology*. 260: 1-13. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2019.114386.
- Yodseranee, R., y Bunchasak, C. (2012). Effects of dietary methionine source on productive performance, blood chemical, and hematological profiles in broiler

chickens under tropical conditions. *Tropical Animal Health and Production*. 44:1957–1963. doi: 10.1007/s11250-012-0164-7.

Zeitz, J. O., Käding, S., Niewalda, I. R., Machander, V., Dorigam, J. P., y Eder, K. (2019). Effects of leucine supplementation on muscle protein synthesis and degradation pathways in broilers at constant dietary concentrations of isoleucine and valine. *Archives of Animal Nutrition*. 73(2):75–87. doi: 10.1080/1745039X.2019.1583519.

Zeitz, J.O., Fleischmann, A., Ehbrecht, T., Most, E., Friedrichs, S., Whelan, R., Gessner, D. K., Failing, K., Lütjohann, D., y Eder, K. (2020). Effects of supplementation of DL-methionine on tissue and plasma antioxidant status during heat-induced oxidative stress in broilers. *Poultry Science*. 99(12):6837-6847. doi: 10.1016/j.psj.2020.08.082.

Zulkifli, I., Akmal, A. F., Soleimani, A. F., Hossain, M. A., y Awad, E. A. (2018). Effects of low-protein diets on acute phase proteins and heat shock protein 70 responses, and growth performance in broiler chickens under heat stress condition. *Poultry Science*, 97(4):1306–1314. <https://doi.org/10.3382/ps/pex436>.

## CUADROS

**Cuadro 1.** Sistemas de transporte de aminoácidos en mamíferos, su mecanismo y sustratos

Sistema de transporte	Isoformas (cADNs clonados)	Mecanismo	Carga de los aminoácidos	Aminoácidos
<b>A</b>	ATA1 ATA2 ATA3	Cotransporte 1Na <sup>+</sup> /AA	Neutros	Gly, Ala, Ser, Cys, Gln, Asn, His, Met Gly, Pro, Ala, Ser, Cys, Gln, Asn, His, Met Gly, Pro, Ala, Ser, Cys, Asn, Mat
<b>asc</b>	asc-1/4F2hc asc-2/(?)	Antiporte	Neutros	Gly, Ala, Ser, Cys, Thr (D y L) Gly, Ala, Ser, Thr
<b>ASC</b>	ASCT1 ASCT2	Antiporte NA <sup>+</sup> - dependiente	Neutros	Ala, Ser, Cys Ala, Ser, Cys, Thr, Gln
<b>b<sup>0,+</sup></b>	b <sup>0,+</sup> AT/rBAT	Antiporte	Básicos	Lys, Arg, Ala, Ser, Cys, Thr, Asn, Gln, His, Met, Ile, Val, Phe, Tyr, Trp, Cys-
<b>B<sup>0</sup></b>	B0AT-1	Cotransporte 2Na <sup>+</sup> /AA	Básicos	Leu, Ile, Gln, Phe, Ala, Pro, Cys, Val, Met, Ser, Asn, (His, Gly, Thr, Asn, Gln)
<b>B0,+</b>	ATB0,+	Cotransporte 2Na <sup>+</sup> /1Cl <sup>-</sup> /AA	Básicos	Ala, Ser, Cys, His, Met, Ile, Leu, Val, Phe, Tyr, Trp, (Lys, Arg, Thr, Asn, Gln)
<b>β</b>	GAT1 GAT2 GAT3 GAT4	Cotransporte 2-3Na <sup>+</sup> /1Cl <sup>-</sup> / /AA	Neutros	Pro, B-Ala
<b>Gly</b>	GlyT1 GlyT2	Cotransporte 2-3Na <sup>+</sup> /1Cl <sup>-</sup> / /AA	Neutros	Gly Gly
<b>IMINO</b>	PAT1 PAT2 PAT3 (?)	Cotransporte 1H <sup>+</sup> /AA		Pro, Gly, Ala, B-Ala Pro, Gly, Ala ?
<b>L</b>	LAT-1/4F2hc LAT-2/4F2hc LAT-3	Antiporte	Neutros	His, Met, Leu, Ile, Val, Phe, Tyr, Trp (Gln) Ala, Ser, Cys, Thr, Asn, Gln, His, Met, Leu, Ile, Val Leu, Ile, Val, Phe, Met
<b>N</b>	SN1 SN2	Cotransporte Na <sup>+</sup> /AA acoplado AA <sup>+</sup> -antiporte	Neutros	Gln, Asn, His Gln, Asn, His, Ser, Gly
<b>T</b>	TAT1	Uniporte	Neutros	Phe, Tyr, Trp
<b>X<sup>AG</sup></b>	EAAT1 EAAT2 (GLT1) EAAT3 EAAT4 EAAT5	Cotransporte 2- 3Na <sup>+</sup> /1H <sup>+</sup> /AA acoplado a K <sup>+</sup> -antiporte	Ácidos	Glu, Asp Glu, Asp Glu, Asp, Cys Glu, Asp Glu, Asp
<b>xc</b>	xCT/4F2hc	Antiporte	Ácidos	Glu, Cys-, (Asp)
<b>y<sup>+</sup></b>	CAT-1 CAT-2A/B CAT-3 CAT-4 (?)	Uniporte	Básicos	Arg, Lys, His Arg, Lys, His Arg, Lys ?
<b>y+L</b>	y+LAT- 1/4F2hc y+LAT- 2/4F2hc	Antiporte 1Na <sup>+</sup> /AA	Básicos	Lys, Arg, Gln, His, Met, Leu Lys, Arg, Gln, His, Met, Leu, Ala, Cys

*Fuente: Modificada Barrera 2010*

**Cuadro 2** Análisis del Maíz por medio de espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano NIR

<b>Maíz</b>	
	Contenido %
<b>Materia seca</b>	87.47
<b>Energía Metabolizable Aparente</b>	3318
<b>Kcal/kg</b>	
<b>Proteína cruda</b>	7.27
<b>Metionina</b>	0.148
<b>Cistina</b>	0.166
<b>Metionina + Cistina</b>	0.314
<b>Lisina</b>	0.220
<b>Treonina</b>	0.258
<b>Triptófano</b>	0.056
<b>Arginina</b>	0.342
<b>Isoleucina</b>	0.247
<b>Leucina</b>	0.861
<b>Valina</b>	0.342
<b>Histidina</b>	0.213
<b>Fenilalanina</b>	0.349
<b>Glicina</b>	0.283
<b>Serina</b>	0.344
<b>Prolina</b>	0.658
<b>Alanina</b>	0.533
<b>Ácido aspártico</b>	0.472
<b>Ácido glutámico</b>	1.299
<b>NH3</b>	0.173
<b>Total incluyendo NH3</b>	6.928
<b>Total sin NH3</b>	6.727

**Cuadro 3** Análisis de la Harina de soya por medio de espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano NIR

<b>Harina de soya</b>	
	Contenido %
<b>Materia seca</b>	88.95
<b>Energía Metabolizable Aparente</b>	2341
<b>Proteína cruda</b>	47.32
<b>Metionina</b>	0.633
<b>Cistina</b>	0.691
<b>Metionina + Cistina</b>	1.319
<b>Lisina</b>	2.862
<b>Treonina</b>	1.826
<b>Triptófano</b>	0.628
<b>Arginina</b>	3.453
<b>Isoleucina</b>	2.141
<b>Leucina</b>	3.55
<b>Valina</b>	2.229
<b>Histidina</b>	1.205
<b>Fenilalanina</b>	2.403
<b>Glicina</b>	1.976
<b>Serina</b>	2.359
<b>Prolina</b>	2.356
<b>Alanina</b>	2.021
<b>Ácido aspártico</b>	5.331
<b>Ácido glutámico</b>	8.425
<b>NH3</b>	0.936
<b>Total incluyendo NH3</b>	44.757
<b>Total sin NH3</b>	43.781

**Cuadro 4.** Composición de las dietas de iniciación (0-10 días) para pollos de engorda Ross 308 y su análisis calculado.

<b>Dieta</b>	<b>Balanceada 23% de PC</b>	<b>Menos 1% de PC</b>	<b>Menos 2% de PC</b>
<b>Ingrediente</b>	<b>Kg</b>	<b>Kg</b>	<b>Kg</b>
<b>Maíz amarillo</b>	557.808	557.162	569.314
<b>Pasta de soya</b>	345.283	323.884	300.863
<b>DDGS</b>	60	60	60
<b>Aceite de soya</b>	2.663	13.855	15.000
<b>Carbonato de calcio</b>	15.347	18.497	21.050
<b>Fosfato de calcio</b>	4.426	9.800	9.993
<b>Cloruro de Sodio</b>	2.575	2.439	2.450
<b>Premezcla de vitaminas y minerales</b>	2.500	2.500	2.500
<b>Fitasa</b>	0.080	0.080	0.080
<b>Nicarbazina</b>	0.500	0.500	0.500
<b>Bacitracina</b>	0.300	0.300	0.300
<b>Secuestrante de micotoxinas</b>	1.000	1.000	1.000
<b>DL-Metionina</b>	3.482	3.747	3.991
<b>L-Lisina HCl</b>	2.836	3.586	4.359
<b>L-Treonina</b>	1.200	1.600	1.978
<b>Creamino-Arginina</b>	-	0.615	1.700
<b>L-Valina</b>	-	0.435	1.000
<b>L-Triptófano</b>	-	-	3.921

Análisis calculado

<b>Nutriente %</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>
<b>E.M. Kcal/Kg</b>	3.000	3.000	3.000
<b>Proteína total</b>	23	22	21
<b>Fósforo no fítico</b>	0.480	0.480	0.480
<b>Calcio</b>	1.000	1.000	1.100
<b>Sodio</b>	0.180	0.180	0.180
<b>Ácido linoleico</b>	1.575	2.149	2.225
<b>Met. Dig</b>	0.648	0.661	0.673
<b>Met + Cis Dig</b>	0.950	0.950	0.950
<b>Lis Dig</b>	1.280	1.280	1.280
<b>Tre Dig</b>	0.856	0.859	0.860
<b>Arg Dig</b>	1.396	1.370	1.379
<b>Tri Dig</b>	0.221	0.209	0.197
<b>Val Dig</b>	0.964	0.959	0.968
<b>Leu Dig</b>	1.781	1.707	1.641

**Cuadro 5** Composición de las dietas de crecimiento (11-24 días) en pollos Ross 308 y su análisis calculado.

<b>Dieta</b>	<b>Balanceada 21.5%PC</b>	<b>Menos 1% de PC</b>	<b>Menos 2% de PC</b>
<b>Ingrediente</b>	<b>Kg</b>	<b>Kg</b>	<b>Kg</b>
<b>Maíz amarillo</b>	571.391	616.350	616.350
<b>Pasta de soya</b>	310.896	261.970	261.970
<b>DDGS</b>	60	60	60
<b>Aceite de soya</b>	23.003	18.000	18.000
<b>Carbonato de calcio</b>	17.753	18.097	18.097
<b>Fosfato de calcio</b>	2.831	2.686	2.686
<b>Cloruro de Sodio</b>	2.648	2.691	2.691
<b>Premezcla de vitaminas y minerales</b>	3.000	3.000	3.000
<b>Fitasa</b>	0.080	0.080	0.080
<b>Nicarbazina</b>	0.500	0.500	0.500
<b>Bacitracina</b>	0.300	0.300	0.300
<b>Secuestrante de micotoxinas</b>	1.000	1.000	1.000
<b>DL-Metionina</b>	3.052	3.505	3.505
<b>L-Lisina HCl</b>	2.345	4.000	4.000
<b>L-Treonina</b>	1.200	1.606	1.606
<b>Creamino-Arginina</b>		1.000	1.000
<b>L-Valina</b>		2.000	2.000
<b>L-Triptófano</b>		3.215	3.215

Análisis calculado

<b>Nutriente %</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>
<b>E.M. Kcal/Kg</b>	3.100	3.100	3.100
<b>Proteína total</b>	21.500	20.5	19.5
<b>Fósforo no fítico</b>	0.440	0.430	0.430
<b>Calcio</b>	0.870	0.870	0.870
<b>Sodio</b>	0.180	0.180	0.180
<b>Ácido linoleico</b>	2.648	2.225	2.459
<b>Met. Dig</b>	0.586	0.597	0.608
<b>Met + Cis Dig</b>	0.870	0.870	0.870
<b>Lis Dig</b>	1.150	1.150	1.155
<b>Tre Dig</b>	0.801	0.805	0.770
<b>Arg Dig</b>	1.284	1.230	1.210
<b>Tri Dig</b>	0.203	0.190	0.178
<b>Val Dig</b>	0.893	0.890	0.997
<b>Leu Dig</b>	1.678	1.621	1.558

**Cuadro 6** Composición de las dietas de finalización 1 (25-39 días) en pollos de engorda Ross 308 y su análisis calculado.

<b>Dieta</b>	<b>Balanceda 19-5% de PC</b>	<b>Menos 1% de PC</b>	<b>Menos 2% de PC</b>
<b>Ingrediente</b>	<b>Kg</b>	<b>Kg</b>	<b>Kg</b>
<b>Maíz amarillo</b>	597.309	619.976	642.684
<b>Pasta de soya</b>	265.373	242.538	214.252
<b>DDGS</b>	60	60	60
<b>Aceite de soya</b>	39.964	37.129	39.000
<b>Carbonato de calcio</b>	16.621	16.690	16.767
<b>Fosfato de calcio</b>	0.828	0.975	1.180
<b>Cloruro de Sodio</b>	2.748	2.761	2.779
<b>Premezcla de vitaminas y minerales</b>	3.000	3.000	3.000
<b>Pigmento</b>	6.000	6.000	6.000
<b>Fitasa</b>	0.080	0.080	0.080
<b>Nicarbazina</b>	0.500	0.500	0.500
<b>Bacitracina</b>	0.300	0.300	0.300
<b>Secuestrante de micotoxinas</b>	1.000	1.000	1.000
<b>DL-Metionina</b>	3.061	3.276	3.558
<b>L-Lisina HCl</b>	2.265	3.008	4.000
<b>L-Treonina</b>	0.953	1.500	1.800
<b>Creamino-Arginina</b>	-	0.929	2.100
<b>L-Valina</b>	-	0.440	1.000

**Análisis calculado**

<b>Nutriente %</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>
<b>E.M. Kcal/Kg</b>	3.200	3.200	3.229
<b>Proteína total</b>	19.592	18.672	17.500
<b>Fósforo no fítico</b>	0.390	0.390	0.390
<b>Calcio</b>	0.780	0.780	0.780
<b>Sodio</b>	0.180	0.180	0.180
<b>Ácido linoleico</b>	3.566	3.454	3.586
<b>Met. Dig</b>	0.552	0.562	0.576
<b>Met + Cis Dig</b>	0.800	0.800	0.800
<b>Lis Dig</b>	1.020	1.020	1.025
<b>Tre Dig</b>	0.680	0.690	0.687
<b>Arg Dig</b>	1.090	1.090	1.090
<b>Tri Dig</b>	0.284	0.276	0.265
<b>Val Dig</b>	0.780	0.780	0.780
<b>Leu Dig</b>	1.384	1.324	1.245

**Cuadro 7** Composición de las dietas de finalizador 2 (40-49 días) en pollos de engorda Ross 308 y su análisis calculado.

Dieta	Balanceada	18% de PC	Menos 1% menos de PC	Menos 2% de PC
Ingrediente	Kg		Kg	
Maíz amarillo	628.975		653.523	678.370
Pasta de soya	232.638		207.841	183.013
DDGS	60		60	60
Aceite de soya	39.000		36.200	33.000
Carbonato de calcio	15.064		15.139	15.213
Fosfato de calcio	2.895		3.056	3.216
Cloruro de Sodio	3.000		3.000	3.000
Premezcla de vitaminas y minerales	3.000		3.000	3.000
Pigmento	6.000		6.000	6.000
Fitasa	0.060		0.060	0.060
Monensina	0.500		0.500	0.500
Bacitracina	0.300		0.300	0.300
Secuestrante de micotoxinas	1.000		1.000	1.000
DL-Metionina	2.866		3.100	3.350
L-Lisina HCl	2.566		3.373	4.179
L-Treonina	1.050		1.410	1.800
Creamino-Arginina	0.685		1.700	2.700
L-Valina	0.400		0.800	1.300

Análisis calculado

Nutriente %	Cantidad	Cantidad	Cantidad
E.M. Kcal/Kg	3.200	3.202	3.201
Proteína total	18	17	16
Fósforo no fítico	0.370	0.370	0.370
Calcio	0.740	0.740	0.740
Sodio	0.184	0.184	0.183
Ácido linoleico	3.566	3.459	3.333
Met. Dig	0.517	0.528	0.541
Met + Cis Dig	0.750	0.750	0.752
Lis Dig	0.960	0.960	0.960
Tre Dig	0.641	0.640	0.642
Arg Dig	1.040	1.041	1.040
Tri Dig	0.272	0.264	0.256
Val Dig	0.757	0.749	0.752
Leu Dig	1.297	1.231	1.166

**Cuadro 8** Resultados promedio de parámetros productivos en 49 días de experimentación en pollos de engorda alimentados con tres niveles de proteína cruda suplementada con aminoácidos sintéticos.

<b>FACTOR 1</b>	<b>FACTOR 2</b>	<b>GDP</b>	<b>CA</b>	<b>IC</b>	<b>MORTALIDAD</b>
<b>SEXO</b>	<b>PROTEÍNA</b>	<b>(g)</b>	<b>(g)</b>	<b>(Kg:Kg)</b>	<b>(%)</b>
<b>MACHOS</b>		3505a±88	6080a±266	1.73b±.08	7.16±3.69
<b>HEMBRA</b>		2983b±78	5320b±184	1.78a±.07	5.27±4.18
	BALANCEADA	3290±296	5739±437	1.75±.06	6.63±3.27
	MENOS 1%	3214±276	5778±453	1.80±.06	5.73±4.58
	MENOS 2%	3228±277	5583±463	1.73±.09	6.29±4.34
<b>SEXO</b>		0.000	0.000	0.041	0.181
<b>PROTEÍNA</b>	PROBABILIDAD	0.060	0.096	0.059	0.865
<b>SEXO*</b>		0.846	0.810	0.648	0.847
<b>PROTEÍNA</b>					
<b>EMM</b>		13.40	37.39	0.12	0.69

Diferentes letras dentro de una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas (P < 0.05)

EMM Error Estándar de la Media

**Cuadro 9** Resultados promedio del porcentaje de rendimiento de la canal, peso vivo y peso de la canal caliente en 49 días de experimentación en pollos de engorda alimentados con tres niveles de proteína cruda suplementada con aminoácidos sintéticos

<b>FACTOR 1 SEXO</b>	<b>FACTOR 2 PROTEÍNA</b>	<b>PESO VIVO (g)</b>	<b>PESO CANAL CALIENTE (g)</b>	<b>RENDIMIENTO DE LA CANAL (%)</b>
<b>MACHOS</b>		3612a±115	2636a±91	73.00±0.87
<b>HEMBRA</b>		2977b±115	2164b±87	72.76±0.86
	BALANCEADA	3336±329	2438±253	73.13±1.05
	MENOS 1%	3273±317	2376±227	72.59±0.65
	MENOS 2%	3274±400	2386±297	72.92±0.81
<b>SEXO</b>		0.000	0.000	0.397
<b>PROTEÍNA</b>	PROBABILIDAD	0.299	0.183	0.284
<b>SEXO*PROTEÍNA</b>		0.223	0.230	0.174
<b>EMM</b>		18.75	14.21	0.139

Diferentes letras dentro de una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ )

Diferentes letras dentro de una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas ( $P < 0.05$ )

EMM Error Estándar de la Media

**Cuadro 10** Resultados promedio de los porcentajes de rendimiento de pechuga, porcentaje de grasa celómica y pierna con muslo en 49 días en pollos de engorda alimentados con tres niveles de proteína cruda suplementada con aminoácidos sintéticos

<b>FACTOR 1 SEXO</b>	<b>FACTOR 2 PROTEÍNA</b>	<b>% DE GRASA</b>	<b>RENDIMIENTO DE PECHUGA (%)</b>	<b>RENDIMIENTO DE PIERNA CON MUSLO (%)</b>
<b>MACHOS</b>		5.20b±1.17	23.4b±1.60	21.5a±0.88
<b>HEMBRA</b>		6.17a±1.33	24.6a±1.00	20.7b±0.82
	BALANCEADA	5.57a±1.25	24.6±1.65	21.3±1.20
	MENOS 1%	6.87b±0.74	24.2±1.34	21.6±0.45
	MENOS 2%	6.35b±0.86	24.3±1.01	21.0±0.83
<b>SEXO</b>		0.001	0.008	0.008
<b>PROTEÍNA</b>	PROBABILIDAD	0.000	0.682	0.092
<b>SEXO* PROTEÍNA</b>		0.141	0.711	0.307
<b>EMM</b>		0.136	0.209	0.261

Diferentes letras dentro de una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas (P < 0.05)

EMM Error Estándar de la Media

**Cuadro 11** Resultados promedio de pigmentación amarilla de la piel en pollo vivo a los 35, 42 y 49 días en pollos de engorda alimentados con tres niveles de proteína cruda suplementada con aminoácidos sintéticos.

SEMANA		5	6	7
<b>FACTOR 1 SEXO</b>	<b>FACTOR 2 PROTEÍNA</b>	b	b	b
<b>MACHOS</b>		12.81±2.73	14.49b±2.04	17.02b±3.66
<b>HEMBRA</b>		13.95±2.10	16.36a±2.06	19.01a±2.79
	BALANCEADA	13.29±1.96	15.42±2.25	19.69±2.47
	MENOS 1%	12.95±2.72	16.23±1.97	20.63±1.95
	MENOS 2%	13.90±2.66	14.15±3.90	19.01±2.62
<b>SEXO</b>	<b>PROBABILIDAD</b>	0.173	0.031	0.011
<b>PROTEÍNA</b>		0.628	0.264	0.683
<b>SEXO*PROTEÍNA</b>		0.392	0.725	0.348
<b>EMM</b>		0.172	0.354	0.360

Diferentes letras dentro de una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas ( $P < 0.05$ )

EMM Error Estándar de la Media

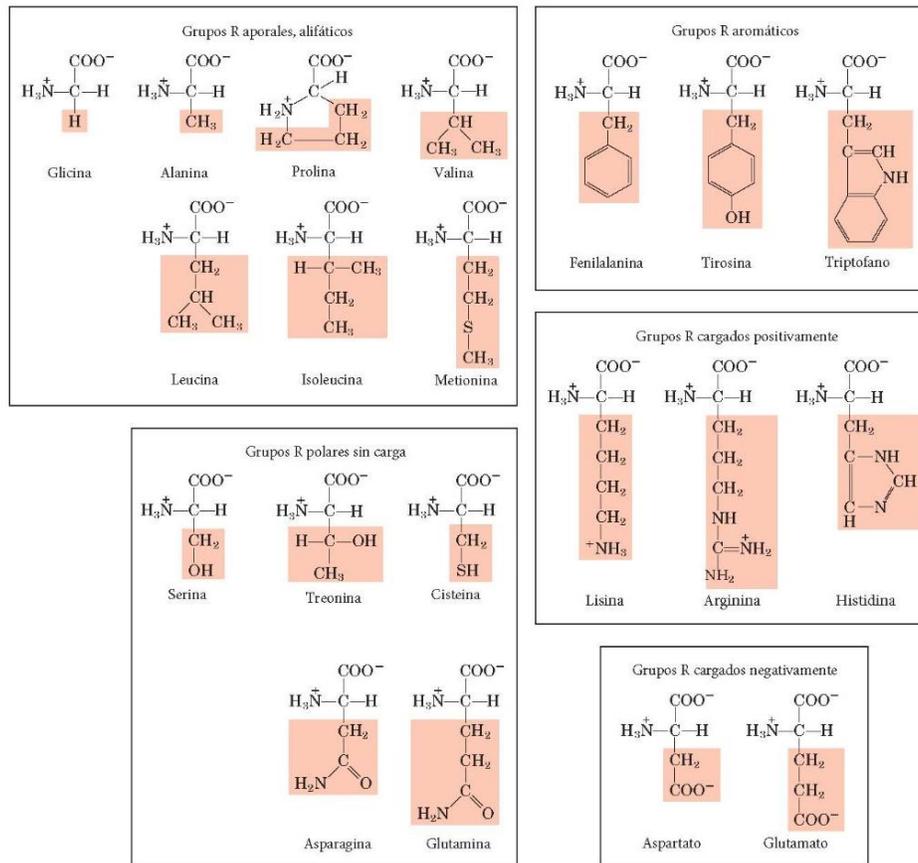
**Cuadro 12** Resultados promedio de pigmentación amarilla en la piel en pollo vivo y en canal fría a los 49 días en pollos de engorda alimentados con tres niveles de proteína cruda suplementada con aminoácidos sintéticos.

PIGMENTO		CANAL FRÍA
<b>FACTOR 1 SEXO</b>	<b>FACTOR 2 PROTEÍNA</b>	<b>b</b>
<b>MACHOS</b>		40.30±3.76
<b>HEMBRA</b>		40.42±4.65
	BALANCEADA	40.39±3.57
	MENOS 1%	40.00±4.32
	MENOS 2%	40.2±4.14
<b>SEXO</b>	<b>PROBABILIDAD</b>	0.841
<b>PROTEÍNA</b>		0.225
<b>SEXO*PROTEÍNA</b>		0.991
<b>EMM</b>		0.373

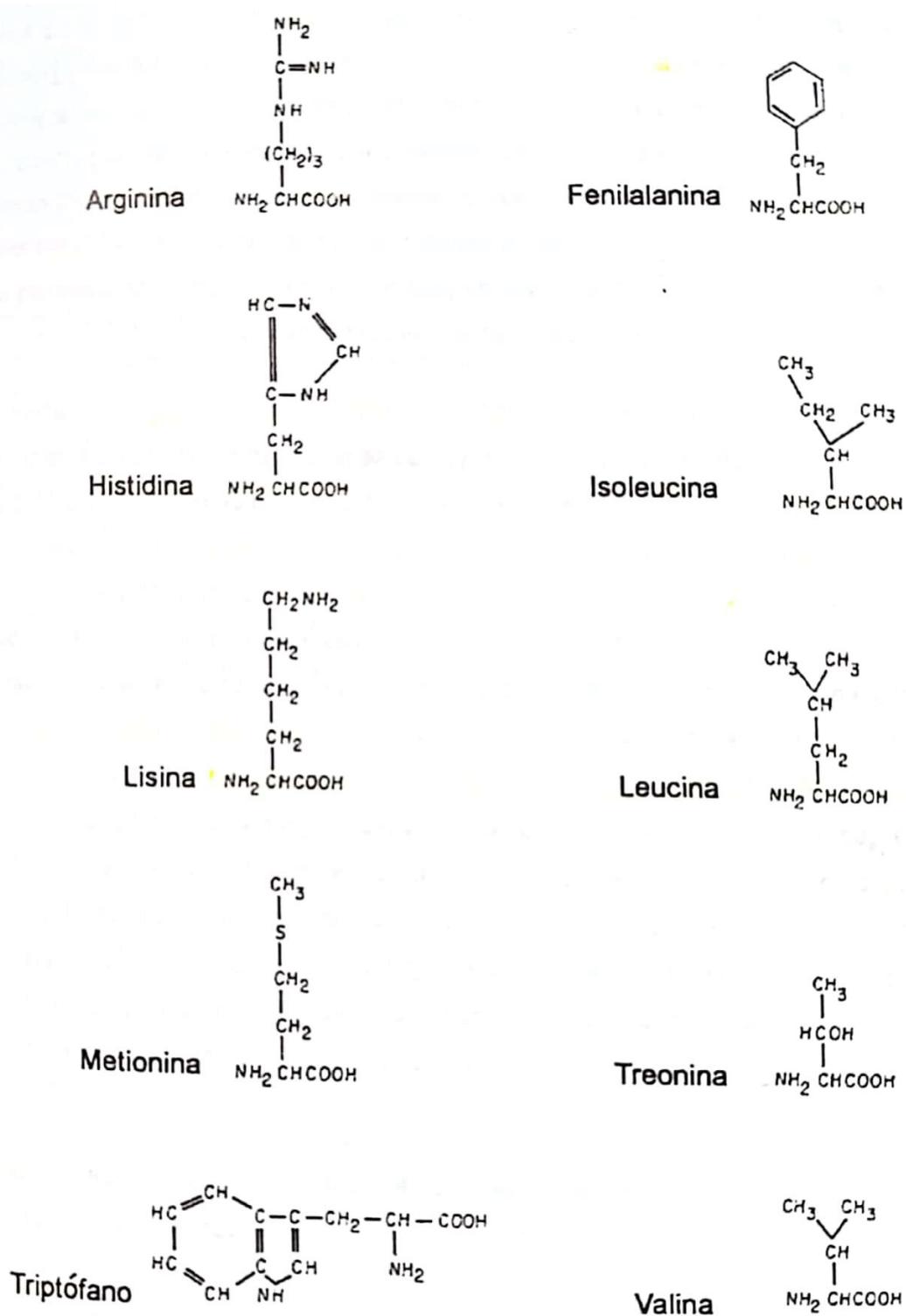
Diferentes letras dentro de una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas ( $P < 0.05$ )

EMM Error Estándar de la Media

# FIGURAS



**Figura 1** Clasificación de los aminoácidos según su grupo R.  
Recuperada de Nelson y Cox, (2015).



[Figura 2](#) Aminoácidos essenciais em Aves

Tomado de Cuca et al., (2016).

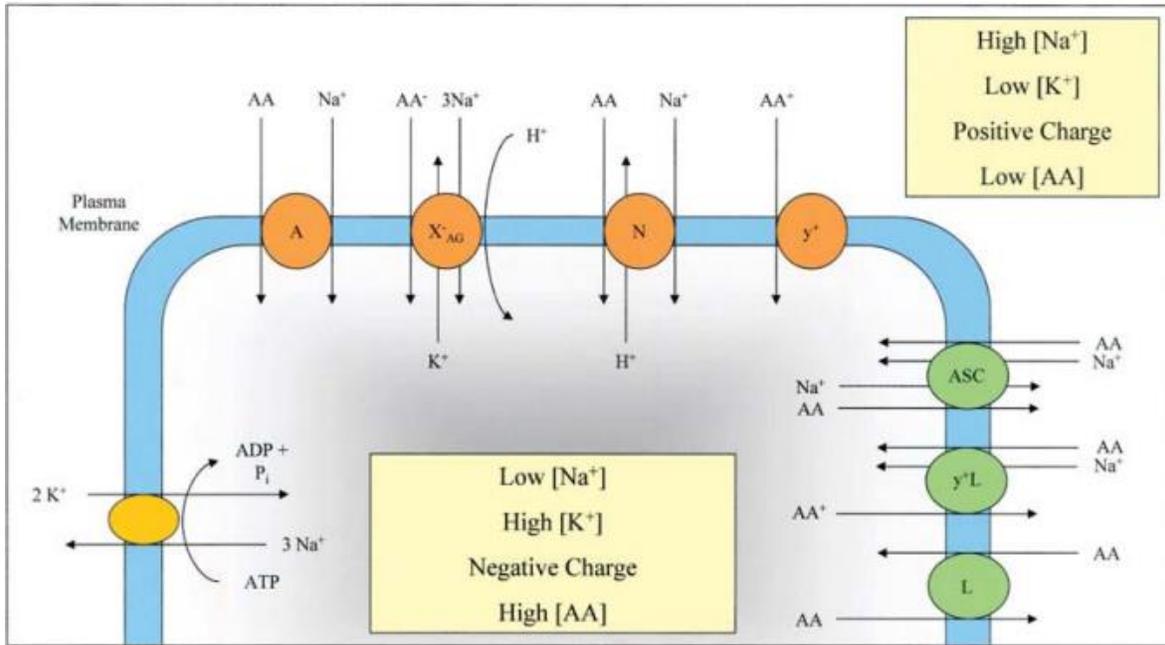


Figura 3. Sistemas transportadores de Aminoácidos

Tomado de Hyde et al., (2003)

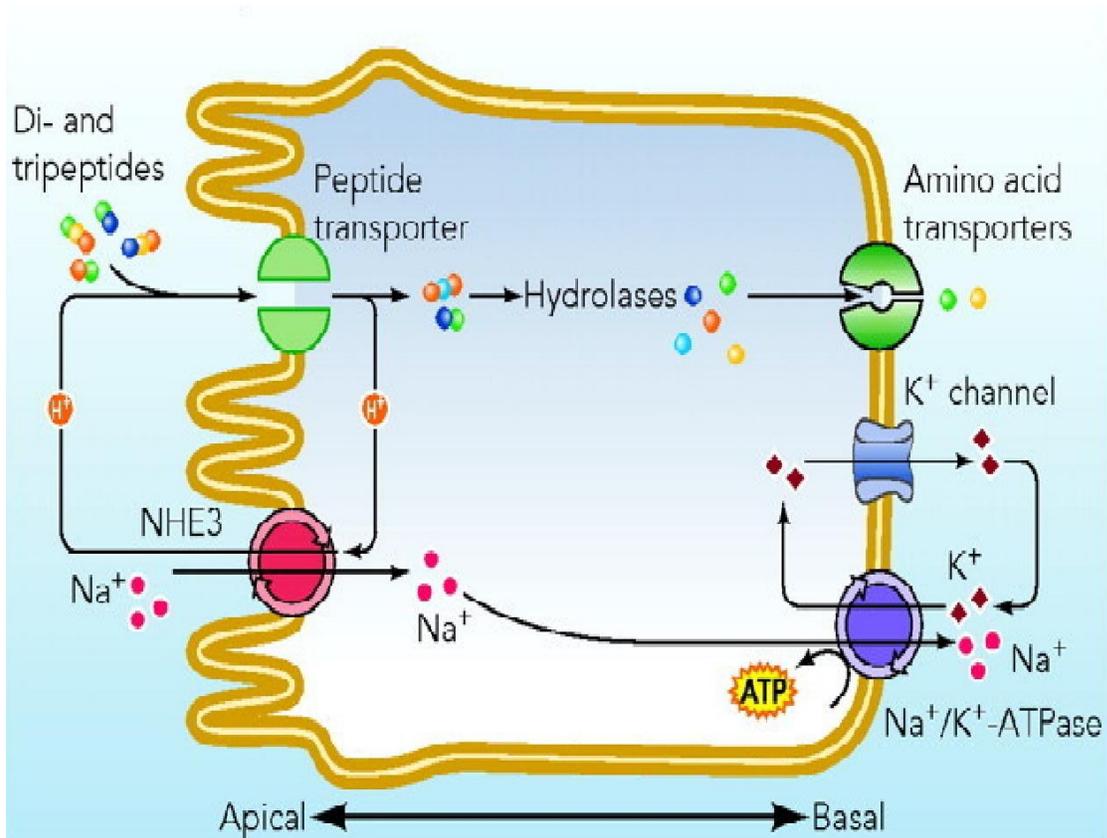


Figura 4. Transporte de dipéptidos y tripéptidos por el Sistema PepT1

Modificado de Daniel et al., (2006).